

*Российская Академия Наук*

# ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

1/2016



- науки о земле:
  - геология и минералогия
  - кристаллография
- горное дело
- экология
- почвоведение
- информатика
- конференции, семинары
- новые книги
- юбиляры
- ad memoriam

1/2016(24)

издается с декабря 2009 года

ISSN 2307-5228

ISBN 978-5-91137-347-4

*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, проф. Г. Г. Матишов,  
академик, проф. Н. Н. Мельников,  
чл.-корр., проф. В. К. Жиров,  
чл.-корр., 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.**

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

**Геология и минералогия**

В. Я. Евзеров	Четвертичный период в Кольском регионе (вопросы стратиграфии и тектоники).....	5
Д. В. Жиров, Г. С. Мелихова, В. В. Рыбин и др.	Особенности инженерно-геологического изучения массивов скальных пород в целях проектирования глубоких карьеров на примере Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд. Часть 1....	15
Ю. А. Балашов	Вода на Земле и Луне.....	26

**Кристаллография**

Д. Г. Степенщиков	О трансформации фуллеренов.....	32
Ю. Л. Войтеховский	Упорядочение выпуклых полиэдров.....	38

**ГОРНОЕ ДЕЛО**

С. Н. Савченко, А. В. Ловчиков	Варианты безопасной отработки сближенных залежей при расконсервации рудника «Умбозеро».....	44
В. П. Конухин, Н. Н. Абрамов, Е. В. Кабеев	Методические особенности геофизических исследований при строительстве объектов переработки и долговременного хранения радиоактивных отходов ВМФ в Северо-Западном регионе России.....	52

**ЭКОЛОГИЯ**

В. А. Маслобоев, А. А. Бакланов, П. В. Амосов	Результаты моделирования процессов пыления хвостохранилищ.....	59
В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин	Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря.....	69
Р. Г. Мелконян, О. В. Суворова, Д. В. Макаров	Опыт и перспективы использования отходов горно-металлургического комплекса для получения стекол и стеклокристаллических материалов.....	81

**ПОЧВОВЕДЕНИЕ**

Г. А. Евдокимова, М. В. Корнейкова, Н. П. Мозгова и др.	Эколого-биологическая характеристика почв приграничного района Россия-Норвегия.....	89
---	---	----

**ИНФОРМАТИКА**

А. Я. Фридман	Автоматизация синтеза баз данных системы ситуационного моделирования по их концептуальному описанию.....	100
И. О. Датъев, А. А. Павлов	Моделирование беспроводных многошаговых самоорганизующихся мобильных сетей.....	116
В. В. Быстров, А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник и др.	Результаты первого года исследований по проекту «Разработка когнитивных методов и технологий информационного мониторинга жизненного цикла угроз региональной безопасности (на примере Арктической зоны Российской Федерации)».....	127
	<b>КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ</b> .....	134
	<b>НОВЫЕ КНИГИ</b> .....	139
	<b>ЮБИЛЯРЫ</b> .....	142
	<b>AD MEMORIAM</b> .....	148

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. Макарович, 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)  
Информационная поддержка: И. Г. Савчук, Л. А. Тимофеева  
Графический и художественный редактор Е. Т. Мартынова

1/2016 (24)

Published since December 2009

ISSN 2307-5228

ISBN 978-5-91137-347-4

*Russian Academy of Sciences*

HERALD

of the Kola Science Centre of the RAS

**Publisher – Federal State Institution of Science Kola Science Centre of the RAS**

---

Editor-in-Chief – Dr.Sci. (Geol.), Prof.

Yu. L. Voytekhovskiy

Vice Editors-in-Chief:

Dr.Sci. (Geol.), Prof. V. P. Petrov,

Dr.Sci. (Eng.), Prof. A. Ya. Fridman

(Head of Editorial Staff)

Editorial Board:

Academician of RAS, Prof. G. G. Matishov,

Academician of RAS, Prof. N. N. Mel'nikov,

Corr. Member of RAS, Prof. V. K. Zhironov,

Corr. Member of RAS, Prof. A. I. Nikolaev,

Dr.Sci. (Eng.), Prof. B. V. Efimov,

Dr.Sci. (Econ.), Prof. F. D. Larichkin,

Dr.Sci. (Eng.) V. A. Masloboev,

Dr.Sci. (Eng.), Prof. V. A. Putilov,

Dr.Sci. (Phys.-Math.) E. D. Tereshchenko,

PhD (Geol.) A. N. Vinogradov

(Responsible Secretary)

The responsibility for opinions, expressed in 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 Center of the RAS for the opinions expressed in them.

**The journal is included in the Russian Science Citation Index (RISC) since 2009**

**EARTH SCIENCES**

**Geology and Mineralogy**

Vladimir Ya. Evzerov	Quaternary Period in the Kola Region (Issues of Stratigraphy and Tectonics)	5
Dmitry V. Zhirov, Galina S. Melikhova, Vadim V. Rybin et al.	Peculiarities of the Engineering-Geological Studies of Rock Massifs for Designing / Redesigning Deep Open Pits Exemplified with the Kovdor Deposit of Magnetite and Apatite Ores (Kovdor Alkaline-Ultrabasic Massif, NE of the Fennoscandian Shield). Part 1.....	15
Yury A. Balashov	Water on the Earth and on the Moon.....	26

**Crystallography**

Dmitry G. Stepenshchikov	On Transformations of Fullerenes.....	32
Yury L. Voytekhovskiy	Ordering of Convex Polyhedra.....	38

**MINING SCIENCE**

Stepan N. Savchenko, Aleksandr V. Lovchikov	The Umbozero Mine Reactivation: Variants of Safe Mining of Adjacent Ore Bodies.....	44
Vladimir P. Konuhin, Nikolai N. Abramov, Evgeny V. Kabaev	Methodical Particularities in Geophysical Studies at Constructing Facilities for Processing and Long-Term Storage of Navy Radioactive Waste in the Northern-Western Region of Russia.....	52

**ECOLOGY**

Vladimir A. Masloboev, Alexander A. Baklanov, Piotr V. Amosov	Modeling Results of Dust Processes of Tailing Dumps.....	59
Vladimir A. Dauvalter, Nikolay A. Kashulin	The Main Regularities of Heavy Metals Distribution for Lakes Sediments in the Northeast Part of Murmansk Region of the Barents Sea Basin.....	69
Ruben G. Melkonyan, Olga V. Suvorova, Dmitriy V. Makarov	Experience and Prospects to Use Mining and Metallurgical Wastes for Manufacturing Glass and Glass-Ceramic Materials.....	81

**SOIL SCIENCE**

Galina A. Evdokimova, Mariya V. Korneykova, Natalia P. Mozgova et al.	Environmental and Biological Description of Soils in the Russian–Norwegian Border Area.....	89
---	---	----

**INFORMATICS**

Alexander Ya. Fridman	Conceptual-Description-Based Automation of Databases Synthesis in Situational Modeling System.....	100
Igor O. Datyev, Alexey A. Pavlov	Modelling of Wireless Multihop Self-Organizing Mobile Networks.....	116
Vitaliy V. Bystrov, Andrey V. Masloboev, Andrey G. Oleynik et al.	Project "Development of Cognitive Methods and Technologies for Information Monitoring of the Regional Security Threats Life-Cycle (Exemplified with the Arctic Zone of Russian Federation)": First-Year Research Results.....	127

**CONFERENCES, WORKSHOPS** ..... 134

**NEW BOOKS** ..... 139

**ANNIVERSARIES** ..... 142

**AD MEMORIAM** ..... 148

УДК 551.79+551.24(470.21)

## ЧЕТВЕРТИЧНЫЙ ПЕРИОД В КОЛЬСКОМ РЕГИОНЕ (ВОПРОСЫ СТРАТИГРАФИИ И ТЕКТониКИ)

**В. Я. Евзеров**

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

### Аннотация

В Кольском регионе установлены четвертичные отложения последних примерно 244 тысяч лет. В регионе происходили и гляциоизостатические, и собственно тектонические движения. Последнее гляциоизостатическое поднятие имеет куполообразную форму. Собственно тектонические процессы проявляются в виде поднятий, опусканий, вращения отдельных блоков литосферной плиты и субгоризонтальных сдвигов. Они наряду с гляциоизостазией приводили и приводят к напряжениям в земной коре, вызывающим землетрясения.

### Ключевые слова:

*Кольский регион, четвертичный период, стратиграфия, гляциоизостазия, собственно тектонические процессы.*

## QUATERNARY PERIOD IN THE KOLA REGION (ISSUES OF STRATIGRAPHY AND TECTONICS)

**Vladimir Y. Evzerov**

Geological Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

The results of studying of the Quaternary period events in the Kola region have been systematized. It was found that the cover is formed by Quaternary deposits that include the seven youngest "marine isotope stages", covering approximately the past 244,000 years. During degradation of glaciers that partially or completely covered the surface, glacioisostatic uplift occurred. Local tectonic movements of the individual blocks of the lithospheric plate took place also. The uplift has a dome shape and was formed during the degradation of the Valdai glaciation and the Holocene period. Its rate decreases with time. The resource of the raising is not exhausted yet: total relaxation time exceeds the period from the initial stage of the late Valdai deglaciation to the present. Tectonic processes appear as uplifts, subsidences, rotation of individual blocks of lithospheric plates and sub-horizontal shifts as well. Glacioisostatic raising and tectonic processes produce stresses in the earth's crust, causing earthquakes.

### Keywords:

*Kola region, Quaternary period, stratigraphy, glacioisostasy, tectonic processes.*



### Введение

Кольский регион включает территорию Мурманской обл. и прилегающие к ней шельфы Баренцева и Белого морей. Большая часть его расположена за Северным полярным кругом. Отложения четвертичного периода в его пределах представлены весьма неполно. В целом же период занимает особое место в геологической истории Земли. Он последний, самый короткий и еще не заверченный этап эволюции нашей планеты. Его выделение в качестве самостоятельной системы, несоизмеримой по своей продолжительности с остальными таксонами геологической шкалы, вполне очевидно оправдано тем, что в рамках этого отрезка геологического времени произошло становление человека как биологического вида и его превращение в один из факторов развития природной среды. Нижняя граница четвертичного периода, утвержденная Международной

стратиграфической комиссией (МСК) и Международным геологическим союзом, всегда проводилась и проводится в настоящее время, главным образом, на основе климатических, а не палеонтологических изменений, как это сделано для всех более древних геологических подразделений начиная с палеозоя. Поэтому до сих пор поступают предложения лишить четвертичный период самостоятельности и включить его в состав неогена.

В 1932 г. на международной конференции АИЧПЕ (INQUA) была принята новая схема расчленения четвертичной системы, и нижняя граница последней проведена по подошве калабрийских слоев Италии на уровне 1.8 млн лет. В СССР же официально нижняя граница системы помещалась в подошве бакинского яруса примерно на границе палеомагнитных эпох Брюнес – Матуяма (~0.7 млн лет). Позднее возраст этой границы был уточнен и составил около 780 тыс. лет. В России перешли к международной оценке возраста четвертичного периода. В 2008 г. на Международном геологическом конгрессе в Осло нижняя граница четвертичного периода была вновь понижена до 2.588 млн лет, причем сделано это по данным об изменении климата. В России новая схема до сих пор не принята.

В основу выделения периода В. А. Зубаков предлагает положить палеонтологический принцип: начало гоминазации, которое связывают с появлением двуногого хождения наших еще не известных первых предков [1]. Единственное материальное свидетельство этого начального этапа – цепочка из 50 отпечатков ног, похожих на следы человека, в местечке Летоли в Олдувайском ущелье в Танзании, оставленных существом, прошедшим по слою пепла, который датируется К-Аг-методом в 6.5 млн лет.

### Стратиграфия четвертичных отложений

В четвертичный период неоднократно развивались покровные оледенения, одним из центров которых являлись расположенные сравнительно недалеко от Кольского региона Скандинавские горы. Покровные ледники в основном ассимилировали рыхлый материал, лежащий на кристаллическом фундаменте, «стирая» тем самым полностью или частично следы предшествующих событий. Поэтому в рассматриваемом регионе обнаружены только относительно молодые четвертичные отложения.

#### Стратиграфия четвертичных отложений Кольского региона

МИС	Примерный возраст стадий, тыс. лет	Отложения
1	11	Континентальные отложения и <i>морские осадки побережий и шельфов</i>
2	11–24	Отложения ледникового парагенетического ряда
3	24–60	Континентальные осадки
4	60–71	Отложения ледникового парагенетического ряда
5a	71–85	<i>Отложения стрельнинской морской трансгрессии</i>
5b	85–93	Отложения ледникового парагенетического ряда
5c	93–106	Континентальные осадки
5d	106–115	Отложения не обнаружены
5e	115–130	<i>Отложения понойской (земской) морской трансгрессии</i> и торфяник
6	130–190	Отложения ледникового парагенетического ряда
7	190–244	<i>Отложения варзугской морской трансгрессии</i>

Стратиграфические схемы четвертичных отложений вследствие их фациального разнообразия трудно сопоставить друг с другом даже в пределах одного континента.

Еще бóльшие сложности возникают при сопоставлении схем расчленения отложений разных континентов. Поэтому после детального изучения морских отложений в четвертичной геологии стали все стратиграфические схемы привязывать к морским изотопным стадиям (МИС), выделенным по результатам изучения фораминифер и соотношения в них изотопов кислорода. Всего в четвертичном периоде выделено 103 стадии, некоторые из них делятся на подстадии. Четвертичные отложения Кольского региона можно более или менее обоснованно отнести только к последним 7 стадиям (табл.).

Таблица нуждается в кратких комментариях. Прежде всего, следует отметить, что в периоды всех морских трансгрессий формировались и различные типы континентальных отложений, но обнаружены только некоторые из них и далеко не во все периоды. Кроме того, во все периоды, когда регион не был хотя бы частично покрыт ледником, на остальной площади тоже формировались континентальные отложения, а также прибрежно-морские и шельфовые осадки. Вследствие недостаточно детальной изученности региона этот тип четвертичных отложений надежно диагностирован исключительно редко как в континентальной части региона, так и на шельфах. Значительно более полные сведения о четвертичных отложениях получены в соседних скандинавских странах, где для их изучения целенаправленно проходило много скважин и, кроме того, широко использовались экскаваторы. На севере Норвегии, например, экскаватором вскрыт разрез, в котором представлены образования всего четвертичного периода [2]. Далее кратко рассмотрим основные сведения об отложениях региона, соотносимых с семьей МИС.

**МИС 7.** Отложения варзугской морской трансгрессии по результатам датирования раковин морских моллюсков методом электронного парамагнитного резонанса, составившим  $316.0 \pm 23.6$ ,  $319 \pm 22.7$ ,  $318.0 \pm 38.5$  тыс. лет, помещены в соответствующую этому возрасту МИС 9 [3]. Однако датировки, выполненные любыми методами, не абсолютны. В соседних странах – Финляндии и Швеции – самое древнее межледниковье отнесено к МИС 7; более древние межледниковые отложения там не выявлены. По мнению автора, датировки удревлены: вмещающие их отложения сформировались в МИС 7. Палинолог Я. К. Еловичева впервые в 1981 г. заключила, что «... возраст рассматриваемой толщи не моложе среднеплейстоценового» [4]. Позднее, в личном сообщении 2012 г., Я. К. Еловичева отметила, что «варзугская флора значительно обеднена по сравнению с типично лихвинской. Вполне допустимо поэтому, что распространение мощных фаз темно- и светлохвойных пород с участием лиственных теплолюбивых в максимум тепла имело место в другую, более молодую межледниковую эпоху», то есть в МИС 7.

**МИС 6.** Отложения ледникового парагенетического ряда этого оледенения встречены в восточной части Кольского п-ова непосредственно под морскими отложениями микулинского межледниковья. В кутовой части Святоносского залива обнаружены ледниково-морские осадки [5], в нижнем течении р. Чапомы – морской диамиктон [6]. Кроме того, к морскому диамиктону, вероятно, следует отнести галечно-валунные отложения в песчано-глинистой массе, вскрытые в основании разреза морских межледниковых осадков на левом берегу р. Поной против бывшего с. Поной, и супеси с галькой и валунами, подстилающие морские осадки микулинского межледниковья в бассейне р. Малой Качковки. В западной части региона к рассматриваемому оледенению относится третий сверху горизонт морены мощностью 25.5 м, обнаруженный в борту карьера на западной окраине г. Заполярного [7].

**МИС 5е.** Отложения земского (микулинского) межледниковья широко распространены на территории Евразии как на морских побережьях, так и во внутренних районах и являются хорошим стратиграфическим репером. В Кольском регионе морские отложения этого межледниковья (понойской трансгрессии) исследованы в нескольких пунктах побережья Белого и Баренцева морей, а континентальные образования в виде торфяника обнаружены в северных предгорьях Ловозерского горного сооружения. Подробная библиография об отложениях приведена в монографии автора [8].

**МИС 5d.** Отложения стадияльного похолодания, отвечающие по возрасту подстадии 5d, не установлены в Кольском регионе. На сопредельной с Россией территории Финляндии, в районе карбонатитового массива Сокли, скважиной вскрыты пески и глины, перекрывающие осадки эемского (тепсанкумпу) межледниковья. Они отнесены к стадиялу хернинг, поскольку, судя по палинологическим данным, формировались в зоне тундры в суровых климатических условиях [9].

**МИС 5с.** Отложения данного межстадияльного потепления в Финляндии, в районе массива Сокли представлены гиттией, сформировавшейся в довольно благоприятной климатической обстановке, в период господства на окружающей территории березовых лесов [8]. В Кольском регионе к этому межстадиялу предположительно можно отнести пески, подстилающие второй сверху горизонт морены в разрезе 274-го горизонта рудника «Железный» [10].

**МИС 5в.** К этому стадияльному похолоданию предположительно относятся отложения ледникового парагенетического ряда, подстилающие в ряде разрезов осадки стрельнинской морской трансгрессии на Терском побережье Кольского п-ова.

**МИС 5а.** Осадки стрельнинской морской трансгрессии детально изучены в ряде разрезов на побережье Кольского полуострова [8].

**МИС 4.** Ледниковые отложения этой стадии встречены только в карьере в окрестностях г. Ковдора. Подробности об оледенении в МИС 4 приведены в статье автора и С. Б. Николаевой [11].

**МИС 3.** К этой стадии отнесены супеси или суглинки и маломощный горизонт торфа, залегающие на морене предшествующей стадии под мореной поздневалдайского оледенения в упомянутом выше Ковдорском карьере. Они хорошо сопоставляются по геологическому положению и палинологическим данным с отложениями межстадиала 3 в северной Финляндии, обнаруженными примерно в 50 км к северо-западу от Ковдора [9].

**МИС 2.** Эта стадия рассматривается без детализации позднего плейстоцена, приведенной в [8]. Отложения ледникового парагенетического ряда – морена, флювиогляциальные, озерно-ледниковые и ледниково-морские осадки образуют почти сплошной покров на всей территории региона, исключая северо-восток. Отсутствие ледниковых отложений на северо-востоке объясняется, вероятно, примерзанием ледника к ложу в соответствии с моделью, предложенной Ё. Клеманом и К. Хётгестрандом [12].

**МИС 1.** Различные типы континентальных отложений, морские осадки побережий и шельфа региона.

## Тектоника

В периоды покровных оледенений огромные массы воды изымались из Мирового океана и аккумулировались в виде льда на существенно меньших, чем океан, площадях. Поэтому ледники достигали мощности в несколько километров. Под их нагрузкой прогибалась земная кора, а в процессе стаивания ледников происходило гляциоизостатическое поднятие территории. Наибольшим оно было там, где лед имел максимальную мощность (рис. 1).

Судя по наиболее высокому гипсометрическому положению межледниковых отложений понойской трансгрессии (МИС 5е) в восточной части Кольского региона, можно предполагать, что предшествующее оледенение, имевшее место в МИС 6, распространялось как из Скандинавского, так и из Новоземельско-Карского центра. Во время оледенений, охватывающих всю или большую часть Кольского региона, современные прибрежные районы под влиянием ледниковой нагрузки опускались ниже уровня океана во время каждого из оледенений [13]. Поэтому в периоды дегляциации территории проявлялись морские трансгрессии. Соответственно, в стратиграфической таблице вполне закономерно за отложениями ледникового парагенетического ряда следуют отложения морских трансгрессий.

Что касается тектонических последствий поздневалдайского оледенения, они впервые восстановлены В. Рамзаем [14] по высотному положению флювиогляциальных

дельт вблизи краевой зоны ледника. Впоследствии реконструкции гляциоизостатического поднятия уделили внимание М. А. Лаврова [15] и Б. И. Кошечкин [16]. Наиболее надежные данные о поднятии получены в конце прошлого и начале этого столетия российскими, норвежскими и американскими исследователями. Изучались осадки озер прибрежно-морской зоны, расположенных в полосе между верхней морской границей и современным уровнем моря. Диагностировались озерные и морские осадки, радиоуглеродным методом датировались отложения переходных зон. В итоге строились графики перемещения береговой линии моря, а затем проводились изобазы поднятия (рис. 2).

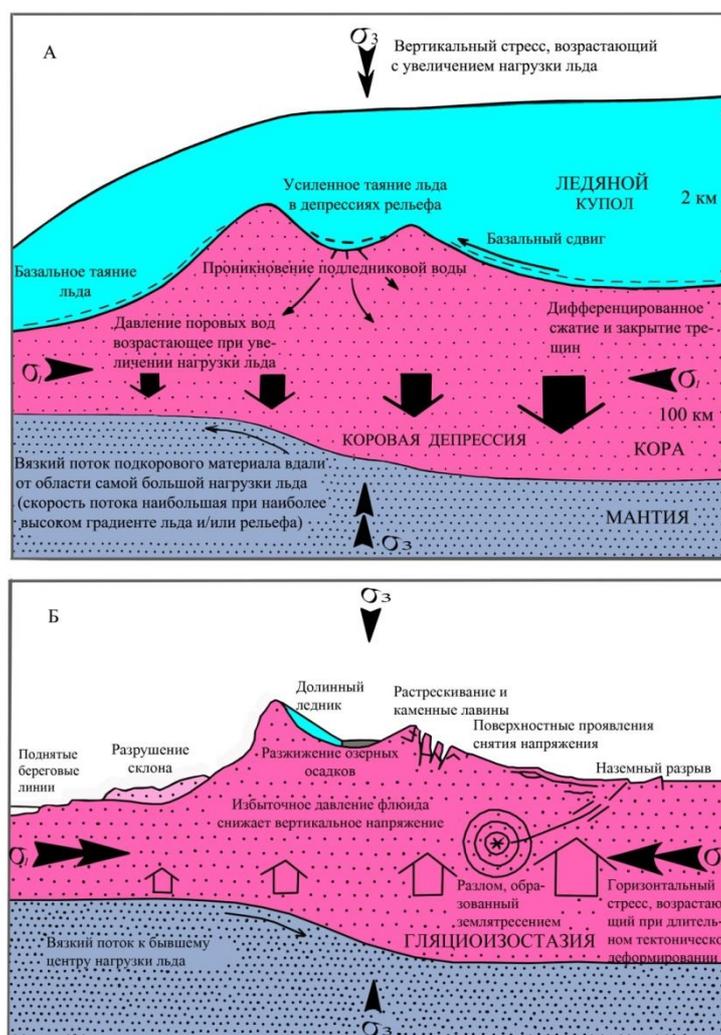


Рис. 1. Общая схема реакции земной коры на оледенение и дегляциацию, по [17]

Анализ схемы показывает, что поднятие имело куполообразную форму и что западная часть региона поднималась интенсивнее восточной. Эта тенденция сохранялась на протяжении конца позднего плейстоцена – голоцена на фоне прогрессирующего уменьшения скорости поднятия во времени. Обращает на себя внимание огибание изобазы района Кандалакшского залива Белого моря, установленное впервые В. Рамзаем [14].

Судя по врезке, представляющей собой фрагмент схемы современного поднятия всей области распространения последнего Скандинавского покровного оледенения [18], конфигурация изобаз, несмотря на уменьшение скорости поднятия, существенно не изменилась вплоть до настоящего времени. Это обстоятельство, вероятно, говорит о том, что

гляциоизостазия проявляется до сих пор. В пользу сделанного предположения свидетельствуют и геологические материалы и теоретические расчеты. Есть основание полагать, что рассматриваемая территория должна быть поднята ещё примерно на 40–60 м: на отрицательных отметках в –40–60 м располагаются устьевые участки погребенных речных долин, сформировавшиеся, видимо, в плиоцене [19]. Их современное положение, скорее всего, обусловлено тем, что в течение четвертичного периода за сравнительно короткие промежутки межледниковий не успевало произойти восстановление изостатического равновесия, поскольку постоянная релаксации, вычисленная В. Н. Глазевым и А. Б. Раевским [20], составляет  $(45 \pm 6) 10^3$  лет, что значительно превышает практически общепринятое её значение в  $(5–8) 10^3$  лет. Из изложенного следует, что гляциоизостатическое поднятие охватило всю территорию региона и амплитуда его на значительной площади была достаточно высокой. По данным В. Рамзая [14], амплитуда в районе наибольшего поднятия превышала 150 м.

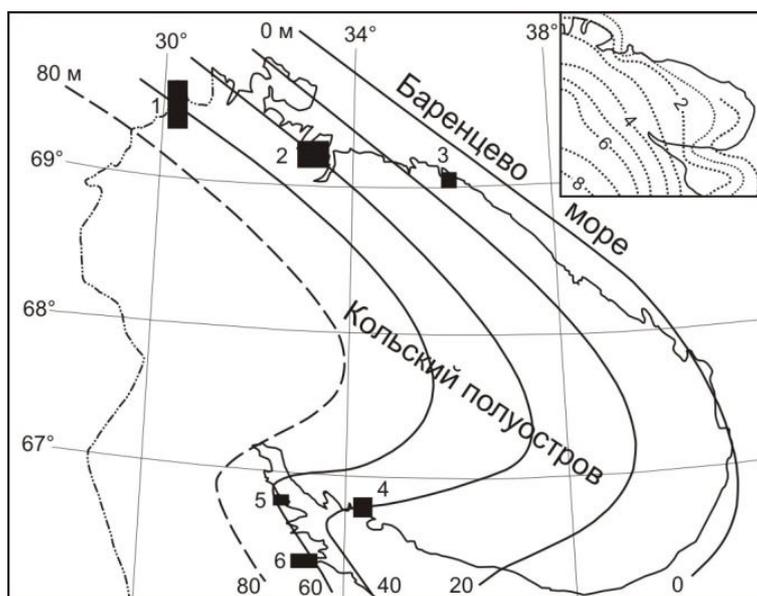


Рис. 2. Схема изобаз поднятия за последние 9 тыс. лет и расположения обследованных участков 1–5, по [21].  
На врезке – современное поднятие Кольского региона в мм/год по [18]

Собственно тектонические перемещения в регионе, расположенном на одной из литосферных плит, обусловлено подвижностью отдельных блоков плиты. Они тоже происходили и до четвертичного периода, а также во все межледниковые интервалы и оледенения четвертичного периода.

Конкретные данные по перемещению блоков в четвертичное время имеются только по последним 10–12 тысячам лет, т. е. по заключительному периоду деградации поздневалдайского оледенения и послеледниковью. По геологическим и геоморфологическим данным установлено, что массивы Ловозерских и Хибинских тундр поднимаются в послеледниковое время [22–24 и др.]. Образование Колвицкого и углубление Кандалакшского грабенов произошло вследствие противоположной направленности вращения Кольского и Карельского массивов [25]: реализации модели «трансформных разломов и вращения блоков» [26]. Переход от режима рифтогенной дивергенции к трансформному режиму, вероятно, произошел в начале голоцена [25].

В новейшее время происходили сдвиги по субмеридиональным разломам. Д. С. Зыков установил наличие право- и левосторонних сдвигов в восточной половине побережья Мурмана [27]. Правосторонние сдвиги по субмеридиональным разломам в районе Кольского залива описали Е. А. Ковальчук и Э. В. Шипилов [28]. Один из таких разломов ограничивает северное колено

Кольского залива с востока. Этот разлом прослеживается и южнее в районе озер Домашнего, Щукозера и далее к югу. Его местоположение показано на рис. 3А. На морфологические признаки перемещения по разлому указывают стрелки на рис. 3Б. Наиболее убедительным из признаков является субмеридионально вытянутое углубление в средней части губы Средней (стрелка 1). Оно могло сохраниться только в случае формирования после позднего дриаса, поскольку во время дриаса имела место морская трансгрессия [29], во время которой талые ледниковые воды поставляли в водоём большое количество обломочного материала, и упомянутое углубление было бы неизбежно заполнено осадками.

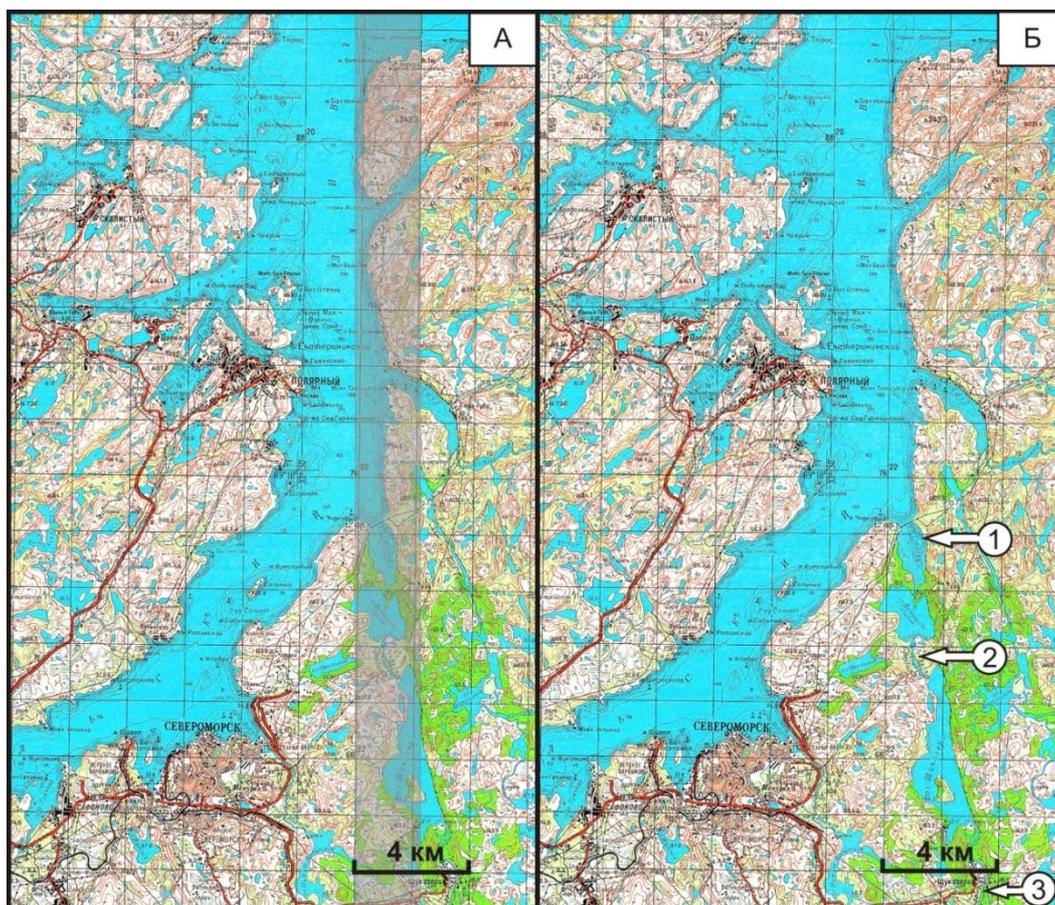


Рис. 3. Местоположение разлома, ограничивающего северное колено Кольского залива с востока (А) и морфологические показатели новейших перемещений по нему (Б). Рисунки 3 и 4 составлены на основе фрагментов карт масштаба 1:100000

Не исключено, что в голоцене активизировались и разломы северо-восточного простирания. Вероятным свидетельством этого является прямолинейное, протяженное и достаточно глубокое продолжение р. Туломы в пределах Кольского залива. Разлом протягивается вдоль долины р. Туломы и частично заходит в залив (рис. 4А и Б).

Степень влияния упомянутых сдвигов, которые могли иметь и вертикальную составляющую, на конфигурацию изобаз гляциоизостатического поднятия до сих пор не установлена. Следует отметить, что в целом новейшие тектонические перемещения отдельных блоков плиты изучены недостаточно и предстоит еще большая и очень сложная работа по их выявлению в регионе.

Заслуживают пристального внимания и сеймотектонические проявления. Согласно общей модели Л. С. Стюарта с соавторами (рис. 1) напряжения в земной коре при оледенении

и дегляциации и адекватные им сейсмодетформации должны проявляться в регионе столь же многократно, как и оледенения. Два обстоятельства затрудняют выявление более ранних, чем поздне- и послеледниковые деформации: трудность определения возраста деформаций в тех районах, которые не перекрыты четвертичными отложениями, и трудность выявления деформаций в районах распространения четвертичных отложений.

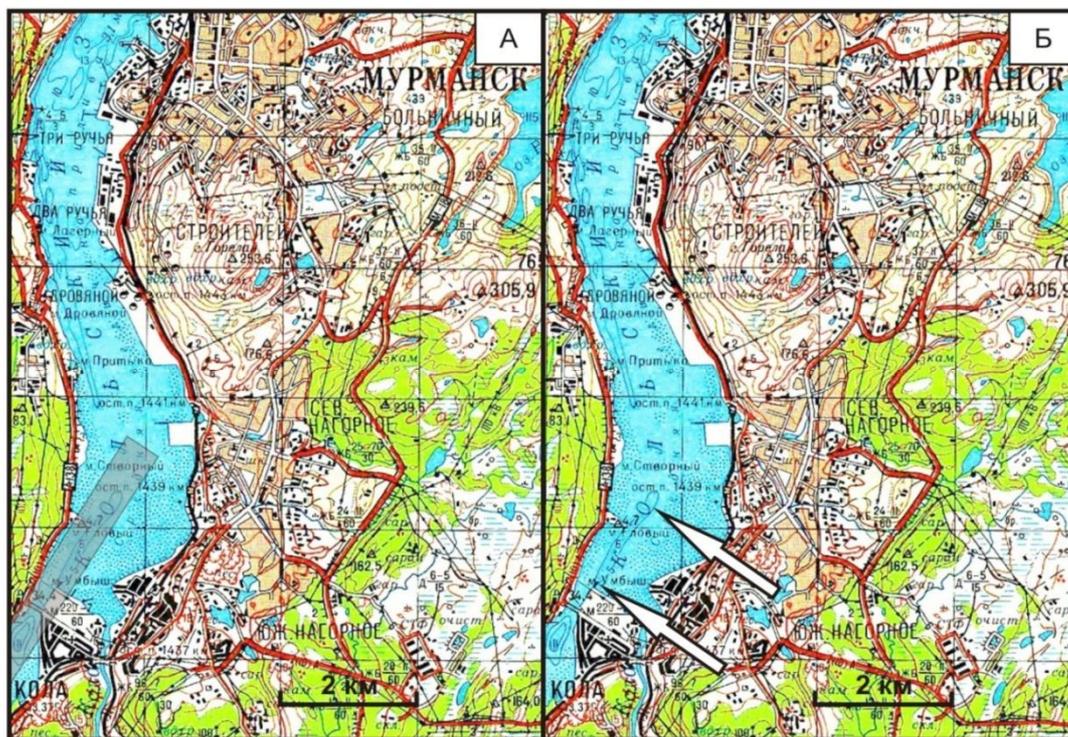


Рис. 4. Местоположение разлома, протягивающегося вдоль долины р. Туломы и продолжающегося в пределах южной части Кольского залива (А), и морфологический показатель новейших перемещений по нему (Б)

К настоящему времени в Фенноскандии обнаружен только один вероятный след доледникового землетрясения [30]. На южном побережье Кольского п-ова, где мощность ледниковых отложений составляет 7–10 м, в буровых скважинах, обсаженных до 10–15 м, происходит синхронное перемещение воздуха при изменении атмосферного давления. Скважины, в которых наблюдался воздухообмен, приурочены к тектонической зоне северо-западного простирания. Воздухообмен связан с линейно вытянутой зоной пород повышенной пористости, протяженность которой оценена в 20–25 км [31]. Разуплотнение пород – характерное следствие сильных землетрясений. Следовательно, есть вероятность того, что проницаемая зона возникла в результате сильного землетрясения, которое произошло до последнего оледенения, поскольку заметных нарушений на поверхности не обнаружено.

Более поздние нарушения позднего плейстоцена и голоцена в кристаллических породах и в рыхлых отложениях, обладающие явными сейсмогенными признаками, подробно рассмотрены в [32–36]. Сведения о современных землетрясениях обобщены в [37]. Наиболее сильные землетрясения, иногда с катастрофическими последствиями [38], приурочены к узлам пересечения тектонических зон различных направлений. Как показывают современные исследования, сеймотектонические проявления обусловлены и гляциоизостазией, и внутриплитными перемещениями отдельных блоков земной коры.

## Заключение

В четвертичном периоде доминирующий фактор гипергенеза – климат. Его изменения

обусловили периодическую смену двух резко отличных направлений гипергенеза: ледового и умеренно гумидного (межледникового). Покровные оледенения в этот период развивались многократно. Поскольку Кольский регион расположен в непосредственной близости к Скандинавскому центру оледенения и на сравнительно небольшом расстоянии центров оледенения от Новоземельско – Карского, можно полагать, что все оледенения четвертичного времени частично или полностью покрывали его территорию. Ледники производили большую геологическую работу, в основном по ассимиляции ранее сформированных рыхлых образований. Главным образом, поэтому столь невелика и неполна геологическая летопись четвертичного периода в регионе. Здесь и в непосредственной близости к региону обнаружены ледниковые, межледниковые, стадийные и межстадийные отложения лишь семи самых молодых «морских изотопных стадий» (МИС) из 103 МИС, охватывающих весь четвертичный период.

В регионе проявлялись как гляциоизостатические, так и тектонические движения. Все гляциоизостатические движения были одновекторными: всегда по мере освобождения территории ото льда происходило только поднятие поверхности, скорость которого убывала во времени. Изучено более или менее детально поднятие, происходившее в процессе и после дегляциации Кольского региона в завершающий период МИС 2 и в МИС 1. Оно имеет куполообразную форму и продолжается до сих пор в связи с тем, что значение постоянной релаксации превосходит время, прошедшее от начального этапа отступления поздневалдайского ледникового покрова до настоящего времени.

Сами по себе тектонические движения гораздо разнообразнее. Это и поднятия (главным образом Ловозерского и Хибинского массивов) и опускания (образование Колвицкого грабена и частичное погружение Кандалакшского при вращении блоков плиты) и практически горизонтальные сдвиги. Площадь распространения собственно тектонических перемещений внутриплитных блоков не установлена. Однако с большой долей вероятности можно предполагать, что ими охвачен либо весь Кольский регион, либо значительная его часть.

И гляциоизостатические, и собственно тектонические перемещения вызывают напряжения в земной коре, которые приводили и приводят к землетрясениям, в том числе и катастрофическим. Наиболее сильные из землетрясений оставили специфические следы в рельефе и позднеплейстоцен-голоценовых осадках. Выделение сеймотектонических зон и определение периодичности сильных землетрясений имеют большое экологическое значение. Над решением этой труднейшей задачи работает, к сожалению, ограниченный круг исследователей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубаков В. А.* «Проблема квартера» и таксономический статус позднего кайнозоя в международной стратиграфической шкале // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. Т. 19, № 1. С. 108–125.
2. Quaternary glacial, interglacial and interstadial deposits of Norway and adjacent onshore and offshore areas / *L. Olsen, H. Svein, D. Ottesen and L. Rise*; L. Olsen, O. Fredin and O. Olesen (eds.) // Quaternary Geology of Norway, Geological Survey of Norway Special Publication. 2013. 13. P. 79–144.
3. *Корсакова О. П., Семенова Л. П., Колька В. В.* Средне- и верхнеплейстоценовые осадки в разрезе обнажения Варзуга (юг Кольского полуострова) // Региональная геология и металлогения. 2011. № 48. С. 19–24.
4. Стратиграфия плейстоценовых отложений южной части Кольского полуострова / *В. Я. Евзеров и др.* // Геология плейстоцена северо-запада СССР. Апатиты: Изд. КФАН СССР, 1981. С. 97–107.
5. *Корсакова О. П., Колька В. В.* Плейстоценовые осадки на северо-востоке Кольского полуострова (корреляция геологических и геохронологических данных по разрезу в вершине Святоносского залива Баренцева моря) // Тезисы докладов научной конференции «Россия в МПГ – первые результаты». 3–9 октября 2007 г. (г. Сочи). Сочи, 2007. С. 94.
6. Микулинское межледниковье на юго-востоке Кольского полуострова / *М. К. Граев и др.* // Основные проблемы геоморфологии и стратиграфии антропогена Кольского полуострова. Л.: Наука, 1969. С. 25–56.
7. *Евзеров В. Я., Кошечкин Б. И.* Палеогеография плейстоцена западной части Кольского полуострова. Л.: Наука, 1980. 105 с.
8. *Евзеров В. Я.* Минералогия рыхлого покрова северо-восточной части Балтийского щита. Мурманск: МГТУ, 2014а. 255 с.
9. The Last Interglacial-Glacial cycle in NE Fennoscandia: a nearly continuous record from Sokli (Finnish Lapland) / *K. F. Helmens, M. E. Räsänen, P. W. Jochansson, H. Junger, K. Korjonen* // Quaternary Science Reviews. 2000. N 19. P. 1605–1623.
10. *Арманд А. Д.* Рельеф и стратиграфия антропогеновых отложений юго-западной части Кольского полуострова // Научный отчет. НА КНЦ РАН, ф.2, оп. 17, д. № 84. Л. 1–162. Апатиты, 1967.
11. *Евзеров В. Я., Николаева С. Б.* Ледниковый покров на территории Кольского региона в морскую изотопную стадию (МИС) 4 // Доклады РАН. 2011. Т. 441, № 3. С. 391–394.
12. *Kleman J., Hätttestrand C.* Frozen-bed Fennoscandian and Laurentide ice sheets during the Last Glacial

Maximum // Nature. 1999. Vol. 402, № 4. P. 63–66. **13. Евзеров В. Я.** Оледенения и морские трансгрессии на северо-западе России в последние 140 тысяч лет // Геоморфология. 2014. № 3. С. 51–62. **14. Ramsay W.** Über die Geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quartarzeit // Fennia, Helsingfors. 1898. Vol. 16, № 1. 151 s. **15. Лаврова М. А.** Четвертичная геология Кольского полуострова. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1960. 234 с. **16. Кошечкин Б. И.** Голоценовая тектоника восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1979. 158 с. **17. Stewart L. S., Sauber J., Rose J.** Glacio-seismotectonics: ice sheets, crustal deformation and seismicity // Quaternary Science Reviews. 2000. 19. P. 1367–1389. **18. Andersen B. G., Borns H. W.** The Ice Age World // Scandinavian University Press. Oslo, 1994. 208 p. **19. Никонов А. А.** О древнейших долинах северо-восточной части Балтийского щита // ДАН СССР. 1967. Т. 177, № 5. С. 1155–1158. **20. Глазнев В. Н., Раевский А. Б.** Геодинамические аспекты плотностной модели земной коры северо-востока Балтийского щита // Геофизические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. Апатиты, 1962. С. 75–83. **21.** Послеледниковые гляциоизостатические поднятия на северо-востоке Балтийского щита / В. В. Колька и др. // Новые данные по геол. и полезным ископаемым Кольского полуострова. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2005. С. 15–25. **22. Граев М. К., Евзеров В. Я.** Новейшие и современные тектонические движения в центральной части Кольского полуострова // Современные движения земной коры. 1963. № 1. С. 326–333. **23. Рихтер Г. Д.** Физико-географический очерк озера Имандра и его бассейна. М.; Л.: Гостехиздат, 1934. 144 с. **24. Арманд А. Д.** Развитие рельефа Хибин и Прихибинской равнины. Деп. ВИНТИ № 32-64. Апатиты, 1965. 244 с. **25. Евзеров В. Я., Виноградов А. Н., Николаева С. Б.** Геодинамика Беломорской котловины в голоцене // Вестник КНЦ РАН. 2014. № 2. С. 50–57. **26. Зыков Д. С., Колодяжный С. Ю., Балуев А. С.** Признаки горизонтальной неотектонической подвижности фундамента в районе Беломорья // Бюллетень МОИП, Отд. геол. Т. 83, вып. 2. С. 15–25. **27. Зыков Д. С.** Геоморфологические признаки проявления горизонтальной компоненты неотектонических движений вдоль границы Балтийского щита и Западно-Арктической платформы (Мурманская область) // Геоморфология. 2015. № 3. С. 27–38. **28. Ковальчук Е. А., Шипилов Э. В.** Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д. Г. Панова. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 157–160. **29. Евзеров В. Я.** Позднеплейстоцен-голоценовые трансгрессии на побережьях Мурмана и Белого моря // Геоморфология. 2012. № 4. С. 53–64. **30. Евзеров В. Я.** Вероятный след сильного древнего землетрясения // Тетта. 2015. № 32. С. 8. **31.** Эффект «подземного ветра» на Кольском полуострове / С. В. Икорский и др. // Тетта. 2014. № 2(28). С. 7–11. **32. Николаева С. Б.** Следы разрушительных землетрясений в окрестностях города Мурманска (по историческим и палеосейсмогеологическим данным) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 52–61. **33. Николаева С. Б.** Свидетельства сейсмических событий на побережье Мурмана в позднеледниковье и голоцене (северо-восток Балтийского щита) // Известия РГО. 2013. Т. 145, вып. 4. С. 53–65. **34. Николаева С. Б.** Сейсмичность в позднеплейстоцен-голоценовых осадках северо-запада Кольского региона (северная часть Балтийского щита) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 7. С. 830–839. **35. Yevzerov V. Ya., Nikolaeva S.B.** Cenozoic // Geology of the Kola Peninsula (Baltic shield). Apatity, 1995. P. 107–115. **36. Николаева С. Б., Евзеров В. Я.** Сейсмоопасные зоны Кольского полуострова (экологические аспекты) // Перспективные информационные технологии и проблемы управления рисками на пороге нового тысячелетия: мат-лы докл. Т. 1, ч. 2. СПб., 2000. С. 568–571. **37.** Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным / С. В. Баранов и др. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: мат-лы VI Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 47–51. **38. Евзеров В. Я.** Ужасное событие, случившееся в 1888 году в селе Кашкаранцы // Природа. 2014. № 5. С. 74–77.

### Сведения об авторе

*Евзеров Владимир Яковлевич* – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Геологического института Кольского научного центра РАН;  
e-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

### Information about the author

*Vladimir Y. Evzerov* – Dr. Sci. (Geol.), leading scientific researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS;  
e-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

### Библиографическое описание статьи

*В. Я. Евзеров* Четвертичный период в Кольском регионе (вопросы стратиграфии и тектоники) / *В. Я. Евзеров* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 3–14.

### Bibliographic Description

*Vladimir Y. Evzerov.* Quaternary Period in the Kola Region (Issues of Stratigraphy and Tectonics). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016, vol. 1, pp. 3–14.

УДК 551.24.035, 622.271

**ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД В ЦЕЛЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ НА ПРИМЕРЕ КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ И АПАТИТОВЫХ РУД. ЧАСТЬ 1\***

Д. В. Жиров<sup>1</sup>, Г. С. Мелихова<sup>2</sup>, В. В. Рыбин<sup>3</sup>, В. А. Сохарев<sup>4</sup>, С. А. Климов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ОАО «Мурманская геологоразведочная экспедиция»

<sup>3</sup>ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

<sup>4</sup>АО «Ковдорский ГОК»

**Аннотация**

В первой части статьи рассмотрены особенности инженерно-геологических и геомеханических исследований массива пород месторождения при разработке и эксплуатации глубоких карьеров, а также основные черты разрывной тектоники Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд (карьера рудника Железный). Выделены и описаны главные факторы опасности для устойчивости глубоких карьеров. Выполненные междисциплинарные исследования позволили определить и протестировать комплекс инженерно-геологических и геомеханических исследований, а также мероприятий по мониторингу геологической обстановки в целях проектирования и безопасной эксплуатации глубоких карьеров. Потенциальные риски нарушения устойчивости и целостности уступов и борта карьера значительно снижаются за счет достижения принципиально лучшего, по сравнению с традиционным подходом, уровня информативности, детальности, точности и достоверности данных об инженерно-геологических, геомеханических и структурных параметрах во всем объеме приконтурного массива пород, вовлеченного в процесс проектирования. Это позволяет обоснованно и дифференцированно формировать конструкцию всех участков борта карьера с учетом их индивидуальных особенностей.

**Ключевые слова:**

*глубокие карьеры, перепроектирование, геомеханический, поле напряжений, инженерный, месторождение, разломы, трещиноватость.*

**PECULIARITIES OF THE ENGINEERING-GEOLOGICAL STUDIES OF ROCK MASSIFS FOR DESIGNING / REDESIGNING DEEP OPEN PITS EXEMPLIFIED WITH THE KOVDOR DEPOSIT OF MAGNETITE AND APATITE ORES (KOVDOR ALKALINE-ULTRABASIC MASSIF, NE OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD). PART 1**

Dmitry V. Zhiron<sup>1</sup>, Galina S. Melikhova<sup>2</sup>, Vadim V. Rybin<sup>3</sup>, Victor A. Soharev<sup>4</sup>, Sergey A. Klimov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>“MGRE” Stock Company

<sup>3</sup>Mining Institute of the KSC RAS

<sup>4</sup>“Kovdorsky GOK” Stock Company

**Abstract**

The first part of this paper considers particularities of geotechnical and geomechanical surveys of the deposit rock bodies in order to design and mine deep quarries, as well as main features of the Kovdor deposit fault tectonics of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit (Kovdor ultramafic-alkaline intrusion, NE of the Fennoscandian shield). The significant principal

\* Исследования выполнены в рамках темы НИР № 0231-2015-0013.

factors of dangers for stability of deep open pits were singled out and described. Interdisciplinary studies at the Zhelezny Mine of the Kovdor deposit have allowed designing and successive testing a complex geotechnical and geomechanical research method, as well as monitoring the geological setting in order to design and operate deep open pits. Potential risks of disturbing the stability and integrity of the open pit design can be reduced significantly by achieving a principally better level of detail, accuracy, information content and reliability of data on geotechnical, geomechanical and structural parameters in the whole bulk of the peripheral rock mass involved into the designing process as compared to the conventional approach. This allows for rational and differentiated creating the design of the open pit walls taking all their individual features into account.

**Keywords:**

*deep open pits, redesign, geomechanical, stress field, engineering, faults, deposit, fissuring.*

**Введение**

Современное состояние дел с невозобновляемыми минеральными ресурсами характеризуется несколькими негативными тенденциями, среди которых наиболее важными считаются: истощение сырьевой базы, ухудшение (деградация) горнотехнических и геологических условий добычи, а также резкий рост её ресурсоемкости (удельных расходов энергии, материалов, оборудования, финансов и др.).

Как известно, уровень добычи большинства полезных ископаемых обеспечивают преимущественно крупные и уникальные месторождения. Так, всего две сотни из нескольких десятков тысяч известных в России месторождений дают вклад более 65 % от общих запасов и более 85 % от годового выпуска [1]. Однако в отечественной горной промышленности к началу 2000-х гг. наметилась проблема, связанная с исчерпанием запасов по действующим проектам и истощением наиболее богатой и рентабельной приповерхностной части месторождений. Эти же тенденции характерны и в масштабе всего мира. Число месторождений мирового класса ограничено, и, как показывает практика, для компенсации погашенных запасов на одном из них необходимо разведать и ввести в строй несколько средних-малых сырьевых объектов, освоение которых требует в расчете на удельные показатели (тонну подготовленных запасов, тонну извлекаемого полезного ископаемого и т. п.) гораздо больших инвестиций и других видов ресурсов.

Для многих развитых горнопромышленных регионов, в том числе для Кольского региона России (СВ Фенноскандинавского щита), социально-экономическое состояние и будущее развитие напрямую зависят от возможности эффективной отработки глубоких горизонтов месторождений-гигантов. Необходимо отметить, что практически всегда геологические запасы крупных месторождений значительно превышают извлекаемые запасы по действующим проектам, поэтому по мере приближения горных работ к конечному контуру карьера остро встает вопрос выбора наиболее рационального и эффективного способа дальнейшего развития рудника с учетом обеспечения требуемого уровня безопасности [2] (рис. 1).

Переход на подземный способ добычи (вариант С) требует заблаговременного инвестирования значительных средств на весьма длительный срок (годы – первые десятки лет) в подготовительную горно-капитальную инфраструктуру. Чаще всего, это хороший вариант для месторождений высоколиквидных полезных ископаемых с высокой удельной стоимостью руды и её компактным залеганием. Однако в реальной жизни вопрос о дальнейшей судьбе месторождения возникает, как правило, внезапно, в наименее благоприятный период.

Проектирование нового карьера за счет разноски бортов с сохранением нормативных значений их среднего угла наклона (вариант В) – также весьма затратный путь по материальным и трудовым ресурсам. При этом значительно увеличивающийся коэффициент вскрыши часто выводит экономику проекта за пределы окупаемости.

Вариант D предусматривает оптимизацию бортов карьера с обоснованием максимально возможных углов уступов и бортов [3]. Последний вариант экономически и технологически наиболее привлекателен, так как позволяет проводить его реализацию постепенно, без остановки

добычи и кардинальной перестройки режима эксплуатации и инфраструктуры рудника. Однако он требует упреждающей детальной проработки целого комплекса вопросов и проблем с целью обоснования предельных параметров бортов карьера. При этом необходимо обеспечить надежный уровень безопасности и защиты от проявлений опасных геолого-геофизических явлений и процессов. Это предопределяет необходимость проведения предварительных инженерно-геологических и геомеханических изысканий, результаты которых должны стать базой для проектирования экономически эффективного и безопасного глубокого карьера.

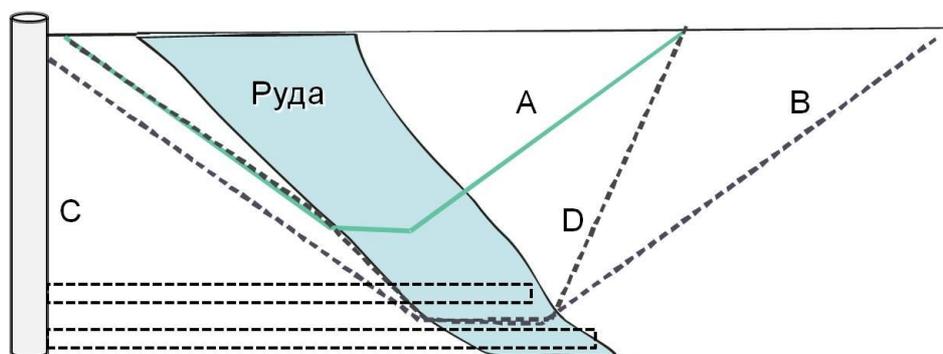


Рис. 1. Схема вариантов освоения глубоких горизонтов крупных месторождений:

А – проектный контур действующего карьера; В – вариант проектного контура глубокого карьера за счет разности бортов (нормативные значения средних углов бортов с запасом прочности); С – вариант строительства подземного рудника; D – вариант проектного контура глубокого карьера с максимальными углами устойчивых бортов

Настоящая работа посвящена научно-методическим и технологическим аспектам проведения упреждающих инженерно-геологических и геомеханических изысканий в целях проектирования / перепроектирования глубоких карьеров с обеспечением требуемого уровня безопасности.

### **Особенности инженерно-геологических и геомеханических исследований массива пород месторождения в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров**

Очевидно, что условия эксплуатации карьеров обычной глубины (до 250–300 м) и глубоких / сверхглубоких карьеров (от 250–300 до 1 тыс. и более метров от поверхности) принципиально различаются. Однако вопросы, учитывающие специфику и особенности инженерно-геологических изысканий в целях надежного обоснования проекта и безопасной эксплуатации глубоких горизонтов месторождения карьером, методически пока ещё недостаточно проработаны. Требования к изучению не делают разницы между карьерами различной глубины [4–9]. В настоящей статье частично восполняется этот пробел: приводится сравнительное сопоставление основных факторов, определяющих горнотехнические условия эксплуатации обычных и глубоких карьеров в скальных породах в пределах Фенноскандинавского щита (табл. 1). Исследование выполнено по опыту реализации аналогичных проектов и по результатам опросов экспертов [10].

При оценке значимости факторов приняты следующие аргументы и граничные условия:

1) за время отработки приповерхностной части месторождения (первых очередей проекта) его гидрогеологические условия и основные физико-механические свойства пород должны быть детально изучены, а негативные проблемы, связанные с ними, в большинстве своем решены (дренаж, водоотведение, укрепление рыхлых и слабосвязанных пород и т. п.). Увеличение глубины карьера практически не сказывается на гидрогеологическом режиме, так как водопритоки за счет трещинных вод (в скальных породах) на 2–3 порядка меньше таковых за счет поверхностных вод и атмосферных осадков. В условиях Фенноскандинавского щита

мощность рыхлых отложений, к которым приурочены водоносные горизонты, в большинстве случаев варьирует в пределах 0–100 м;

2) значения большинства физико-механических свойств (пределы прочности, удельный и объемный вес, модули Юнга и Пуассона и др.) с глубиной имеют тенденцию к некоторому возрастанию и стабилизации (уменьшению размаха/вариабельности). Соответственно, данный фактор становится более предсказуемым и управляемым;

Таблица 1

Сопоставление и ранжирование значимости инженерно-геологических и геомеханических факторов для отработки приповерхностных и глубоких горизонтов месторождений карьерным полем, по [10] с изменениями

Наименование фактора	Значимость для отработки приповерхностной части месторождения, %	Значимость для отработки глубоких горизонтов месторождения, %
Поле напряжений (тектоническая составляющая)	15	20
Поле напряжений (гравитационная составляющая)	5	10
Разрывная тектоника, трещиноватость, контакты и другие структурные неоднородности	20	35
Выветривание и гипергенез	15	5
Гидрогеологический режим	25	15
Физико-механические свойства	15	10
Другие факторы, процессы и явления	5	5
СУММА:	100	100

3) контакты и контрастные зоны изменений (метасоматических и контактово-метаморфических) горных пород, как правило, хорошо изучены ещё на стадии разведки, и поэтому они могут быть адекватно учтены в новом проекте. Однако опасные для устойчивости бортов и уступов проявления изменений пород (резкая неоднородность свойств, тектонизированные контакты, планпараллельные текстуры и скопления ориентированных слоистых минералов и т. п.) необходимо изучать и картировать на всех стадиях работ;

4) зона физического и намного реже – химического выветривания в пределах кристаллических пород Фенноскандинавского щита редко превышает первые десятки метров. Начиная с глубины 100–150 м от поверхности влияние фактора «поверхности», как правило, не прослеживается. Гипергенез в условиях бореального субарктического климата проявлен незначительно и самостоятельного значения не имеет, так как большинство видов добываемых руд и вмещающих пород устойчивы к нему на среднесрочный период (минимум на 10–15 лет);

5) по опыту наблюдений и измерений *in situ*, гравитационная (литостатическая) составляющая современного поля напряжений для условий Фенноскандинавского щита до глубин примерно 400–600 м уступает по абсолютным значениям тектонической составляющей. Поэтому до глубин около 300–400 м от поверхности (реже до 600 м) тектоническая составляющая формирует главное сжимающее напряжение. Это явление характерно для всего Фенноскандинавского щита и многократно подтверждено результатами инструментальных измерений [2, 11, 12]. Положение главных осей напряжений, их абсолютные значения и локальные флуктуации относятся к главным факторам, отвечающим за безопасную эксплуатацию месторождения;

б) крупные плоскостные структурные неоднородности (разрывные нарушения, трещины, поверхности ослабления и т. п.) с глубиной увеличивают потенциальную опасность для устойчивости бортов и уступов карьера, так как резко увеличивают объемы возможных обрушений / деформаций и масштаб последствий от них. Крупные структурные неоднородности – первоочередные объекты для выявления, геометризации и комплексного исследования в ходе инженерно-геологических изысканий на всех стадиях изучения и эксплуатации месторождения.

Для разработки приповерхностной части месторождения наиболее важны ( $\geq 15\%$ ) следующие факторы (см. табл. 1): гидрогеологический режим (поверхностные и подземные воды), тектонические поля напряжений, разрывная тектоника и степень выветривания массива горных пород. Для глубоких карьеров главным фактором, определяющим их безопасную эксплуатацию, становятся структурные неоднородности, в первую очередь разрывная тектоника и трещиноватость с опасным для карьера залеганием. Также повышается роль гравитационной составляющей поля напряжений и остается на высоком уровне значение тектонической составляющей. Уменьшается относительная доля гидрогеологического режима и физико-механических свойств. В соответствии с ранжированием определяются приоритеты и необходимый комплекс видов и методов исследований для проведения инженерно-геологических изысканий в целях проектирования / перепроектирования глубоких карьеров. Конечная цель – создание базы достоверных и точных данных обо всех возможных опасных геолого-геофизических процессах и явлениях, учет которых есть залог своевременного принятия проектных и организационных управленческих решений по обеспечению высокого уровня безопасности и защиты на всех стадиях строительства и эксплуатации глубокого карьера.

Значимость опасных для устойчивости глубоких карьеров факторов (напряженно-деформированного состояния и разрывной тектоники) в совокупности оценена в 65 %. Поэтому далее основной акцент будет сделан именно на них.

### **Основные черты разрывной тектоники и напряженно-деформированного состояния (НДС) Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд**

Ковдорское месторождение магнетитовых и апатитовых руд (КММА) представлено вертикальным рудным штоком длиной около 1.5 тыс. м и шириной 300–800 м (рис. 2). Рудное тело месторождения прослежено без значительных изменений площади горизонтального сечения и качества руд на глубину более 2 тыс. м от поверхности. КММА расположено в юго-западной части Ковдорского щелочно-ультраосновного массива (КМ) центрального типа. Массив представляет собой интрузию концентрически-зонального строения овальной формы и имеет прямую зональность, которая соответствует внедрению и смещению каждой из последующих магматических фаз от центра к периферии [13, 14]. Месторождение образовано на завершающих стадиях формирования массива за счет внедрения рудных карбонатитов. По геофизическим данным КМ прослеживается, постепенно сужаясь, до глубины 20 км.

Эксплуатация месторождения карьером начата в 1962 г., и на сегодня добыто более 500 млн т руды. Это один из крупнейших карьеров в Кольском регионе: около 2 км в длину, 1.8 км в ширину и более 400 м глубины. Извлекаемые запасы в текущем проекте оцениваются около 190 млн т руды со средними содержаниями 24.6 % Fe, 6.7 %  $P_2O_5$ , 0.14  $ZrO_2$ , а извлекаемые запасы для проектируемого карьера глубиной около 900 м составляют 590 млн т руды со средними содержаниями 24.2% Fe, 6.7 %  $P_2O_5$ , 0.16  $ZrO_2$  [15].

В 2000 г. начались инженерно-геологические изыскания и проектирование сверхглубокого (> 800 м от поверхности) карьера. Его строительство позволит пролонгировать экономически эффективную добычу руды до 2043–2048 гг. Планомерные инженерно-геологические, структурные и геомеханические исследования в целях обеспечения устойчивости бортов и уступов карьера и безопасности горных работ проводятся с конца 1970-х гг., а мониторинг опасных явлений (сейсмичность, деформационные процессы) – с начала 2000-х гг. Некоторые виды исследований были продублированы с использованием альтернативных

методов, инструментальных средств и технологий. Подавляющее большинство исходных и промежуточных данных, а также полученных результатов имеют координатную привязку в местной (X, Y, Z) или географической системах координат.

К настоящему времени собрана уникальная база координатно привязанных данных, включающая более 35 тыс. замеров трещин и разрывных нарушений с поверхности, около 40 тыс. замеров трещин в ориентированном керне (более 20 км), результаты гидрогеологических исследований и каротажа нескольких сотен скважин, более 30 замеров параметров напряженно-деформированного состояния *in situ* методом разгрузки, данные сеймомониторинга за период 2008–2013 гг., геодезического мониторинга (GPS- и светодальномерный методы) за период 2006–2015 гг. и мониторинга развития деформаций бортов и уступов за период 1998–2015 гг. Большинство собранных геолого-геофизических материалов вынесено и визуализировано в 3D-модели.

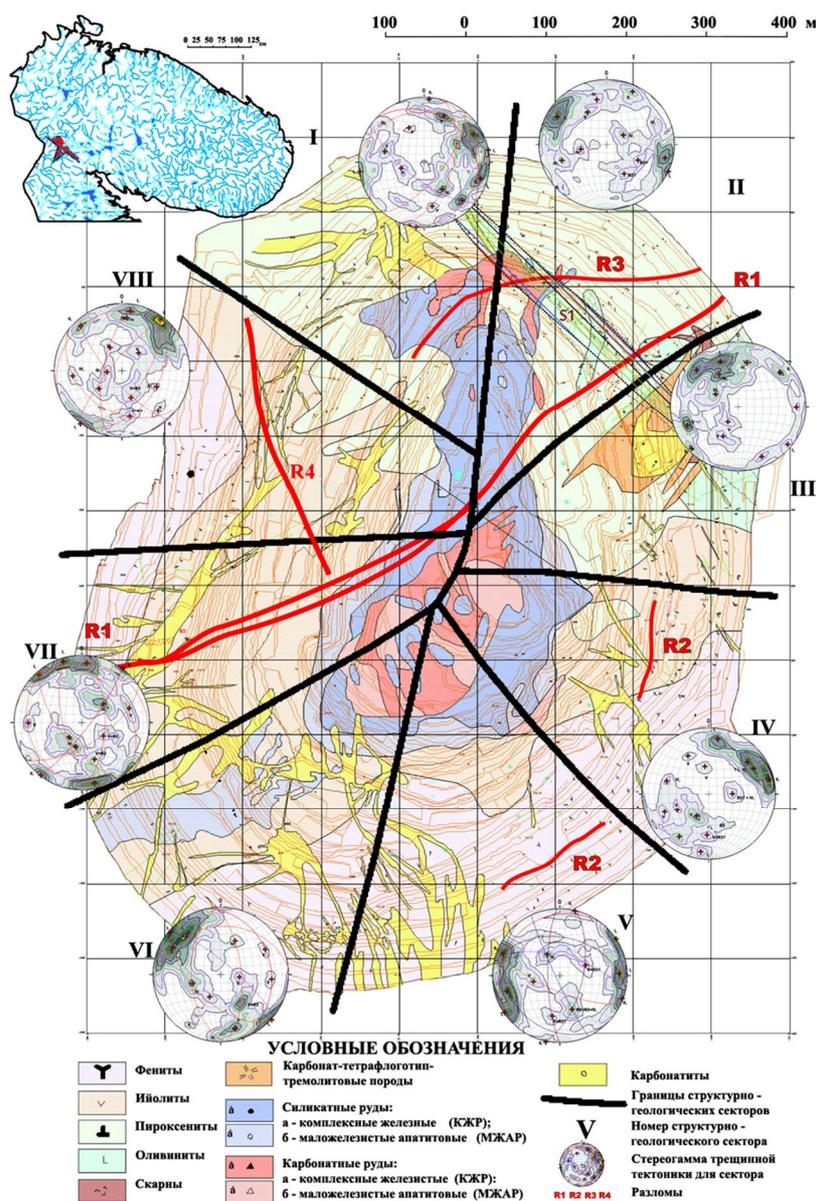


Рис. 2. Карта-схема КММА с инженерно-структурным районированием по секторальному принципу, по [16] с дополнениями. На схеме вынесены: геологическое строение, основные крупные разломы, инженерно-геологические секторы со стереограммами

По результатам комплексного анализа этих данных, в том числе с использованием инструментов 3D-анализа и моделирования (рис. 3), выявлен ряд опасных структурных неоднородностей и закономерностей строения, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации глубокого карьера. Прежде всего, это вопросы и аспекты, касающиеся генезиса, соотношений и особенностей распространения различных систем трещиноватости и соответствующих разрывных нарушений в пространстве, изменения их параметров как латерально, так и на глубину, характеристики современного поля напряжений во вмещающих породах и др.

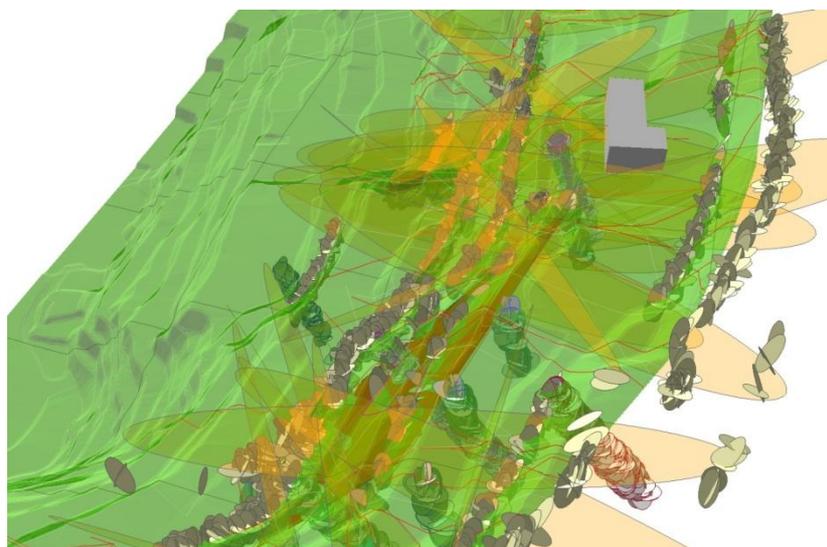


Рис. 3. Фрагмент 3D-модели структурных неоднородностей восточного борта карьера. Вынесены координатно привязанные замеры трещиноватости с поверхности, по ориентированному керну и наиболее крупных прослеженных разрывных нарушений

Вся трещиноватость массива пород КММА классифицирована на 2 большие группы: прототектоническую трещиноватость, в том числе трещиноватость этапов «собственно магматического (карбонатитовой стадии) – контракционного генезиса»; новообразованную трещиноватость наложенных тектонических этапов.

По отношению к месторождению они характеризуются как «внутриформационные» и «трансформационные» соответственно [10, 16]. Каждая группа представлена набором систем трещиноватости (парагенезисом) с уникальными отличительными чертами и признаками, а также закономерными связями между собой.

Исследованиями авторов настоящей статьи установлено, что внутриформационная (прототектоническая) парагенетическая ассоциация трещиноватости в масштабах КММА и вмещающих комплексов имеет представительность 90–95 % и включает следующие основные системы: радиальную (2–3 подсистемы – Rd) с углами падения размахом 65–90° (78° – медиана), две подсистемы S-кольцевой субвертикальной (тангенциальной, поперечной по отношению к Rd) с углами падения 60–90° (74°) и две диагонально-конические: центриклинальную – С, падающую к центру массива под углами 25–55° (43°), и периклиналиную – Р, падающую от центра массива под углами 5–35° (18°). Система субгоризонтальных трещин L (углы падения 0–12°) на глубоких горизонтах проявлена незначительно. Все системы прототектоники закономерно связаны друг с другом и изменяют свои азимутальные характеристики по закону осевой симметрии (при движении вокруг вертикальной оси симметрии, проведенной через геометрический центр карбонатитовой интрузии) [16, 17]. Эта закономерность положена в основу инженерно-структурного районирования месторождения по секторальному принципу и

хорошо видна на стереограммах секторов (см. рис. 2). Такой подход позволил выделить относительно однородные по параметрам трещиноватости области не по блочному принципу (традиционный подход), а через выделение секторов.

Трещиноватость прототектонического парагенезиса имеет относительно однородное распределение в массиве пород месторождения, удовлетворительную – хорошую предсказуемость по основным параметрам, в том числе по индивидуальным (для каждой системы/подсистемы) закономерностям их изменения с глубиной и по простиранию. Так, выявлено, что наибольшую изменчивость по частоте имеют субгоризонтальные трещины, которые преобладают у поверхности и почти исчезают на глубинах более 150–200 м.

Трещины диагональных систем (С и Р) уменьшают свою представительность в меньшей степени, однако у них с глубиной увеличиваются углы падения в среднем на 5–7°. Наименее изменчивы трещины радиальных подсистем, хотя у них также с глубиной отмечается увеличение углов падения вплоть до волнообразных отклонений на 1–3° в обе стороны от вертикали.

Наложённая тектоника пострудных этапов формирует несколько крупных разрывных нарушений (разломов) и собственных систем трещиноватости, а также реактивирует часть систем прототектонического генезиса с образованием мультикинематических дизъюнктивов, которые сформированы за счет локального участия отдельных элементов прототектоники в деформациях поздних тектонических этапов. Ряд прототектонических трещин участвовал в постмагматической тектонической эволюции массива пород месторождения многократно, являясь своего рода структурными триггерами – плоскостями реализации для широкого диапазона положений тензора напряжений. Их отличительная черта – разные направления (фиксируется до 3) относительных смещений, что документируется в полевых условиях по кинематическим признакам (борозды скольжения, ориентированные сколы).

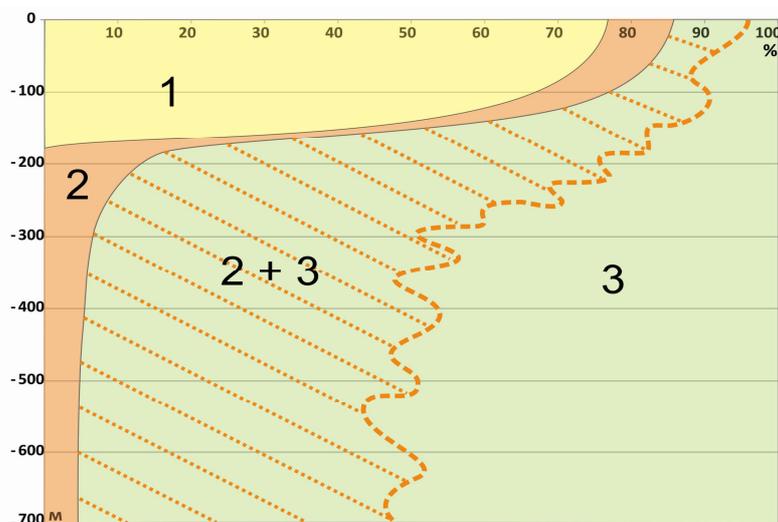


Рис. 4. Гистограмма соотношения (весового вклада в общую выборку) различных парагенетических ассоциаций трещиноватости в зависимости от глубины от поверхности:

1 – трещины разгрузки и приповерхностного выветривания; 2 – трещины наложенной тектоники; 3 – трещины прототектоники; 2+3 – ассоциация структурных элементов, реактивированных наложенной тектоникой. Ось абсцисс – весовой вклад парагенетической ассоциации, %; ось ординат – расстояние от поверхности, м

Трещиноватость наложенной тектоники имеет неоднородное (локальное) распределение в массиве пород месторождения и слабую предсказуемость основных параметров. Характер её проявления на конкретном участке выявляется только методами картирования уступов и документирования ориентированного керна с ограниченной возможностью экстраполяции за точки наблюдения. Сочетание различных парагенетических ассоциаций трещиноватости

формирует комбинаторно-наложенный характер распространения трещиноватости в объеме массива пород. Это выражается в сочетании и пространственном наложении друг на друга различных по генезису, морфологии и ориентации единичных трещин, их сближенных пакетов и зон трещиноватости. Наиболее опасны для устойчивости бортов и уступов крупные разрывные нарушения наложенной тектоники и зоны (пакеты) реактивированной трещиноватости, имеющие падение в сторону выработанного пространства.

Результат оценки представительности и соотношения трещиноватости различных парагенетических групп на разных горизонтах массива пород КММА представлен на рис. 4. Иерархия выявленных разрывных нарушений и систем трещиноватости, их параметры и ранжирование по опасности для устойчивости уступов / бортов карьера отражены в табл. 2.

Таблица 2

Иерархия и параметры основных разрывных нарушений  
(номер и индекс разрывного нарушения / системы трещин соответствуют рис. 2)

Номер	Аз-т прост-я, °	Аз-т падения, °	Угол падения, °	Мощность / (max длина), м	Оценка опасности для устойчивости карьера
1	2	3	4	5	6
<i>Трансформационные разрывные нарушения (максимальная протяженность)</i>					
R1	38–48	310 / 130	83–90	Пакет трещин до 25 у поверхн., 2–10 на глубине, (более 1200)	Опасность представляют вывалы и оползни вдоль собственно зоны разлома (СВ и ЗЮЗ борты), а также зона оперяющей трещиноватости мощностью до 20–50 м у каждого крыла
R2 – В	5–15 и 15–20	275–285 и 285–290	38–41 и 50–54	Пакет трещин до 7–8, 1–3 (более 250)	Пересечение 2 «реактивированных» разломов с близкими азимутальными параметрами, они образуют деформацию плоскостного типа и прослеживаются на глубину 300–350 м
R2 – ЮВ	42–55	312–345	41–47	Пакет трещин до 10–15, единичные до 1.5–2 (более 500)	«Реактивированные» центриклинальные трещины создают пакет сближенных трещин, по поверхностям которых образуется значительное обрушение плоскостного типа; трещины следят вглубь со смещением в горизонтальной плоскости к центру карьера
R3	50–65	320–335	33–41	0.5–1.3 (более 400)	В текущей и проектируемой конструкции карьера опасности нарушения устойчивости бортов не представляет, в местах пересечения с уступами могут наблюдаться локальные деформации клиновидного типа и вывалы
R4	342–350	252–260	63–70	0.5–1.2 (более 350)	То же
S1	320–340	240 / 60	75–80–87	Пакет трещин до 15, одиночные 0.2–0.3 (более 300)	Пакет трещин формирует крутопадающую поверхность уступов ССВ борта в пределах горизонтов +10 ÷ +118 м. Образует мелкие единичные плоскостные обрушения крутого залегания и комбинированные – клиновидно-плоскостные

1	2	3	4	5	6
<i>Протектонические системы трещиноватости (средняя протяженность)</i>					
Rd (I)	0–360	0–360	65–90	Пакет трещин до 0.5–2, одиночные до 0.2–0.3 (до 200)	Радиальная система образует до 2–3 подсистем с разностью в элементах залегания 10–15° и падением в разные стороны с углами 65–90°. Играет второстепенную роль в формировании клиновидных обрушений при пересечении с другими системами, имеющими опасное залегание
S (II)	0–360	0–360	60–90	0.2–1 (до 150)	Опасности нарушения устойчивости бортов не представляет, в местах пересечения с уступами могут наблюдаться локальные деформации клиновидного типа и вывалы
C (IV)	0–360	0–360	25–55°	0.1–0.5 (до 200)	Отмечаются во всех бортах, однако наибольшую опасность представляют для В и ЮВ бортов
P (IV)	0–360	0–360	15–35°	0.1–0.3 (до 120)	Опасности нарушения устойчивости не представляют
L (III)	0–360	0–360	0–12°	0.01–0.1 (до 30–50)	Опасности нарушения устойчивости не представляют. Преимущественно распространены в приповерхностной части

Наиболее опасные структуры для устойчивости бортов карьера – трансформационные (наложенные) и «реактивированные» центриклинальные разрывные нарушения, а для устойчивости уступов к вышеперечисленным добавляются неблагоприятные пересечения нескольких трещин с раскрытыми стенками / берегами с образованием линии скрещения, падающей в сторону карьера под углом более 40–42° (табл. 2).

### Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь и организационно-техническую поддержку руководству АО "Ковдорский ГОК", сотрудникам геологического отдела комбината и службы мониторинга устойчивости уступов. Комплексный мониторинг опасных геолого-геофизических процессов в целях обоснования геодинамической безопасности стал возможным благодаря поддержке гранта РФФИ 14-17-00751 (научн. рук. – проф., д.т.н. А. А. Козырев).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богатство недр России / под ред. Б. К. Михайлова [и др.] // Минерально-сырьевой и стоимостный анализ: пояснительная записка к геолого-экономическим картам. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 550 с.
2. Методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом / А. А. Козырев [и др.] // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 644–653.
3. Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа / М. С. Епифанова [и др.] // Горный журнал. 2007. № 9. С. 30–33.
4. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разработке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых (методическое руководство) / В. Д. Бабушкин [и др.]. М.: Недра, 1969.
5. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 172 с.
6. Инженерно-геологические, гидрогеологические и геоэкологические исследования при разведке и эксплуатации рудных месторождений / сост. В. И. Кузькин [и др.]. М.: РИЦ ВИМС, 2002.
7. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: ВСЕГИНГЕО, 1977. 143 с.
8. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: РИЦ ВИМС, 2001.
9. Guidelines for open pit slope design / J. Read, P. Stacey (edit.). CSIRO, 2009. 496 с.
10. Комплексная методика инженерно-

структурных исследований и мониторинга геомеханического состояния массива пород в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров / *Д. В. Жиров [и др.]* // Материалы совещания «Современная тектонофизика. Методы и результаты». М.: ИФЗ РАН, 2011. Т. 1. С. 100–109. **11.** *Рыбин В. В., Губинский Н. О., Данилов И. В.* Опыт определения напряженного состояния прибортового массива пород на карьерах Кольского полуострова // Материалы совещания «Современная тектонофизика. Методы и результаты». М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 34–37. **12.** *Козырев А. А., Рыбин В. В., Каспарьян Э. В.* Особенности развития геомеханических процессов в массивах пород глубоких карьеров // ГИАБ. 2015. № 4. С. 32–39. **13.** Геология рудных районов Мурманской области / *В. И. Пожиленко и др.* Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 359 с. **14.** *Афанасьев Б. В.* Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб.: Роза ветров, 2011. 224 с. **15.** Интенсификация использования природных и техногенных минерально-сырьевых ресурсов / *А. В. Туголуков [и др.]* // Горный журнал. 2007. № 9. С. 14–19. **16.** *Жиров Д. В., Мелихова Г. С., Климов С. А.* Инженерно-структурное районирование массива пород Ковдорского месторождения бадделеит-апатит-магнетитовых и маложелезистых апатитовых руд как основа для проектирования крутых бортов карьера // Всеросс. науч.-тех. конф. «Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов»: сб. докл. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. Т. 1. С. 92–103. **17.** *Сим Л. А., Жиров Д. В., Маринин А. В.* Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 3. С. 219–243.

### Сведения об авторах

*Жиров Дмитрий Вадимович* – начальник отдела инноваций ФГБУН Геологического института Кольского научного центра РАН; e-mail: [zhirov@geoksc.apatity.ru](mailto:zhirov@geoksc.apatity.ru)

*Мелихова Галина Сергеевна* – главный гидрогеолог ОАО «МГРЭ»; e-mail: [melihovags@mgre.ru](mailto:melihovags@mgre.ru)

*Рыбин Вадим Вячеславович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН; e-mail: [rybin@goi.kolasc.net.ru](mailto:rybin@goi.kolasc.net.ru)

*Сохарев Виктор Александрович* – главный геолог АО «Ковдорский ГОК»; e-mail: [Viktor.Sokharev@eurochem.ru](mailto:Viktor.Sokharev@eurochem.ru)

*Климов Сергей Андреевич* – ведущий инженер ФГБУН Геологического института Кольского научного центра РАН; e-mail: [klim-sa@yandex.ru](mailto:klim-sa@yandex.ru)

### Information about the authors

*Dmitry V. Zhirov* – head of the Innovation Dept. of the Geological Institute of the KSC of the RAS; e-mail: [zhirov@geoksc.apatity.ru](mailto:zhirov@geoksc.apatity.ru)

*Galina S. Melikhova* – main hydrogeologist of the “MGRE” Stock Company; e-mail: [melihovags@mgre.ru](mailto:melihovags@mgre.ru)

*Vadim V. Rybin* – PhD (Eng.), leading scientific researcher – the Mining Institute of the KSC of the RAS; e-mail: [rybin@goi.kolasc.net.ru](mailto:rybin@goi.kolasc.net.ru)

*Victor A. Sokharev* – major geologist of the “Kovdorsky GOK” Stock Company; e-mail: [Viktor.Sokharev@eurochem.ru](mailto:Viktor.Sokharev@eurochem.ru)

*Sergey A. Klimov* – leading engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS; e-mail: [klim-sa@yandex.ru](mailto:klim-sa@yandex.ru)

### Библиографическое описание статьи

Особенности инженерно-геологического изучения массивов скальных пород в целях проектирования глубоких карьеров на примере Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд. Часть 1 / *Д. В. Жиров [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 15–25.

### Bibliographic Description

Peculiarities of the Engineering-Geological Studies of Rock Massifs for Designing / Redesigning Deep Open Pits Exemplified with the Kovdor Deposit of Magnetite and Apatite Ores (Kovdor Alkaline-Ultrabasic Massif, Ne of the Fennoscandian Shield). Part 1 / *Dmitry V. Zhirov, Galina S. Melikhova, Vadim V. Rybin, Victor A. Sokharev, Sergey A. Klimov.* Herald of the Kola Science Centre of the RAS. 2016, vol. 1, pp. 15-25.

УДК 551.1:551.73

## ВОДА НА ЗЕМЛЕ И ЛУНЕ

Ю. А. Балашов

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

## Аннотация

Систематизация экспериментальных данных, наблюдений и расчетов в астрономии, геохимии, биологии и геофизике позволила оценить условия синтеза воды, её миграции с солнечным ветром и накопления в планетах в зависимости от степени прогрева поверхности планет Солнцем, а также от наличия или отсутствия атмосферы, что определяется массой планеты. Во всех случаях накопление воды зависит от длительности существования (возраста) планеты. Сам факт привнесения новых порций элементов с солнечным ветром влияет на преобразование (частичную потерю) некоторых элементов или изотопов за время пребывания на поверхности планет. Необходимо также учитывать частичное охлаждение Солнца за 4.5 млрд лет при ориентации на уровни прогрева планет и глобальное перераспределение элементов при аккреции планет.

## Ключевые слова:

*вода, планеты, солнечный ветер, геохимия элементов и изотопов.*

## WATER ON THE EARTH AND MOON

Yury A. Balashov

Geological Institute of the KSC of the RAS

## Abstract

Systematization of experimental data, observations and calculations in astronomy, geology, biology and geophysics allowed us to estimate the conditions of water synthesis, its migration with the solar wind and accumulation in planets, depending on the degree of warming the planets surfaces by the Sun and the presence or absence of their atmospheres, which, in its turn, depends on the mass of a planet. In all cases, the accumulation of water depends on the duration of existence (age) of the planet. Due to supplying of new portions of elements by the solar wind, some elements or isotopes experience transformation (partial loss) during their stay on the surface of planets. We must also take into account the fact of the partial cooling of the Sun over 4.5 billion years, with orientation to the levels of planets warming and the global redistribution of elements during accretion of the planets.

## Keywords:

*water, planets, solar wind, geochemistry of elements and isotopes.*

## Введение

Изучение геологических, геофизических или биологических эффектов, связанных на Земле с оболочкой воды, запасы которой составляют  $2.3 \times 10^{24}$  г [1], представляет совсем не простую задачу. Следует добавить, что вода обнаружена в верхних частях мантии до глубин 150–200 км [2–4 и др.]. Но по-прежнему остается нерешенной проблема столь высокой концентрации воды именно на Земле сравнительно с другими планетами "земной группы". Можно предполагать, что это связано с влиянием ряда факторов, которые не учитываются при попытках понять условия образования Земли и других планет. Попробуем проверить это.



**Синтез воды**

Кажется удивительным пренебрежение знанием условий синтеза воды из водорода и кислорода почти во всех книгах и статьях астрономического, геологического, геохимического и биологического толка. Однако взаимодействие водорода с кислородом непростая реакция. Она требует довольно сильного прогрева обоих газов [5]. Так, например, при 20 °С оба газа практически не реагируют. При 500 °С нужно 50 мин, а при 700 °С реакция протекает мгновенно. Поэтому первое условие образования воды – это прогрев обоих газов Солнцем или иным источником независимо от места их положения на поверхности планеты либо внутри планеты в коре или мантии. Универсальный вариант источника воды предложен в книге [1] в предположении, что избыток воды находится в самом Солнце. Но такое решение противоречит условиям синтеза воды из-за чрезвычайно высокой температуры ядра Солнца ( $1.5711 \times 10^7$  К), в пределах которого существуют только отдельные элементы: газы водорода, кислорода и др.

При этом необходимо помнить, что вода на планетах присутствует в форме газа, жидкости и льда. Их соотношение зависит от степени прогрева поверхности планет, которая в свою очередь определяется серией ограничений, представленных в таблицах 1 и 2. Температура центральной части ядра Солнца составляет  $1.5711 \times 10^7$  К, краевой части фотосферы Солнца – 4400 К. В итоге имеются почти все условия для выделения важнейших этапов возникновения воды и ее распределения в планетах.

1 этап. При сверхвысокой температуре солнечного ядра происходит лишь генерация всех элементов, включая кислород, концентрация которого сопоставима с водородом (табл. 2).

Таблица 1

Изменение физических параметров планет по мере их удаления от Солнца

Планета	Масса ( $10^{24}$ кг)	Диаметр (км)	Плотность ( $\text{кг/м}^3$ )	Ускорение свободного падения ( $\text{м/с}^2$ )	Расстояние от Солнца ( $10^6$ км)	Средняя температура (°С)
Меркурий	0.330	4879.00	5427.00	3.70	57.9	167.00
Венера	4.87	12104.00	5243.00	8.90	108.2	464.00
Земля	5.97	12756.00	5514.00	9.80	149	15.00
Луна	0.073	3475.00	3340.00	1.60	0.38	-20.00
Марс	0.642	6792	3933	3.7	227.9	-65
Юпитер	1898	142.984	1326	323.1	778.6	-110
Сатурн	568.00	0536.00	687.00	9.00	1433.5	-140.00
Плутон	0.0131	2390.00	1830.00	0.60	5870.0	-225.00

*Примечание.* Таблица составлена по <http://sdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/index.ht> (дата обращения: 07.09.2015).

Таблица 2

Химический состав наиболее распространенных газов фотосферы Солнца [11]

H	He	O	C	N	Fe
$2.8184 \times 10^{10}$	$2.7542 \times 10^9$	$2.399 \times 10^7$	$1.0233 \times 10^7$	$3.162 \times 10^6$	$1.318 \times 10^6$
Si	Mg	S	Al	Ni	Cr
$1.0 \times 10^6$	$1.0715 \times 10^6$	$4.571 \times 10^5$	$8.318 \times 10^4$	$5.012 \times 10^4$	$1.318 \times 10^4$
Ca	Na	Mn	Ti	K	P
$6.457 \times 10^4$	$6.026 \cdot 10^4$	$6.918 \cdot 10^3$	$2.754 \cdot 10^3$	$3.715 \cdot 10^3$	$7.94 \cdot 10^3$

2 этап. Резкое снижение температуры на периферии Солнца соответствует переносу элементов солнечными лучами к планетам. При понижении температуры происходит синтез воды в форме газа (примерно в диапазоне температур 1 тыс. – 500 °С). Но верхнее ограничение температур никем точно не определено, и это допускает выбор температурного диапазона для синтеза воды, который происходит именно в лучах солнечного ветра, а не в самом Солнце, что предлагалось ранее в работе [1].

3 этап. Поступление солнечных лучей с водным газом на поверхность планет. Оно сопровождается либо полным захватом и накоплением всей массы элементов, принесенных солнечным ветром, либо они частично теряются из-за высокой температуры на поверхности ряда планет (табл. 1 и 2) или по иным причинам [4].

### **Степень стабильности воды на планетах**

Масса Солнца составляет 99.9 % от Солнечной системы [1]. Реальное соотношение масс отдельных планет (табл. 1) позволяет разделить их на две группы по степени удаленности от Солнца на расстояние, меньшее или больше двух астрономических единиц. Первая из них (земная группа), расположенная вблизи Солнца, представлена рядом от Меркурия до Марса, которые находятся на расстоянии от Солнца от  $57.9 \times 10^6$  км до  $227 \times 10^6$  км. Подобное разделение предложено в работе [1] с опорой на массы планет. Если же учитывать степень прогрева Солнцем поверхности планет, то Марс следует относить к слабо охлажденным планетам (табл. 1). Эта таблица отражает современный уровень астрономических оценок температур планет от частично охлажденного Солнца. Но этот процесс продолжается около 4.5 млрд лет, и, следовательно, Марс был разогретым почти так же, как и Земля.

### ***Меркурий и Венера***

Наиболее близки к Солнцу две планеты – Меркурий и Венера, расстояние  $58 \times 10^6$  км и  $108 \times 10^6$  км соответственно, с температурами поверхности от 167 до 465 °С. Указанные параметры сильно отличаются от приемлемых для всех видов воды, значит, обе планеты должны быть без воды. Но Венера имеет большую массу ( $4.87 \times 10^{24}$  кг), сопоставимую с Землей, поэтому она имеет свою атмосферу. Однако в её атмосфере (по расчетам работы [1] и многих других авторов) концентрация воды не превышает  $2.3 \times 10^{-4}$  бар и кислорода  $10^{-22}$  бар, что согласуется со сделанным выше выводом о дефиците воды на Венере.

### ***Система Солнце – Земля – Луна – Марс (ССЗЛМ)***

На первый взгляд подобное сочетание представляется неожиданным. Но комплексное исследование геохимических, геохронологических и геофизических параметров этой системы оказалось единственным путем их согласования при расшифровке генезиса Земли, Луны, Марса и их водонасыщения. Практически все данные по экспедициям «Аполло» и станциям России опубликованы и обобщены [4, 6, 7 и др.]. Важнейшее преимущество данной системы – в наибольшей достоверности исходной информации, которая чрезвычайно важна для понимания степени взаимодействия отдельных элементов Земли и Луны и всей Солнечной системы.

Удаленность Земли от Солнца –  $149 \times 10^6$  км, а Луны от Земли –  $0.38 \times 10^6$  км. Средняя температура поверхности Земли равна +15 °С, Луны – около -20 °С, а Марса – порядка -65 °С (табл. 1). Но температурный диапазон для Земли можно расширить от -90 °С на обоих полюсах до +50 °С у экватора. Это вполне приемлемо для всех трех состояний воды на Земле. Поскольку привнесение элементов с солнечными лучами на Землю продолжается более 4.5 млрд лет, такое время отражает общее количество воды для Земли, которое пропорционально массе планеты (табл. 1, 2). Количество принесенной на Луну воды также не противоречит факту обнаружения льда или воды в одном из метеоритных кратеров Луны (по сообщению американских исследователей в 2015 г.). Существование воды на Луне под твердой выветренной поверхностью вероятно.

## Ряд особенностей в ССЗЛМ

### Хронология

Прежде всего, следует обратить внимание на факт тождества возрастных ступеней роста Земли и Луны от архея до фанерозоя [7–9 и др.]. Подобное совпадение указывает на определенную взаимосвязь развития лунного и земного магматизма, причины чего оставались неизвестными до тех пор, пока Ю. Н. Авсюк [10] не указал на колебательный режим системы Земля – Луна под влиянием Солнца.

Геохронологическая систематика более 10 000 датировок показала, что для Земли и Луны существует единый тип цикличности по геонам с размерностью в 100 млн лет [7–9].

### Стадийность магматизма Луны

В возрастной стадийности развития магматизма Луны выделяется ранний континентальный (KREEP) и морской этапы (рис. 1 – обобщение автором опубликованных данных).

Общая особенность магматических пород Луны – дефицит литофильных элементов в сравнении с земными породами. Возможная причина этого – частичная потеря элементов на поверхности Луны при поступлении их с солнечным ветром (K, Rb и другие элементы) [7], что позволяет говорить об отклонении от хондритового соотношения элементов на Луне [7].

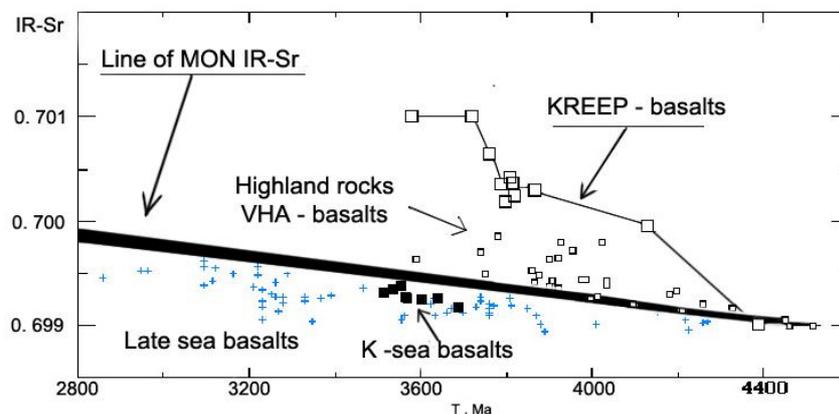


Рис. 1. Магматизм Луны

### Поверхность Земли

При сопоставлении соотношения отдельных элементов фотосферы Земли и хондритов С1 Андерс и Гревесс [11] подчеркивали, что для большинства элементов наблюдается сходство содержания с метеоритами (табл. 2). Но для части элементов фиксировалось отчетливое отклонение, что условно рассматривалось, как результат неточности анализа. Подобная трактовка представляется произвольной [12], где приведены многочисленные примеры отклонения от хондритов. Аналогичное изменение может рассматриваться, как результат вторичного перераспределения на разогретой поверхности Земли, как это отмечалось по Луне.

### Аккреция Земли

На Земле развитие магматизма имеет более сложный характер, чем на Луне, оно включает этап аккреции, хронология которой до сих пор остается спорной. Часть авторов предполагает, что аккреция приурочена к самому раннему этапу её существования [5 и др.].

Для реализации аккреции, как указывают Г. В. Печерникова и А. В. Витязев [13], требуется привлечение дополнительной энергии для плавления всей массы Земли. Ими предложен вариант дробления Земли на фрагменты. Не отрицая работоспособности такого механизма, следует обратить внимание на иной источник. В комплексе элементов и их изотопов, поступающих на

Землю в составе солнечного ветра, на ранней стадии жизни Земли присутствует группа «короткоживущих» (вымерших) изотопов, которые являются носителями дополнительной энергии (табл. 3).

Таблица 3

Вымершие изотопы Земли [7]

	$T_{1/2}$ (млн лет)
$^{26}\text{Al} - ^{26}\text{Mg}$	0.7
$^{60}\text{Fe} - ^{60}\text{Ni}$	1.5
$^{53}\text{Mn} - ^{53}\text{Cr}$	3.7
$^{182}\text{Hf} - ^{182}\text{W}$	9.0
$^{129}\text{I} - ^{129}\text{Xe}$	15.7

Этим не ограничивается дополнительный разогрев различных частей планеты. После аккреции фиксируется разогрев железного ядра, необходимо отметить вероятность перераспределения летучих элементов с выносом воды на поверхность (включая осадочный чехол) и обогащение водородом нижних и средних частей мантии и ядра, подтвержденные экспериментально.

Анализа распределения летучих элементов на Земле показал, что атмосфера удерживает почти все типы газов. Присутствие кислорода (табл. 2) и воды является основой для образования гидросферы и возникновения жизни на Земле. Впервые важнейшую роль приобретают геологические процессы по разрушению разных типов пород и привнесению всего спектра элементов в гидросферу.

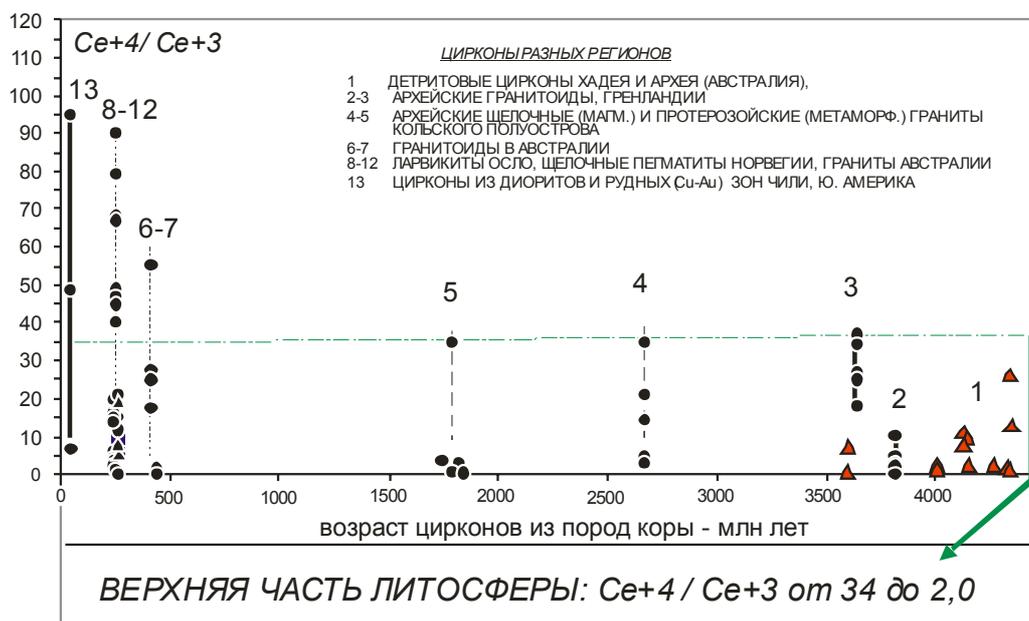


Рис. 2. Отношения  $\text{Ce}^{+4}/\text{Ce}^{+3}$  в цирконах из мантийной литосферы и коры [5, 11]

Геологические процессы также фиксируют раннее появление избытка кислорода в атмосфере Земли, а начиная с хадея и по избытку  $\text{Ce}^{+4}$  в цирконах (рис. 2) [4, 14].

По мнению биологов, один из источников добавочного попадания кислорода в атмосферу Земли – генерация при расщеплении воды водорослями океанов и наземной растительностью.

## Заключение

Сделана попытка обрисовать проблему генезиса воды в системе Земля – Луна – Марс, которая занимает скромное место среди всего списка планет и их спутников в Солнечной системе. Очевидно, что температуры поверхностей остальных планет, оптимально удаленных от Солнца (от Юпитера до Нептуна), резко понижены: от -110 до -1950 °С (табл. 1). Эти планеты представлены преимущественно льдом с ничтожной примесью остальных элементов. Сумма масс планет земной группы (табл. 1) ничтожно мала по сравнению с соседними планетами, которые также относятся к холодным. За пределы системы, в галактику, выносятся подавляющая масса воды и элементов Солнечной системы, и только ничтожная масса захватывается планетами. При этом оказалось, что ведущий фактор распределения воды – зависимость от температурного влияния Солнца на внешние части планет.

Общий итог работы: обнаружено, что поверхность планет – самостоятельная зона дифференциации элементов и изотопов, влияние которой необходимо учитывать при анализе их развития. Система Земля – Луна – Марс генетически связана и приурочена к зоне умеренного прогрева Солнцем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шапкин А. И., Сидоров Ю. И. Термодинамические модели в космохимии и планетологии. УРСС, 2004. 331 с.
- 2 Растворимость водорода и углерода в восстановительных процессах ранней Земли / А. А. Кадик и др. // Геохимия. 2006. № 1. С. 38–53.
3. Balashov Yu. A., Martynov E. V. Correlation of oxygen fugacity in the mantle lithosphere between  $Ce^{+4}/Ce^{+3}$  relation of ions and petrological buffer FMQ // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15, № 2. Р. 311–329.
4. Балашов Ю. А., Скублов С. Г. Контрастность геохимии магматических и вторичных цирконов // Геохимия. 2011. № 6. С. 622–633.
5. Ахметов Н. С. Общая и неорганическая химия. 4-е изд., исп. и доп. М.: Высш. шк., Изд. центр "Академия", 2001. 743 с.
6. Clive R. N. and Lawrence A. T. Petrogenesis of mare basalts: A record of volcanism // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992. Vol. 56. P. 2177–2211.
7. Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. М.: Наука, 1985. С. 221.
8. Балашов Ю. А. Динамика развития системы Луна – Земля и метеоритов // Доклады РАН. 2001. Т. 377, № 2. С. 227–230.
9. Балашов Ю. А. Концепция времени в геологической истории Земли. Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т. 3. Новые идеи и подходы к изучению геологических образований. Апатиты, 2002. С. 51–75.
10. Авсюк Ю. Н. Колебательный режим эволюции системы Земля – Луна и его сопоставление с геологическими процессами фанерозоя // ДАН СССР. 1986. Т. 287, № 5. С. 1097–1100.
11. Anders E., Grevesse H. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. Vol. 53. P. 197–214.
12. Костицин Ю. А. Микроэлементный состав примитивной мантии – нехондритовая модель // Глубинный магматизм, его источники и плюмы. Иркутск, 2013. С. 24–52.
13. Печерникова Г. В., Витязев А. В. Импациты и эволюция Ранней Земли // Катастрофические воздействия космических тел. М.: ИКЦ, 2005. С. 251–265.
14. Балашов Ю. А. Влияние летучести и интенсивность кислорода на рудогенез и развитие биосферы в переходной зоне между мантийными и коровыми системами литосферы // Современные проблемы геохимии: мат-лы всерос. совещания (Иркутск, 22–26 октября 2012 г.): в 4 т. Иркутск, 2012. Т. 2. С. 27–29.

## Сведения об авторе

Балашов Юрий Андреевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Геологического института Кольского научного центра РАН, профессор; e-mail: balashov@geoksc.apatity.ru

## Information about the author

Yury A. Balashov – Dr. Sci. (Geol.), Professor, chief scientific researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS; e-mail: balashov@geoksc.apatity.ru

## Библиографическое описание статьи

Балашов Ю. А. Вода на Земле и на Луне / Ю. А. Балашов // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 26–31.

## Bibliographic Description

Yury A. Balashov Water on the Earth and Moon. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. 2016, vol. 1, pp. 26-31.

УДК 548.0

**О ТРАНСФОРМАЦИИ ФУЛЛЕРЕНОВ****Д. Г. Степенщиков**

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

**Аннотация**

Рассматривается авторский механизм структурной модификации углеродной решетки фуллеренов (SV-трансформация или SVT). Его особенность – последовательное перемещение создаваемого дефекта углеродной решетки без нарушения глобальной целостности молекулы. Это позволяет рассматривать фуллерен как динамически изменяющуюся структуру, проходящую через различные комбинаторные представления в процессе изомеризации, роста и сублимации.

**Ключевые слова:***углерод, фуллерен, трансформация.***ON TRANSFORMATIONS OF FULLERENES****Dmitry G. Stepenshchikov**

Geological Institute of the KSC of the RAS

**Abstract**

In this paper, the original mechanism for structural modification of the fullerenes carbon lattice is introduced. It is called SV-transformation or SVT and featured with special step-by-step movement of a defect with local disturbance of the carbon lattice only. This allows considering the fullerene as a dynamical structure passing through various combinatorial representations in the processes of isomerization, growth and sublimation.

**Keywords:***carbon, fullerene, transformation.***Введение**

Известны различные механизмы структурных преобразований фуллеренов, начиная с трансформации Стоуна – Уолеса и заканчивая заменой целых фрагментов поверхности молекул [1]. И если трансформация Стоуна – Уолеса и ее расширения имеют физическую интерпретацию (перераспределение углеродных связей), но работают в ограниченном числе случаев, то замена целых фрагментов поверхности фуллерена, напротив, упускает практическую реализацию, рассматривая только результат такой замены, хотя и действует в более широком смысле.

Предлагаемый автором механизм трансформации демонстрирует пошаговый переход от одного структурного состояния фуллерена к другому. При этом степень локальности может варьироваться от минимальной, когда оконтуренный участок изменяемой поверхности включает в себя всего два пентагональных и два гексагональных цикла, что соответствует трансформации Стоуна – Уолеса, до максимальной, при которой размер заменяемого фрагмента становится значительным, вплоть до всей поверхности фуллерена. Таким образом, авторский механизм трансформации обобщает рассмотренные ранее и может считаться универсальным.

**Теоретическая часть**

Трансформация фуллеренов – это изменение структуры их поверхности, сопряженное в общем случае с потерей или добавлением атомов углерода. При этом важно отметить, что поверхность фуллерена до и после трансформации остается замкнутой и состоящей из пятиугольных и шестигональных углеродных циклов (пентагонов и гексагонов). Эти два свойства инвариантны по отношению к трансформации любого вида. Ниже дается краткий обзор некоторых из них, а также показывается их взаимосвязь с авторским подходом.

Трансформация Стоуна – Уолеса (SWT) – самый первый из предложенных механизмов трансформации (а точнее изомеризации, так как число атомов углерода остается неизменным) фуллеренов (рис. 1, слева) [2]. Так же проста и операция Эндо – Крото [3], которую можно использовать для получения фуллеренов с большим или меньшим числом атомов (рис. 1, справа). Оба этих механизма реализуемы только при условии близкого расположения пентагонов. К фуллеренам с изолированными пентагонами, окруженными двойным поясом гексагонов, такие операции не применимы.

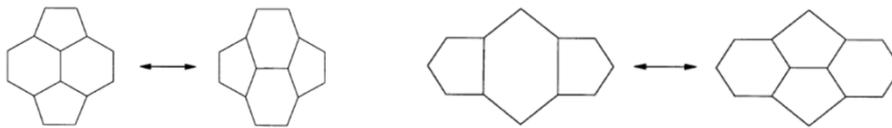


Рис. 1. Трансформация Стоуна – Уолеса и операция Эндо – Крото

Для таких случаев разными авторами было придумано обобщение трансформации Стоуна – Уолеса [4, 5]. Здесь изменению подвергается определенный протяженный фрагмент решетки между двумя пентагонами (рис. 2), который может иметь любую длину и в том числе включать в себя другие промежуточные пентагоны. Минимальной длине фрагмента соответствует обычная SWT.

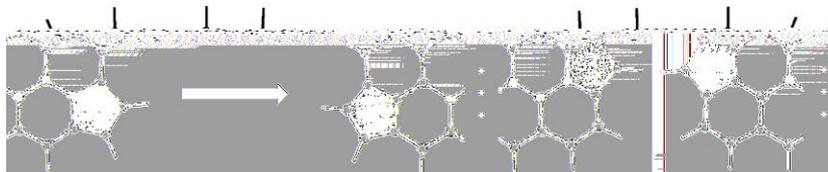


Рис. 2. Обобщение SW-трансформации

Во всех рассмотренных выше подходах контур трансформируемых фрагментов остается неизменным. Фактически суть трансформации сводится к «вырезанию» некоторого фрагмента из решетки поверхности и «вклеиванию» на его место нового фрагмента с тем же контуром. Подобный подход развит в [6, 7] и сводится к перечислению всех возможных фрагментов (так называемых «патчей») с одинаковой границей (рис. 3). На примере фуллеренов в минимальном предельном случае получаем все ту же SWT и операцию Эндо – Крото, а в максимальном (фрагмент – вся поверхность) – задачу перечисления многообразия фуллеренов или их подклассов. Для последнего случая отметим механизм leapfrog [8], который преобразует весь фуллерен в некоторый другой, порождая класс  $C_{60+6k}$ .



Рис. 3. Различные фрагменты с двумя пентагонами и одинаковой внешней границей

Существует еще ряд других подходов. Часть из них – вариации уже рассмотренных, а часть – абстрактные геометрические преобразования (как и leapfrog), имеющие малое отношение к реальным процессам [9–12]. Важно отметить, что в некоторых механизмах трансформации допускается существование семичленных углеродных циклов – гептагонов (рис. 4), причем такие циклы реально наблюдаемы, в частности, на графене (рис. 5) [13].

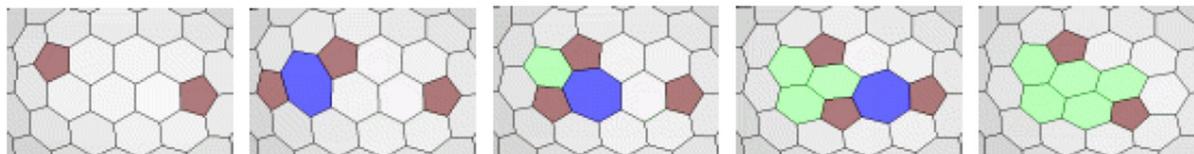


Рис. 4. Трансформация с участием семичленного цикла на промежуточных стадиях

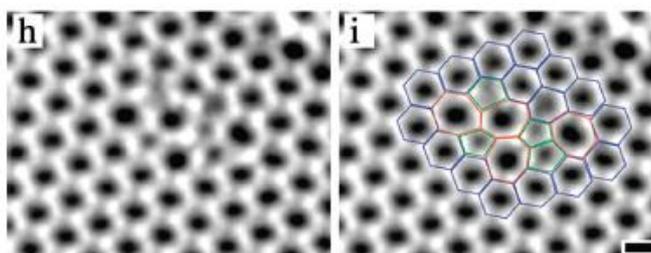


Рис. 5. Семичленные циклы на графене (электронная микрофотография)

Автором настоящей статьи предлагается универсальный метод трансформации фуллеренов, названный по аналогии SV-трансформацией (SVT). Основную роль в нем играет специально создаваемый в углеродной решетке поверхности дефект, представляющий собой восьмичленный цикл с одной двухвалентной вершиной. Дефект создается вблизи некоторого пентагона, а затем может перемещаться различным образом по поверхности фуллерена с последующим устранением вблизи другого пентагона. В результате начальный и конечный пентагон меняют свои положения. Необходимое условие образования дефекта – наличие возле пентагона двух смежных с ним и друг с другом гексагонов. При этом с поверхности удаляется один атом углерода и пропадают две молекулярные связи (рис. 6). Число различных способов образования дефекта вблизи выбранного пентагона зависит от числа примыкающих к нему гексагонов и варьирует от десяти (когда он окружен только гексагонами) до нуля (гексагоны попарно не смежны между собой или вообще отсутствуют).



Рис. 6. Образование (слева направо) и устранение (справа налево) дефекта

Возможность реального существования такого дефекта и рассматриваемого механизма отчасти подтверждается прямыми наблюдениями комбинаций пентагона и гептагона и их движением в структуре графена (рис. 7, слева) [14]. Дефект в паре со смежным гексагоном может быть заменен на такую комбинацию (рис. 7, справа).

Дефект может перемещаться в различных направлениях, локально изменяя структуру решетки за каждый шаг перемещения. В этом изменении, помимо дефекта, участвует от одного до трех гексагонов. Перемещения условно можно разделить на два вида – с изменением

и без изменения числа атомов на поверхности (рис. 8). В первом случае, по аналогии с операцией Эндо – Крото, в структуре появляются (или пропадают) два атома. Во втором случае, аналогично SWT, имеет место изомеризация. Всего из положения, указанного на рис. 8, возможно шесть различных направлений перемещения дефекта за один шаг. Если к дефекту примыкают пентагоны, то число возможных направлений уменьшается. Один акт трансформации (от начального пентагона до конечного) может включать в себя оба вида перемещений и изменять в результате число атомов на любое четное число.

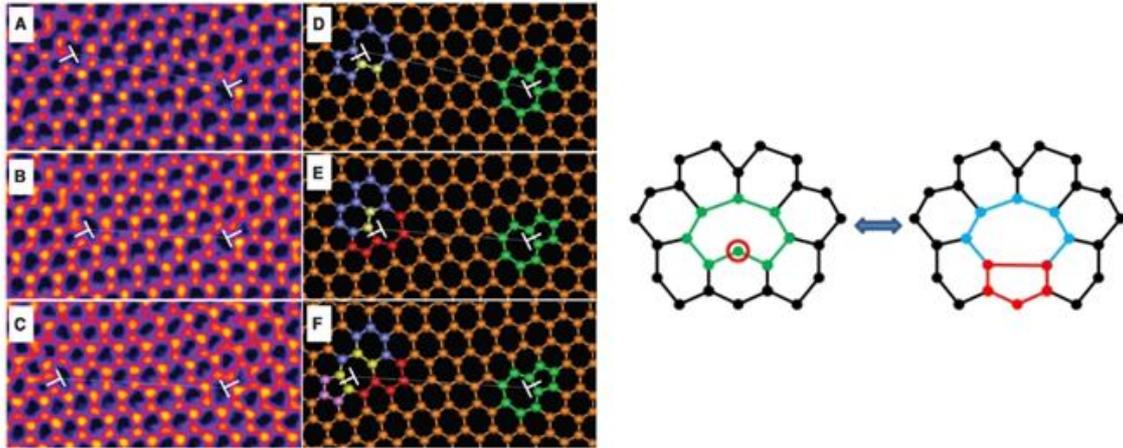


Рис. 7. Две комбинации пентагона и семиугольного цикла и их движение в графене (слева), а также их связь с дефектом предлагаемого механизма трансформации (справа).

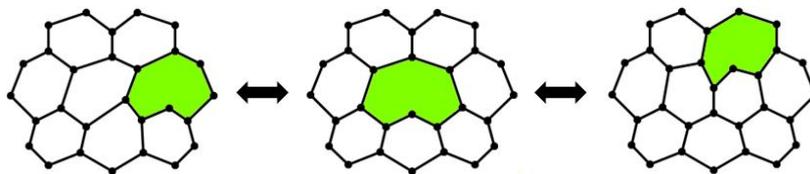


Рис. 8. Перемещения дефекта (зеленое) без изменения (стрелка слева) и с изменением (стрелка справа) числа атомов

Для завершения акта трансформации необходимо, чтобы дефект достиг другого пентагона и встал с ним в определенной ориентировке (как на рис. 6, справа, или зеркально симметрично к нему). После этого дефект устраняется с добавлением одного атома (удаленного при образовании дефекта). Пентагон при этом также меняет свое положение. Таким образом, в трансформации участвуют как минимум два пентагона – начальный и конечный. Результат трансформации не зависит от того, с какой стороны дефект подошел (в нужном положении) к конечному пентагону, но зависит от пути перемещения дефекта между промежуточными пентагонами, если они есть. Их можно обходить слева и справа вдоль направления движения дефекта, а также совершать вокруг них обороты. Число оборотов варьирует от 1 до 6, причем пять оборотов равносильны обходу пентагона с другой стороны, а шесть – отсутствию оборотов вокруг пентагона. При наличии более одного промежуточного пентагона картина усложняется в силу того, что число возможных путей перемещения дефекта зависит от очередности обхода промежуточных пентагонов и числа оборотов вокруг каждого промежуточного пентагона. Некоторые из путей обхода могут быть эквивалентными. Если на изменяемом фрагменте число атомов в результате SVT увеличивается, то начальный и конечный пентагоны сближаются, в противном случае – отдаляются и меняют свои положения, сохраняя расстояние между собой,

если число атомов на фрагменте остается тем же. В целом SVT демонстрирует большой потенциал структурных изменений фуллеренов.

Пример трансформации фрагмента поверхности фуллерена, включающий в себя оба вида перемещений дефекта, приведен на рис. 9.

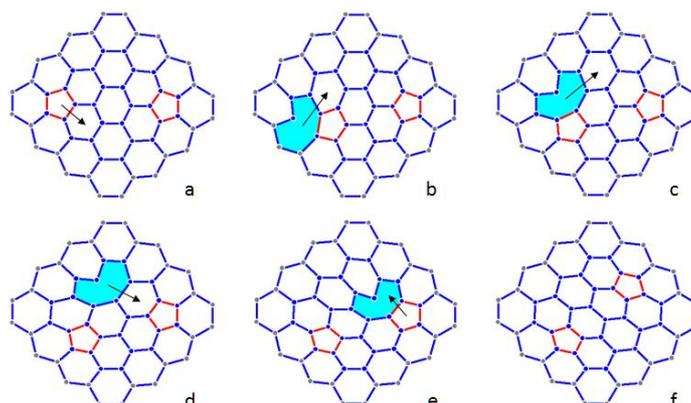


Рис. 9. Пример трансформации фрагмента поверхности фуллерена с помощью SVT. Направление перемещения дефекта (голубое) и пентагонов (красное) отмечено стрелками

Допускается многократная SVT: полученный фуллерен можно подвергнуть повторной трансформации и т. д. Повторная трансформация интересна тем, что не всегда один фуллерен можно перевести в другой одним актом SVT. Такие переходы дают основу структурной классификации, когда в один класс попадают фуллерены, переводимые друг в друга конечным числом SVT по аналогии с SWT [15].

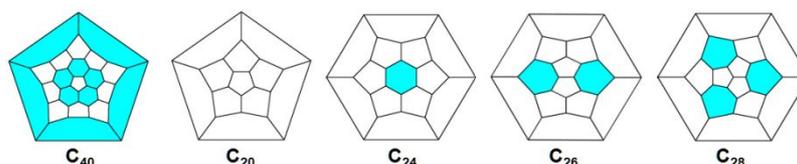


Рис. 10. Фуллерен  $C_{40}$  и фуллерены  $C_{20}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{26}$  и  $C_{28}$ , для которых не применима SVT

Для осуществления SVT необходимо, чтобы начальный и конечный пентагон образовывали фрагменты (рис 6, слева). Существует всего 4 фуллерена, для которых это невозможно:  $C_{20}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{26}$  и  $C_{28}$  (рис. 10, справа). Так как на них нет и смежных гексагонов, то к ним неприменима и трансформация Стоуна – Уолеса. Кроме того, необходимо, чтобы дефект мог переместиться от начального пентагона к конечному по гексагональной поверхности. В некоторых случаях это нереализуемо. Например, на рис. 10 слева изображен фуллерен  $C_{40}$ , у которого два изолированных пентагона окружены кольцом из оставшихся десяти пентагонов. Поэтому, выбрав изолированные пентагоны в качестве начального и конечного, невозможно провести между ними дефект. Тем не менее SVT применима к этой структуре при выборе другой пары начального и конечного пентагонов.

Трансформация Стоуна – Уолеса и ее обобщение являются частными случаями SVT. То же самое можно сказать и об операции Эндо – Крото, хотя при этом в дополнение к структуре, показанной на рис. 1, справа, нужно ввести в рассмотрение несколько смежных гексагонов. Все эти операции, включая SVT, состоят, в свою очередь, в видоизменении некоторого фрагмента поверхности фуллерена (см. рис. 3), поэтому их применением можно получать разнообразие возможных «патчей» с заданной внешней границей.

**Заключение. Выводы**

SVT представляет собой довольно гибкий механизм, позволяющий рассматривать всё многообразие фуллеренов в некоторой совокупности. Переводимые друг в друга SV-трансформацией фуллерены можно характеризовать как один объект, структурные изменения которого приводят к его различным текущим состояниям. Возможно, в реальности, подвергаясь различным воздействиям, молекулы фуллеренов именно так себя и ведут: непрерывно изомеризуясь или переходя в другие, более устойчивые формы в результате потери или приобретения атомов.

Для образования дефекта описанный механизм требует наличия попарно смежных одного пентагона и двух гексагонов, а также возможности перемещения дефекта по решетке до следующего пентагона и устранения дефекта возле него. Лучше всего это выполняется в случае, когда пентагоны находятся в гексагональной решетке на большом расстоянии друг от друга (например на гигантских икосаэдрических фуллеренах).

Трансформируемый участок поверхности фуллерена, содержащий пентагоны, можно рассматривать как фрагмент графена с дефектами (см. рис. 5 и 7). Это означает, что SVT применима и к трансформации графена.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Степенщиков Д. Г., Войтеховский Ю. Л. О структурных дефектах графена // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 364–368.
2. Stone A. J., Wales D. J. Theoretical studies of icosahedral C<sub>60</sub> and some related species // Chemical Physics Letters. 1986. Vol. 128. P. 501–503.
3. Endo M., Kroto H. W. Formation of carbon nanofibers // J. Phys. Chem. 1992. 96. P. 6941–6944.
4. Generalized Stone – Wales transformations / D. Babić, S. Bassoli, M. Casartelli et al. // Molecular Simulation. 1995. Vol. 14. P. 395–401.
5. Generalizations of the Stone – Wales rearrangement for cage compounds, including fullerenes / A. T. Balaban [et al.] // Journal of Molecular Structure (Theochem.). 1996. 363. P. 291–301.
6. Brinkmann G., Fowler P. W., Justus C. A catalogue of isomerization transformations of fullerene polyhedra // J. Chem. Inf. Comput. Sci. 2003. 43. P. 917–927.
7. Brinkmann G., Fowler P. W. A catalogue of growth transformations of fullerene polyhedra // J. Chem. Inf. Comput. Sci. 2003. 43. P. 1837–1843.
8. Fowler P. W. Localised models and leapfrog structures of fullerenes. // J. Chem. Soc. Perkin Trans. 1992. 2. P. 145–146.
9. Astakhova T. Y., Vinogradov G. A. New isomerization operations for fullerene graphs // Journal of Molecular Structure (Theochem.). 1998. 430. P. 259–268.
10. Babic D., Trinajstić N. Planar rearrangements of fullerenes // Journal of Molecular Graphics and Modelling. 2001. 19, P. 210–215.
11. Murry R. L., Strout D. L., Scuseria G. E. Theoretical studies of fullerene annealing and fragmentation // International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes. 1994. 138. P. 113–131.
12. Pyshnov M., Fedorov S. Structure and growth in the living tissue and in carbon nanotubes. 2011 // Cornell University Library: site. URL: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1106/1106.5705.pdf>.
13. Direct imaging of lattice atoms and topological defects in graphene membranes / J. C. Meyer [et al.] // Nano Lett. 2008. 8(11). P. 3582–3586.
14. Dislocation-driven deformations in graphene / J. H. Warner [et al.] // Science. 2012. 337. P. 209–212.
15. Fowler P. W., Manolopoulos D. E., Ryan R. P. Isomerisations of the fullerenes // Carbon. 1992. Vol. 30, No 8. P. 1235–1250.

**Сведения об авторе**

Степенщиков Дмитрий Геннадьевич – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник ФГБУН Геологического института Кольского научного центра РАН;  
e-mail: stepen@geoksc.apatity.ru

**Information about the author**

Dmitry G. Stepenshchikov – PhD (Geol.), scientific researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS;  
e-mail: stepen@geoksc.apatity.ru

**Библиографическое описание статьи**

Степенщиков Д. Г. О трансформации фуллеренов / Д. Г. Степенщиков // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 32–37.

**Bibliographic Description**

Dmitry G. Stepenshchikov. On Transformations of Fullerenes. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. 2016, vol. 1, pp. 32–37.

УДК 548.12

**УПОРЯДОЧЕНИЕ ВЫПУКЛЫХ ПОЛИЭДРОВ****Ю. Л. Войтеховский**

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

**Аннотация**

Предложен способ именования любого выпуклого полиэдра в виде числа-кода, по которому он восстанавливается однозначно. По именам многообразие выпуклых полиэдров строго упорядочивается. Установлены некоторые соотношения между именами и традиционными характеристиками выпуклых полиэдров, например, порядком группы автоморфизмов.

**Ключевые слова:**

*выпуклые полиэдры, асимметрия, порядок группы автоморфизмов, упорядочение.*

**ORDERING OF CONVEX POLYHEDRA****Yury L. Voytekhovsky**

Geological Institute of the KSC of the RAS

**Abstract**

The method to name any convex polyhedron by the numerical code is suggested in the paper. A polyhedron is uniquely fixed and can be built by its name. The variety of convex polyhedra is strictly ordered by their names. Some relationships between the names of convex polyhedra and their traditional characteristics, e.g. automorphism group orders, are found.

**Keywords:**

*convex polyhedra, asymmetry, automorphism group order, ordering.*

**Введение**

В работах [1–10] перечислены все комбинаторные типы выпуклых 4- ... -12-эдров и простых (в каждой вершине сходятся ровно 3 грани) 13- ... -16-эдров. Каждый тип охарактеризован не только порядком группы автоморфизмов (т. е. числом переименований вершин, сохраняющих их смежность), но и точечной группой симметрии, что делает результаты применимыми в кристаллографии. При этом установлен ряд обескураживающих фактов. Во-первых, подавляющее большинство (99.5 % для 16-эдров) форм комбинаторно асимметричны, т. е. относятся к примитивному виду симметрии триклинной сингонии. С ростом  $n$  «почти все»  $n$ -эдры комбинаторно асимметричны. Это перекликается с недавно отмеченной А. П. Хомяковым «кубо-триклинной инверсией» в открытии новых минеральных видов и, возможно, фиксирует соответствие природных кристаллических полиэдров фундаментальной характеристике евклидова пространства. Во-вторых, указанием набора граней и точечной группы симметрии комбинаторный тип полиэдра в общем случае не фиксируется. Его лучшим описанием остаётся изображение, например, в проекции на одну из граней [1, 2]. Изложенное ставит задачу однозначного и конструктивного описания любого выпуклого полиэдра, позволяющего по имени восстановить его комбинаторный тип. А поскольку асимптотически «почти все» они комбинаторно асимметричны, то речь идет о позитивном (без отрицающего «а») определении свойства, называемого асимметричностью.

### Как назвать выпуклый полиэдр?

Простейший в 3D выпуклый полиэдр – тетраэдр (симплекс). Его комбинаторный тип следует из имени. Но следует не с очевидностью, позволяющей нарисовать его рёберный граф, зная имя, а с помощью дополнительной информации о геометрии пространства. С ростом числа граней комбинаторное разнообразие полиэдров быстро растёт: 5-эдров – 2 (3-гранная призма и 4-гранная пирамида), 6-эдров – 7 (3 имеют имена: куб, 3-гональная бипирамида, 5-гранная пирамида), 7-эдров – 34, 8-эдров – 257, 9-эдров – 2606, 10-эдров – 32300, 11-эдров – 440564, 12-эдров – 6384634 и т. д. С ростом числа граней всё меньше полиэдров имеют имена. Асимптотически «почти все» они безымянны. Имена есть лишь у специфических форм, например, у полиэдров Платона, Архимеда, Каталани. В кубической сингонии приняты «конструктивные» кристаллографические имена: тригон-тритетраэдр, тетрагон-тритетраэдр, пентагон-тритетраэдр, тригон-гексатетраэдр, тригон-гексоктаэдр и т. д. Чтобы сконструировать эти формы, нужно знать алгоритм. Так, тригон-гексоктаэдр означает, что над каждой гранью октаэдра надстроена «пирамидка» из шести (гекс) треугольников (тригонов). Этот 48-эдр – самый многогранный среди простых форм кубической сингонии и, по-видимому, самый симметричный среди выпуклых 48-эдров. Из сказанного следует, что данная область знания математиками систематически не охвачена. А в кристаллографии она содержится в самой «поверхностной» (занятой описанием поверхности кристаллов) части – кристалломорфологии.

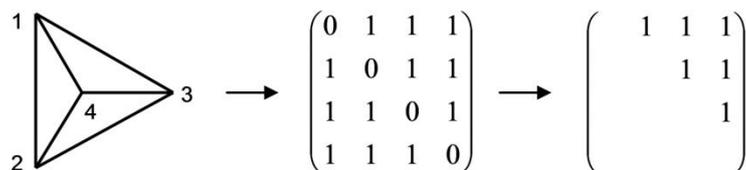


Рис. 1. Построение имени тетраэдра через матрицу смежности

Между тем почти очевиден способ численного описания полиэдра. Рассмотрим рёберный граф тетраэдра (рис. 1). Нумеруем его вершины. Из-за его высокой симметрии и малого числа вершин все нумерации эквивалентны. Строим матрицу смежности, симметричную относительно диагонали, заполненной нулями. Для определённости оставим верхний треугольник, который выпишем построчно. Полученный двоичный код и есть имя тетраэдра, оно короче в десятичной системе:

$$111111 = 10^5 + 10^4 + 10^3 + 10^2 + 10^1 + 10^0 \rightarrow 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 63.$$

Ясно, что по нему тетраэдр восстанавливается однозначно: переводим имя из десятичной системы в двоичную, заполняем верхний треугольник матрицы смежности (снизу вверх), достраиваем её, рисуем по ней реберный граф. Заметим, что предложенная форма описания рассматривает полиэдр как многовершинник (полиакрон).

### Сколько имен у $n$ -вершинника?

Для полиэдра с большим числом вершин при их различных нумерациях получаются различные матрицы смежности и имена. Для 5-вершинников возможны  $5! = 120$  нумераций вершин. Но 4-гранная пирамида имеет точечную группу симметрии  $4m\bar{3}$  с порядком группы автоморфизмов 8. Поэтому неэквивалентных нумераций вершин и имен у неё будет  $120 : 8 = 15$  (рис. 2). Для 3-гональной бипирамиды (второй возможный 5-вершинник, точечная группа симметрии  $-6m2$ , порядок группы автоморфизмов 12) число имен равно  $120 : 12 = 10$ . Приведенное рассуждение обобщается: у  $n$ -вершинника  $n! / p$  имен, где  $p$  – порядок группы автоморфизмов. (Для рассмотренного выше тетраэдра с точечной группой симметрии  $-43m$  получим:  $n! / p = 4! / 24 = 1$  – единственное имя).

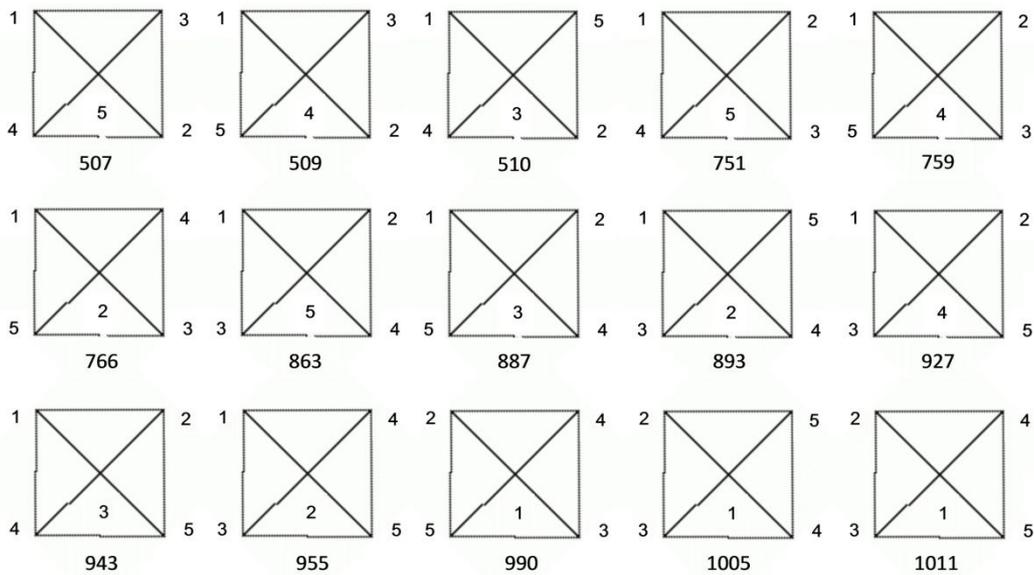


Рис. 2. 15 имен 4-гранной пирамиды, упорядоченных по возрастанию, и соответствующие нумерации вершин

Из общего правила следует, что у комбинаторно асимметричных  $n$ -вершинников ( $p = 1$ ) число имен равно  $n!$  Этот лежащий на поверхности результат интересен тем, что выражает свойство асимметричности полиэдра не через отрицание (отсутствие) симметричности, а через независимую характеристику (число вершин) и процедуру построения матрицы смежности, тоже не требующую теоретико-групповых преобразований. В указанном смысле асимметричный полиэдр факториален, симметричный – афакториален. Число имён  $n$ -вершинника – показатель его симметричности: при данном  $n$ , чем больше имён, тем ниже симметрия.

### Какое имя выбрать?

Ответ зависит от решаемой задачи. Минимальное (min) имя удобно для краткого описания полиэдра. Максимальное (max), возможно, указывает на сложность его строения в том же смысле, что и порядки групп автоморфизмов. На это указывает и число имён полиэдра. Можно предположить, что смысл содержится и в диапазоне, охватываемом именами данного полиэдра. Очевидно, по минимальным и максимальным (а также любым другим) именам полиэдры можно строго упорядочить. Но что это упорядочение несёт с собой? С целью первичного анализа данных упорядочим  $n$ -вершинники по минимальным и максимальным именам. Для удобства изображения и характеристики даны на рис. 3.

5-вершинники (по min именам): 507/1011 (8), 511/1022 (12). Одновременно они упорядочились по max именам и порядкам групп автоморфизмов (в скобках). Диапазоны имён перекрываются.

6-вершинники (по min именам): 7915/32531 (10), 7916/29327 (12), 7917/31571 (2), 7919 / 32681 (2), 7934 / 31582 (4), 7935 / 32754 (4), 16350 / 31583 (48). Они же (по max именам): 7916/29327 (12), 7917/31571 (2), 7934/31582 (4), 16350/31583 (48), 7915/32531 (10), 7919 / 32681 (2), 7935 / 32754 (4). Связь упорядочений и порядков групп автоморфизмов не подтвердилась, диапазоны имён перекрываются для любых двух полиэдров.

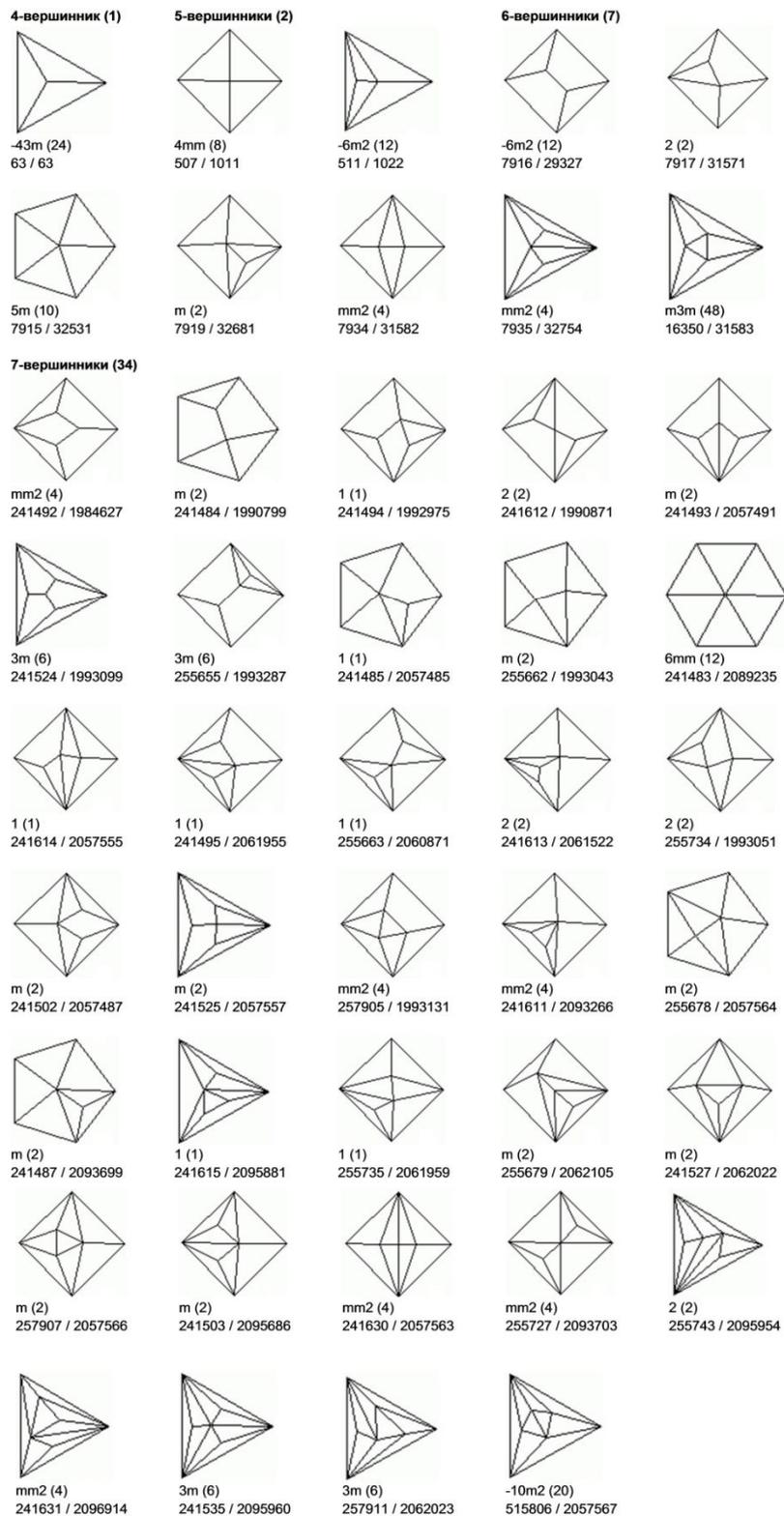


Рис. 3. Все 4- ... 7-вершинники в проекции на одну из граней, их точечные группы симметрии (в международной нотации), порядки групп автоморфизмов (в скобках),  $m$  и  $m$ ах имена (через слеш)

7-вершинники (по  $\min$  именам): 241483 / 2089235 (12), 241484 / 1990799 (2), 241485 / 2057485 (1), 241487 / 2093699 (2), 241492 / 1984627 (4), 241493 / 2057491 (2), 241494 / 1992975 (1), 241495 / 2061955 (1), 241502 / 2057487 (2), 241503 / 2095686 (2), 241524 / 1993099 (6), 241525 / 2057557 (2), 241527 / 2062022 (2), 241535 / 2095960 (6), 241611 / 2093266 (4), 241612 / 1990871 (2), 241613 / 2061522 (2), 241614 / 2057555 (1), 241615 / 2095881 (1), 241630 / 2057563 (4), 241631 / 2096914 (4), 255655 / 1993287 (6), 255662 / 1993043 (2), 255663 / 2060871 (1), 255678 / 2057564 (2), 255679 / 2062105 (2), 255727 / 2093703 (4), 255734 / 1993051 (2), 255735 / 2061959 (1), 255743 / 2095954 (2), 257905 / 1993131 (4), 257907 / 2057566 (2), 257911 / 2062023 (6), 515806 / 2057567 (20).

Они же (по  $\max$  именам): 241492 / 1984627 (4), 241484 / 1990799 (2), 241612 / 1990871 (2), 241494 / 1992975 (1), 255662 / 1993043 (2), 255734 / 1993051 (2), 241524 / 1993099 (6), 257905 / 1993131 (4), 255655 / 1993287 (6), 241485 / 2057485 (1), 241502 / 2057487 (2), 241493 / 2057491 (2), 241614 / 2057555 (1), 241525 / 2057557 (2), 241630 / 2057563 (4), 255678 / 2057564 (2), 257907 / 2057566 (2), 515806 / 2057567 (20), 255663 / 2060871 (1), 241613 / 2061522 (2), 241495 / 2061955 (1), 255735 / 2061959 (1), 241527 / 2062022 (2), 257911 / 2062023 (6), 255679 / 2062105 (2), 241483 / 2089235 (12), 241611 / 2093266 (4), 241487 / 2093699 (2), 255727 / 2093703 (4), 241503 / 2095686 (2), 241615 / 2095881 (1), 255743 / 2095954 (2), 241535 / 2095960 (6), 241631 / 2096914 (4). Связь упорядочений и порядков групп автоморфизмов не подтвердилась. Это хорошо видно по асимметричным полиэдрам (подчёркнуты), распределённым в многообразии равномерно. То есть, если  $\min$  ( $\max$ ) имя полиэдра указывает на его меньшую или большую сложность, то это не та сложность, которая схвачена порядком его группы автоморфизмов: симметричный полиэдр – прост, асимметричный – сложен. Диапазоны имён перекрываются для любых двух полиэдров.

### Упорядочение классов

Рассмотрим диапазоны имен для 4- ... 7-вершинников: [63], [507, 1022], [7915, 32754], [241483, 2096914]. Как видим, они не перекрываются. Нетрудно показать, что это верно в общем случае и ведет к упорядочению классов  $n$ -вершинников, а именно: при любом упорядочении  $n$ -вершинников внутри классов диапазоны имен для разных  $n$  не перекрываются. Обозначим  $\max$  имя  $n$ -вершинника  $N(n)_{\max}$ ,  $\min$  имя  $(n + 1)$ -вершинника  $N(n + 1)_{\min}$ . Первое оценим сверху, второе – снизу.

$N(n)_{\max}$  не превосходит имени, составленного из единиц, заполняющих верхний треугольник матрицы смежности:

$$N(n)_{\max} \leq 1 + 10 + \dots + 10^{n(n-1)/2-1} = [10^{n(n-1)/2} - 1] / 9.$$

Точная оценка достигается, по-видимому, только для имени тетраэдра (рис. 1).

Чтобы построить нижнюю оценку для  $N(n + 1)_{\min}$ , заметим, что в каждой вершине полиэдра сходятся не менее трёх рёбер. Поставив в конце первой строки матрицы смежности три единицы и заполнив верхний треугольник нулями, построим имя, являющееся нижней оценкой для  $N(n + 1)_{\min}$ . Более того, оставим лишь последнюю единицу, что даёт весьма грубую, но достаточную оценку  $10^{n(n-1)/2}$ :

$$N(n)_{\max} \leq [10^{n(n-1)/2} - 1] / 9 < 10^{n(n-1)/2} < N(n + 1)_{\min},$$

что и требовалось доказать.

### Заключение

Предложенный метод именования выпуклого полиэдра через матрицу смежности выявил три интересных факта.

1. Полиэдр однозначно восстанавливается по любому имени.
2. Число имен  $n$ -вершинника равно  $n! / p$ , где  $p$  – порядок группы автоморфизмов. Тем самым ускользающая от конструктивного определения категория асимметричности полиэдра

выражается через его независимую и фундаментальную характеристику – число вершин. Асимметричный полиэдр факториален, симметричный – афакториален.

3. При любом упорядочении полиэдров в классе (при данном  $n$ ) классы упорядочиваются без перекрытий. Упорядочения в классе по  $\min$  и  $\max$  именам, а также порядкам групп автоморфизмов на первый взгляд не согласуются. Это означает лишь, что связь между ними пока не найдена. Но она должна быть, поскольку имя полиэдра определяет его со всеми комбинаторными свойствами. И это определяет заманчивую перспективу дальнейших исследований.

### Благодарность

Автор благодарит к.г.-м.н. Д. Г. Степенщикова за компьютерный расчет имен 7-вершинников.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Войтеховский Ю. Л., Степенщиков Д. Г. Комбинаторная кристалломорфология. Кн. IV. Выпуклые полиэдры. Т. I. 4- ... 12-эдры. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. 833 с.
2. Войтеховский Ю. Л., Степенщиков Д. Г. Комбинаторная кристалломорфология. Кн. IV. Выпуклые полиэдры. Т. II. Простые 13- ... 16-эдры. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. 828 с.
3. Voytekhovskiy Y. L. On the symmetry of 4- to 11-hedra // *Acta Cryst.* 2001. A 57. P. 112–113.
4. Voytekhovskiy Y. L. The Fedorov algorithm revised // *Acta Cryst.* 2001. A 57. P. 475–477.
5. Voytekhovskiy Y. L., Stepenshchikov D. G. On the symmetry of 9- and 10-hedra // *Acta Cryst.* 2002. A 58. P. 404–407.
6. Voytekhovskiy Y. L., Stepenshchikov D. G. On the symmetry of simple 12- and 13-hedra // *Acta Cryst.* 2002. A 58. P. 502–505.
7. Voytekhovskiy Y. L., Stepenshchikov D. G. On the symmetry of 11-hedra // *Acta Cryst.* 2003. A 59. P. 195–198.
8. Voytekhovskiy Y. L., Stepenshchikov D. G. On the symmetry of simple 14- and 15-hedra // *Acta Cryst.* 2003. A 59. P. 367–370.
9. Voytekhovskiy Y. L., Stepenshchikov D. G. The variety of convex 12-hedra revised // *Acta Cryst.* 2005. A 61. P. 581–583.
10. Voytekhovskiy Y. L., Stepenshchikov D. G. On the symmetry of simple 16-hedra // *Acta Cryst.* 2006. A 62. P. 230–232.

### Сведения об авторе

Войтеховский Юрий Леонидович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор ФГБУН Геологического института Кольского научного центра РАН;  
e-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

### Information about the author

Yury L. Voytekhovskiy – Dr. Sci. (Gology & Mineralogy), Professor; Director of the Geological Institute of the KSC of the RAS;  
e-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

### Библиографическое описание статьи

Войтеховский Ю. Л. Упорядочение выпуклых полиэдров / Ю. Л. Войтеховский // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 37–43.

### Bibliographic Description

Yury L. Voytekhovskiy. Ordering of Convex Polyhedra. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 1, pp. 37–43.

УДК 622.831.1/3

## ВАРИАНТЫ БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ СБЛИЖЕННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПРИ РАСКОНСЕРВАЦИИ РУДНИКА «УМБОЗЕРО»\*

**С. Н. Савченко, А. В. Ловчиков**

ФГБУН Горный институт Кольского научного центра РАН

### Аннотация

Рудник «Умбозеро» законсервирован вскоре после сильнейшего техногенного землетрясения (17.08.1999 г.,  $M_L = 5.1$ ), разрушившего рудник, а в 2009 г. затоплен. В связи с дефицитом редкометалльного сырья в России возможна расконсервация рудника. Рассматривается напряженное состояние пород вокруг очистных выработок рудника при выемке двух сближенных залежей в высоко тектонически напряженном массиве. Одновременная выемка залежей чревата опасностью горных ударов. Методами численного моделирования исследовано влияние порядка отработки залежей на напряженное состояние пород и их удароопасность. Проанализировано влияние на удароопасность защитных мероприятий и закладки выработанного пространства.

### Ключевые слова:

*сближенные залежи, гравитационно-тектонические напряжения, междупластье, удароопасность, разгрузка, закладка.*

### THE UMBOZERO MINE REACTIVATION: VARIANTS OF SAFE MINING OF ADJACENT ORE BODIES

**Stepan N. Savchenko, Aleksandr V. Lovchikov**

Mining Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

Soon after the strongest mining-induced earthquake (17.08.1999,  $M_L = 5.1$ ) had destroyed the Umbozero mine, it was closed and flooded in 2009. However, the mine may be reactivated because of lack of rare-metal raw materials in Russia. The paper examines stress state of rocks around stope excavations when two adjacent ore bodies are mined in the highly stressed rock mass. Concurrent excavation of the both ore bodies is fraught with rock bursting. Numerical modeling methods were used to research impact of the bodies mining order on the stress state of rocks and the rock burst hazard. Influence of protective measures and mined space backfilling was analyzed on rock burst hazard.

### Keywords:

*adjacent ore bodies, gravity-tectonic stresses, interbed, rock burst hazard, unloading backfilling.*



Рудник «Умбозеро» законсервирован в 2004 г., а в 2009 – затоплен по экономическим соображениям. Одной из основных причин консервации рудника следует считать то обстоятельство, что он не восстановился полностью после разрушительного техногенного землетрясения (горно-тектонического удара) 17.08.1999 г. ( $M_L = 5.1$ ). В результате горно-тектонического удара в массиве рудника образовалась наклонная трещина (плоскость сдвига) от междупластья двух залежей,

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-04323.

разрабатываемых рудником, до дневной поверхности, расположенной под углом  $40^\circ$  к горизонту. Горные выработки нижней залежи в результате были разрушены на площади 650 тыс. м<sup>2</sup> [1].

Причиной горно-тектонического удара послужила надработка верхней рудной залежью мощностью 5.5 м отработанного пространства нижней залежи мощностью 2.5 м, располагаемого на 60 м ниже по вертикали от верхней залежи под действием больших гравитационно-тектонических напряжений, существующих в массиве [2]. Схема распределения напряжений вокруг выработок обеих залежей и трещины сдвига приведена на рис. 1.

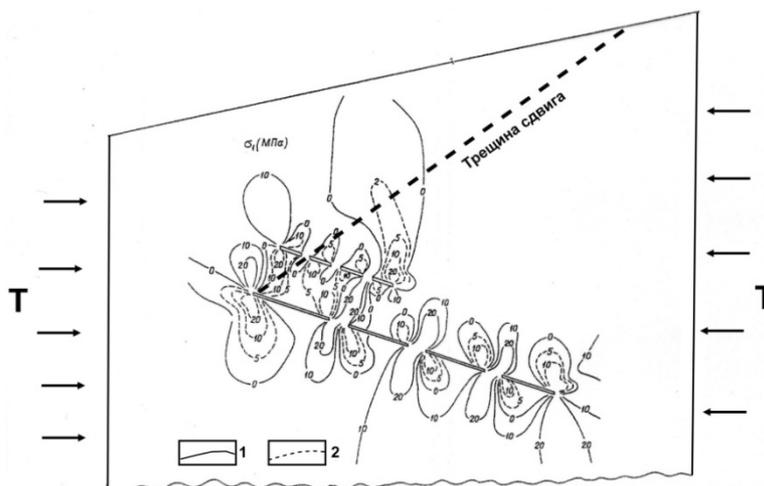


Рис. 1. Распределение напряжений  $\sigma_1$  в поперечном сечении шахтного поля рудника «Умбозеро» перед горно-тектоническим ударом по результатам математического моделирования: 1 – напряжения сжатия; 2 – напряжения растяжения

При отработке свиты рудных залежей в горном деле сначала отрабатывается верхняя залежь, затем следующая по порядку от верхней и т. д. На руднике «Умбозеро» первоначальная отработка нижней залежи была вынужденной, поскольку верхняя залежь к началу эксплуатации рудника считалась некондиционной и не предполагалась к разработке. Тем не менее интересно рассмотреть, как менялось бы напряженное состояние пород вокруг выработок, если бы первоначально отрабатывалась верхняя залежь? Задача решалась методом граничных элементов в плоской (двухмерной) постановке. Схема решения задачи представлена на рис. 2.

Авторы настоящей статьи предполагают, что в массиве горных пород действуют гравитационное поле напряжений ( $\sigma_y = \gamma H$ ,  $\sigma_x = \lambda \gamma H$ ) и горизонтальные тектонические напряжения  $T_x = -50$  МПа. Массив горных пород представлен разновидностями, имеющими следующие характеристики: предел прочности при одноосном сжатии  $[\sigma_c] = -200$  МПа, при растяжении  $[\sigma_p] = 10$  МПа, модуль Юнга  $E = 5 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$ . Пороговые величины удельной энергии деформирования от действия сжимающих напряжений  $[w_c] = 0.4 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>, а при растяжении  $[w_p] = 0.4 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>. Следовательно, величины сжимающих напряжений, концентрация которых в окрестности выработок достигает значений  $\sigma_2 \approx (100-150)$  МПа, не вызовут существенных опасений. Другая компонента главных напряжений  $\sigma_1$ , изменяющаяся в окрестности выработок до 10–15 МПа, будет наиболее опасной.

Сначала исследовалось напряженное состояние пород вокруг выработок при отработке четырех камер верхней залежи (рис. 1). Последовательность изменения наиболее опасных напряжений  $\sigma_1$  вокруг камер при изменении их числа (ширина камер – 20 м, высота – 5.5 м, ширина целиков – 10 м) от одной до четырех показана на рис. 3.

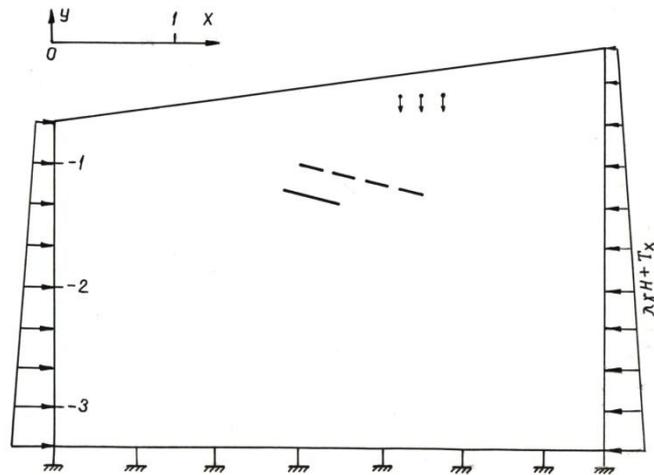


Рис. 2. Схема расчетной модели и граничные условия, действующие в массиве горных пород

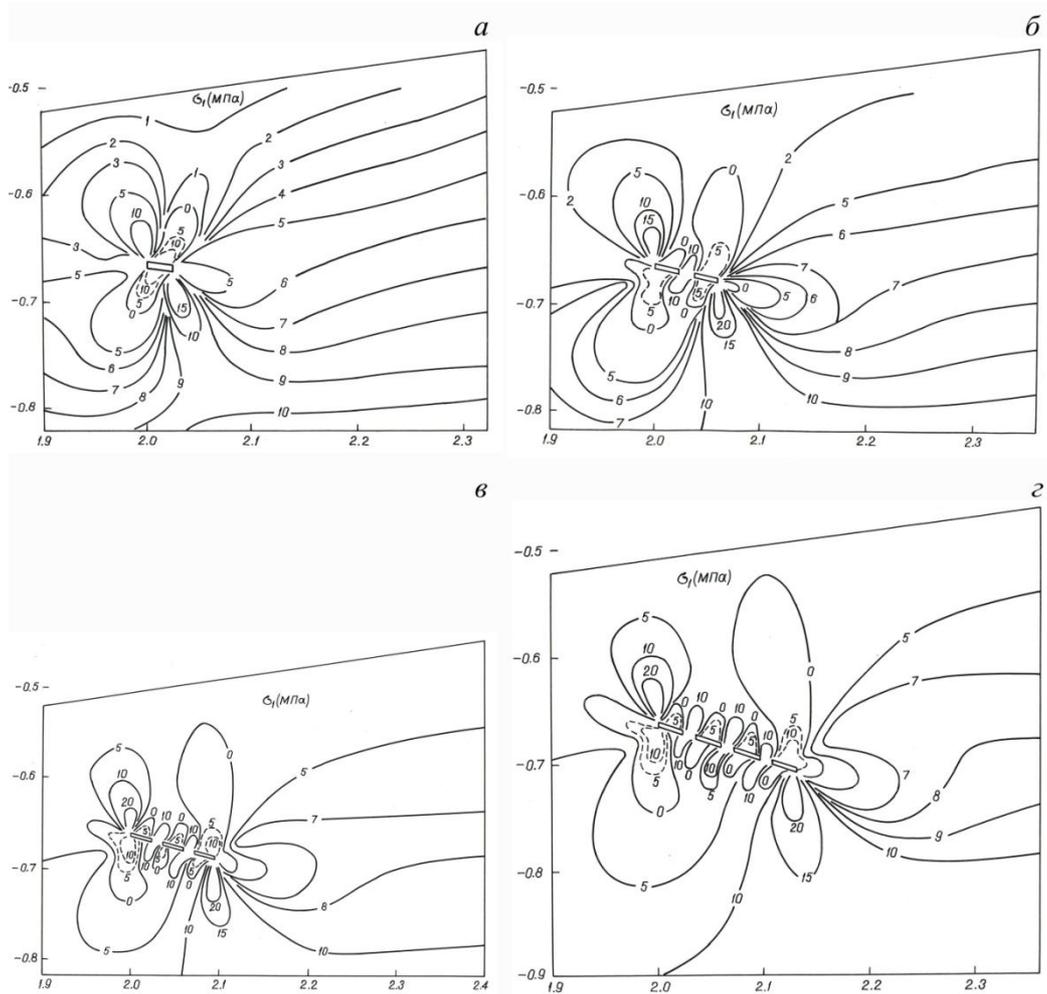


Рис. 3. Распределение наименьших напряжений  $\sigma_1$  при отработке камер верхней залежи: а – одной; б – двух; в – трех; г – четырех камер

Растягивающие (пунктирные изолинии) напряжения  $\sigma_1$  располагаются в массиве почвы и кровли камеры (рис. 3). Их величина достигает  $\sigma_1 = 10$  МПа, т. е. предельных значений. Линейные размеры зон, где действуют растягивающие напряжения (до изолинии  $\sigma_1 = 0$ ), равны  $2-2.5 l$ , где  $l$  – длина камеры. Направление действия растягивающих напряжений параллельно границе камеры. Следовательно, трещины, возникающие при этом, будут направлены в кровле и почве камер почти вертикально. Очевидно, что их распространение (рост) в массив опасно.

Дальнейшая отработка верхней залежи двумя, тремя, четырьмя камерами (рис. 3 б, в, г) сохраняет ту же тенденцию:

- в почве и кровле  $\sigma_1$  растягивающие;
- величина растягивающих  $\sigma_1$  в почве первой камеры увеличилась до  $\sigma_1 = 15$  МПа, а линейный размер зоны, где действуют растягивающие  $\sigma_1$  в кровле нижних камер, достигает почти дневной поверхности;
- в массивах целиков  $\sigma_1$  сжимающие и не превышают (30–40) МПа;
- увеличиваются значения сжимающих напряжений  $\sigma_1$  в верхней части кровли первой камеры.

Увеличение растягивающих напряжений  $\sigma_1$  в почве первой и кровле нижней камер вызывает опасение возникновения разрушения пород. Однако в целом отработка верхней залежи безопасна, за исключением локальных участков в кровле и почве отдельных камер.

В условиях рудника «Умбозеро» продуктивными являются две сближенные залежи, обе из которых следует обрабатывать. Поскольку массив, в котором расположены залежи, тектонически высоконапряженный, целесообразно рассмотреть, в каком порядке следует обрабатывать залежи. На рис. 4 представлена картина распределения напряжений  $\sigma_1$  для случая, когда после отработки верхней залежи отработана одна камера на нижней залежи с геометрическими параметрами, применяемыми на руднике (рис. 1).

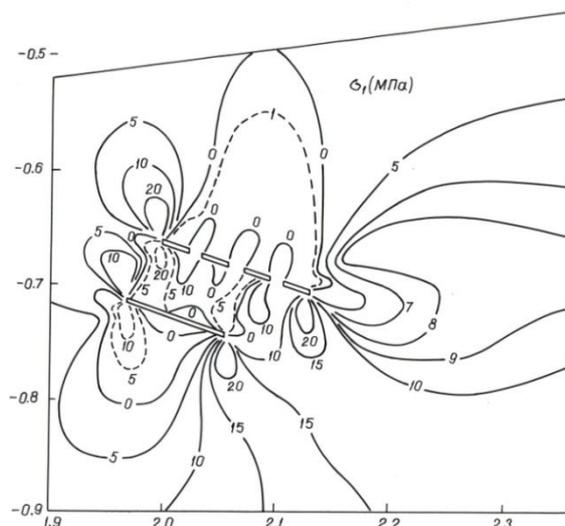


Рис. 4. Изолинии распределения главного напряжения  $\sigma_1$  при отработке четырех камер верхней залежи и одной камеры нижней залежи

При возникновении растягивающих напряжений  $\sigma_1$  во всей прослойке между верхней и нижней залежами (рис. 4), в почвах первой верхней камеры и нижней (в левой части)  $\sigma_1 = 20$  МПа. Над камерами верхней залежи растягивающие напряжения распространяются до дневной поверхности. Иначе говоря, возникает геомеханическая ситуация, которая предшествовала техногенному землетрясению 17.08.1999 г. Следовательно, такой порядок

отработки сближенных залежей (сначала верхняя, а затем нижняя) менее эффективен в случае добычи руды до землетрясения.

Одновременная отработка верхней и нижней залежей приводит к возникновению ударной ситуации еще раньше. Изолинии  $\sigma_1$  в случае одновременной отработки камер на верхней и нижней залежах показаны на рис. 5. Здесь удароопасная ситуация прослеживается сразу: высокие значения  $\sigma_1 > 10$  МПа в левой части отработок, линейные размеры зоны растягивающих напряжений аналогичны предыдущему случаю.

Таким образом, анализ рассматриваемых выше двух случаев отработки сближенных залежей показывает их неэффективность.

Во избежание горных ударов в высоконапряженных массивах используется способ разгрузки концентрации напряжений при помощи разгрузочных щелей, которые создаются рядами близко расположенных друг к другу скважин, либо посредством камуфлетного взрывания зарядов ВВ в рядах скважин [3]. Предположим, что разгрузочная вертикальная щель длиной 30 м образована в нижней части кровли нижней камеры.

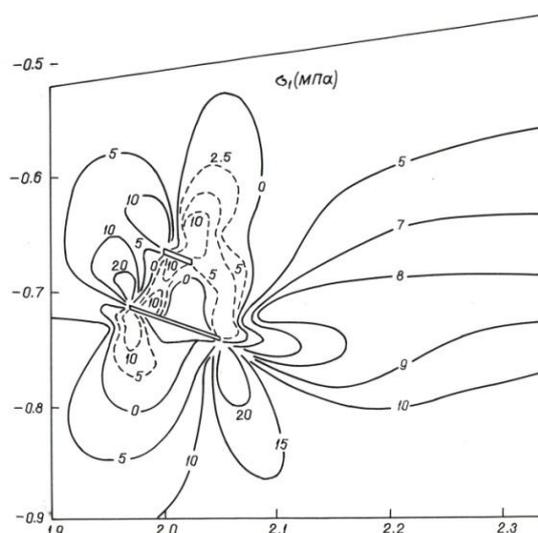


Рис. 5. Изолинии распределения главного напряжения  $\sigma_1$  при совместной отработке одной камеры верхней залежи и одной камеры нижней залежи

Показан характер распределения напряжений  $\sigma_1$  при отработке камер в верхней и нижней залежах с образованием разгрузочной щели в нижней части кровли камеры нижней залежи (рис. 6). Сравнивая рис. 5 и 6, убеждаемся, что вариант с образованием разгрузочной щели в значительной мере улучшает состояние пород над кровлей верхней залежи. Здесь область действия растягивающих напряжений  $\sigma_1$  имеет размеры  $90 \times 40 \text{ м}^2$  по сравнению с  $140 \times 70 \text{ м}^2$  для отработки без щели. При этом расстояние от линии  $\sigma_1 = 0$  до дневной поверхности в вертикальном направлении составляет 80 м.

Однако отработка второй камеры в верхней залежи (рис. 7) приводит к увеличению зоны растягивающих напряжений  $\sigma_1$  до прежних размеров:  $130 \times 60 \text{ м}^2$ .

Если отработать в нижней залежи вторую камеру с вертикальной разгрузочной щелью, оставив в верхней залежи одну камеру (рис. 8 а), то напряженное состояние пород в кровле этой камеры практически останется таким же, как и в случае отработки одиночных камер в верхней и нижней залежах (рис. 5). Разработка второй камеры в верхней залежи приводит к образованию растягивающих напряжений  $\sigma_1$  в области  $150 \times 60 \text{ м}^2$  (рис. 8 б), и расстояние от линии  $\sigma_1 = 0$  до дневной поверхности уменьшается до 40 м.

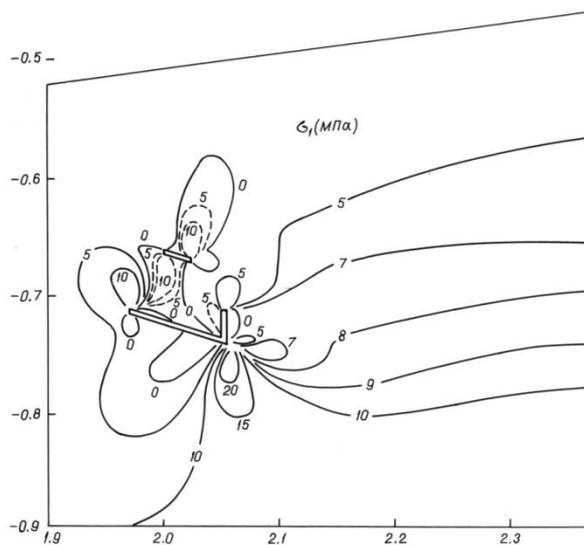


Рис. 6. Распределение главного напряжения  $\sigma_1$  при совместной отработке камер верхней и нижней залежей с образованием разгрузочной щели в нижней части кровли камеры нижней залежи

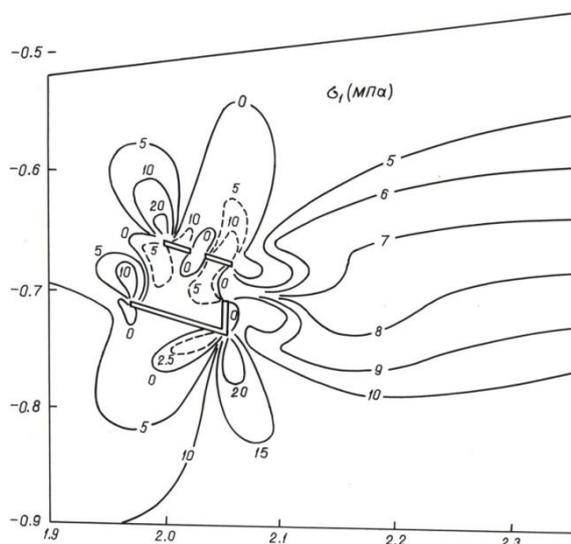


Рис. 7. Распределение главного напряжения  $\sigma_1$  при совместной отработке двух камер в верхней и одной в нижней залежи с образованием разгрузочной щели в нижней части кровли камеры нижней залежи

Таким образом, совместная отработка верхней и нижней залежей даже с образованием вертикальных разгрузочных щелей в кровле нижних камер приводит к удароопасной ситуации.

Одним из распространенных способов влияния на напряженно-деформированное состояние пород вокруг выработок является закладка пустот выработанного пространства. Характер распределения напряжений  $\sigma_1$  при отработке двух камер нижней залежи (без разгрузочной щели) и четырех камер в верхней залежи с закладкой выработанного пространства показан на рис. 9. Здесь величина зоны растягивающих напряжений определяется механическими свойствами закладочного материала. Случай закладки камер разрушенными пустыми породами (модуль Юнга  $E_3 = 5 \cdot 10^3$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu_3 = 0.3$ ), где размер зоны растягивающих напряжений  $\sigma_1$  составляет  $130 \times 90$  м<sup>2</sup> (см. рис. 9). При этом расстояние от линии  $\sigma_1 = 0$  до дневной поверхности равно 70 м, а величины растягивающих напряжений  $\sigma_1$

не превышают 2.5 МПа. В породах между залежами и в отработанном пространстве действуют сжимающие напряжения  $\sigma_1$ , а растягивающие  $\sigma_1$  формируются в левой части почвы первой камеры и правой части кровли второй камеры нижней залежи. Таким образом, закладка выработанного пространства верхней залежи является наиболее безопасным способом выемки двух залежей.

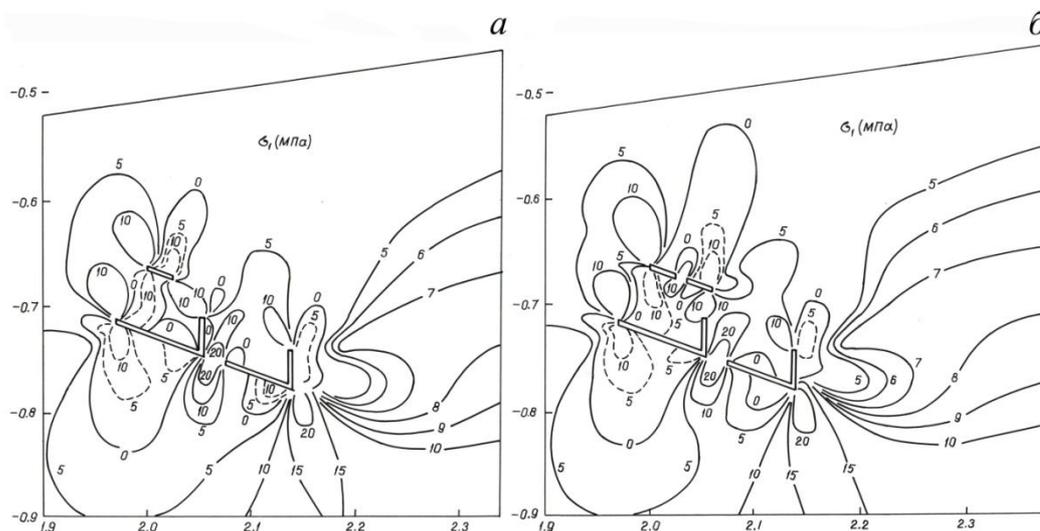


Рис. 8. Распределение главного напряжения  $\sigma_1$  при совместной отработке камер: а – верхней (одна выработка) и нижней залежей (две выработки); б – верхней (две выработки) и нижней залежей (две выработки) с образованием разгрузочных щелей в нижней части кровли камер нижней залежи

В настоящее время ввиду дефицита в России редкометалльного сырья, единственным поставщиком которого является рудник «Карнасурт», может быть поставлен вопрос о расконсервации рудника «Умбозеро». Откачать воду из рудника при современной высокопроизводительной насосной технике не представляет затруднений. Однако после откачки воды уровень геодинамической опасности выработок рудника все равно останется высоким [1]. При возобновлении горных работ на руднике для создания безопасных условий выемки двух залежей, как показывают результаты численного моделирования, в первую очередь необходимо выполнить закладку камер верхней залежи разрыхленными породами. После этого выемку нижней залежи и верхней (с закладкой) можно выполнять безопасно по условиям удароопасности.

## Выводы

Из приведенного анализа численного исследования напряженного состояния пород можно сделать следующие выводы:

- 1) напряженное состояние горных пород в кровле камер при совместной отработке двух сближенных залежей на руднике «Умбозеро» наиболее безопасно при возведении закладки выработанного пространства камер верхней залежи;
- 2) при расконсервации рудника для создания условий, не опасных по фактору горных ударов, необходимо осуществлять последовательную закладку выработок верхней залежи;
- 3) порядок отработки сближенных залежей при имеющихся геометрических параметрах отработки не имеет значения, так как в любом случае приводит к удароопасной ситуации. Снижения удароопасности можно добиться только за счет существенного изменения размеров камер и целиков.

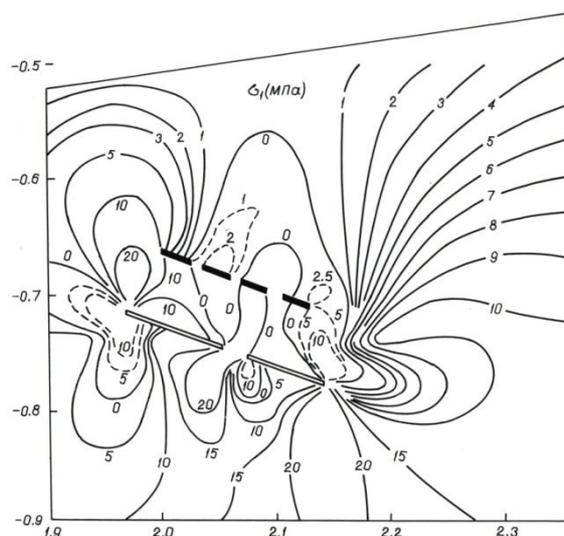


Рис. 9. Распределение главного напряжения  $\sigma_1$  при совместной отработке четырех камер в верхней залежи и закладкой их выработок и двумя камерами в нижней залежи без образования разгрузочных щелей

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ловчиков А. В., Савченко С. Н. Оценка последствий затопления рудника «Умбозеро» // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды XX Всероссийской научной конференции. Новосибирск, 2013. С. 331–336. 2. Савченко С. Н., Ловчиков А. В., Козырев А. А. Ретроспективный анализ очага техногенного землетрясения на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г. // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Апатиты, 2004, С. 170-179. 3. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / А. А. Козырев [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 2. 162 с.

#### Сведения об авторах

Савченко Степан Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН;  
e-mail: trout@goi.kolasc.net.ru

Ловчиков Александр Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН;  
e-mail: vocson@goi.kolasc.net.ru

#### Information about the authors

Stepan N. Savchenko – Dr.Sci. (Eng.), leading researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS;  
e-mail: trout@goi.kolasc.net.ru

Aleksandr V. Lovchikov – Dr.Sci. (Eng.), chief researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS;  
e-mail: vocson@goi.kolasc.net.ru

#### Библиографическое описание статьи

Савченко С. Н. Варианты безопасной отработки сближенных залежей при расконсервации рудника «Умбозеро» / С. Н. Савченко, А. В. Ловчиков // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 44–51.

#### Bibliographic Description

Stepan N. Savchenko, Aleksandr V. Lovchikov. The Umbozero Mine Reactivation: Variants of Safe Mining of Adjacent Ore Bodies. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. 2016, vol. 1, pp. 44-51.

УДК622.02.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ  
И ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ВМФ  
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ РОССИИ**

**В. П. Конухин, Н. Н. Абрамов, Е. В. Кабеев**  
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация**

Рассмотрены методологические аспекты и приведены конкретные результаты геофизического контроля за состоянием грунтового основания при возведении объектов повышенной ответственности в западном секторе Российской Арктики на примере строительства объектов переработки и долговременного хранения радиоактивных отходов (РО) 120 реакторных отсеков утилизируемых атомных подводных лодок (ПДХ РО АПЛ) в Сайда-Губе.

**Ключевые слова:**

*микросейсмическое районирование, уплотнение грунтов, сейсмотомография, скорость волны, допустимый диапазон, физико-механические свойства.*

**METHODICAL PARTICULARITIES IN GEOPHYSICAL STUDIES WHEN CONSTRUCTING PROCESSING AND LONG-TERM STORAGE FACILITIES FOR NAVY'S RADIOACTIVE WASTE IN THE RUSSIAN NORTHERN-WESTERN REGION**

**Vladimir P. Konuhin, Nikolai N. Abramov, Evgeny V. Kabaev**  
Mining Institute of the KSC of the RAS

**Abstract**

The article deals with methodological aspects and gives specific results of geophysical control over foundation soil state while constructing facilities of enhanced responsibility in the West Sector of the Russian Arctic based on the example of construction of Long-term Storage Facility for 120 reactor compartments of dismantled nuclear submarines (LSF NS) in Saida Bay.

**Keywords:**

*microseismic zoning, soils hardening, seismic tomography, wave velocity, permissible range, physical-chemical properties.*



**Введение**

Арктика – уникальный регион нашей планеты, роль которого как на российском, так и на глобальном уровне трудно переоценить. Именно в Арктике находится значительная часть ещё нетронутых ресурсов минерального сырья и прежде всего углеводородов. Учитывая предстоящее освоение шельфа и развитие транспортной

инфраструктуры в акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей, особую значимость приобретают задачи обеспечения безопасности окружающей среды в регионе. При этом одна из первоочередных задач – обеспечение радиационной и ядерной безопасности, напрямую связанное с ликвидацией наследия холодной войны и многолетней деятельности подводного атомного флота ВМФ и Атомного ледокольного флота РФ. Этим целям служит наземный Пункт долговременного хранения 120 реакторных отсеков утилизируемых атомных

подводных лодок (ПДХ АПЛ) и объект переработки в Сайда-Губе, к строительству которого были предъявлены самые высокие требования по безопасности, а проводимые при его строительстве оперативные геофизические исследования были направлены на информационное сопровождение строительства.

### Методы исследований

Требования решения инженерных проблем строительства поставили задачи получения информации о сейсмичности участка строительства для проведения замещения слабых грунтов на скально-щебеночную смесь с обеспечением максимально высоких плотностных характеристик грунта. Для этих целей использован геофизический мониторинг вмещающих грунтов на основе метода пространственно-временной томографии среды (СПВТ). В результате проводимых исследований предложены и внедрены оригинальные методики построения геолого-геофизических разрезов для осуществления микросейсмического районирования площадки строительства, уточнения структуры подстилающего породного массива и, что не менее важно, оперативного мониторинга качества уплотнения замещенных грунтов в пространстве и во времени.

Использование специальных эталонных блоков уплотненных скально-щебеночных грунтов и сравнение с их параметрами вновь возводимых насыпей позволило обеспечить создание единого стабильного основания под всеми сооружениями и строениями объектов.

### Методика проведения микросейсморайонирования (МСР)

На начальной стадии работ на базе метода сейсмической томографии была разработана методика расчета поправок сейсмической балльности по фактически определенным в натуральных условиях характеристикам сейсмических жесткостей различных по составу и структуре блоков пород обследуемого участка с использованием корреляционных зависимостей «скорость сейсмической волны – плотность пород».

Для реальной слоистой среды средняя сейсмическая жесткость пород в разрезе определяется из выражения:

$$c_{\text{ср.}} = \frac{\sum \gamma_i \cdot V_{pi} \cdot h_i}{\sum h_i}, \quad (1)$$

где  $c_{\text{ср.}}$  – средняя сейсмическая жесткость породы в разрезе;  $\gamma_i$  – плотность слоя породы, т/м<sup>3</sup>;  $V_{pi}$  – скорость продольной сейсмической волны слоя породы, м/сек;  $h_i$  – мощность слоя породы, м.

Другим фактором, влияющим на сейсмическую балльность, является уровень грунтовых вод. На основе анализа результатов выполнения сейсмического районирования в различных горно-геологических условиях в работе использовано следующее выражение для оценки величин поправок к балльности [1–3]:

$$n = 1.67 [Lg(V_0 \cdot \gamma_0) - Lg(c_{\text{ср.}})] + e^{-0.04H^2}, \quad (2)$$

где  $n$  – поправка к балльности;  $(V_0 \cdot \gamma_0)$  – сейсмическая жесткость породы, принятой за эталон;  $H$  – глубина залегания грунтовых вод, м.

Как видно из выражения (2), для оценки поправок  $n$  необходимо определить в натуральных условиях величины средней сейсмической жесткости пород  $c_{\text{ср.}}$ , обосновать выбор эталонного грунта  $(V_0 \cdot \gamma_0)$  и оценить уровень грунтовых вод на участке строительства.

Отличие предложенной методики состоит:

- в более детальном описании массива по величинам фактических скоростей  $V_{pi}$  и плотностей  $\gamma_i$  благодаря использованию при натуральных измерениях метода сейсмической томографии и корреляционных соотношений «плотность – скорость продольной волны», устанавливаемых при лабораторных испытаниях грунтов;

- в оценке характеристик эталонного грунта  $V_0, \gamma_0$ , которые для реальных условий определяются как средневзвешенные значения скоростей и плотностей для пород I категории

по данным натурных сейсмотомаграфических измерений скоростей сейсмических волн и корреляционным соотношениям:

$$\gamma_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \gamma_{\text{ср.взв.}i}}{m}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{\text{ср.взв.}i}$  – средневзвешенное значение плотности по профилю.

Сейсмотомаграфические исследования при проведении микросейсмораионирования основываются на анализе инженерно-геологических особенностей обследуемого участка с использованием данных разведочного бурения и оценки уровней грунтовых вод. При этом выполняется:

- определение средних сейсмических жесткостей вмещающих пород и грунтов  $\rho_{\text{ср.}}$ , глубин залегания коренных пород в реальных разрезах массива по данным натурных сейсмических измерений;

- выявление структурно-ослабленных зон массива по дифференциации скоростей сейсмических волн (выявление низкоскоростных зон массива в коренных породах основания как наиболее неоднородных и трещиноватых участков), построение карт поправок сейсмической балльности массива.

Натурные измерения скоростей сейсмических волн выполнены методом продольного сейсмического профилирования с возбуждением сейсмических волн ударным способом.

Для построения скоростных разрезов и преломляющих границ в глубь массива использована регистрация времен первых вступлений преломленных сейсмических волн (МПВ), включает портативную цифровую 24-канальную сейсмостанцию «Микросейс-160» (McSeis-160, Япония).

### Методика контроля уплотнения грунтов

При строительстве площадки ПДХ наносные и частично четвертичные отложения замещены скально-щебеночной смесью. Уплотнение грунтов осуществлялось с использованием виброкатков. Мощность замещаемого слоя грунтов на площадке достигала 9–10 м, что определило высокую эффективность использования для контроля уплотнения оперативных методов поверхностной сейсморазведочной томографии, основанных на взаимосвязи скоростей продольных сейсмических волн и степени уплотнения грунта. Авторами разработана методика, учитывающая технологию замещения и сложные климатические условия побережья Баренцева моря (градиенты температур, приливно-отливные явления). Однако здесь следует говорить об относительных оценках уплотнения в режиме мониторинга, обеспечивающего неразрушающий контроль значительных площадей и глубин обследования. В такой постановке методически необходимо решить две основные задачи: установление взаимосвязей скоростей продольных сейсмических волн и уплотнения грунта и влияние влагонасыщения грунтов на результаты оценки качества их уплотнения.

Коэффициент уплотнения грунта определяется из выражения:

$$m = \left( \frac{V_{pi}}{V_{p \max}} \right)^\beta, \quad (4)$$

где  $V_{pi}$ ,  $V_{p \max}$  – текущее и максимальное значения скоростей продольных сейсмических волн в замещаемом слое грунта, соответствующие текущей и максимально достижимой плотностям грунта при уплотнении, км/с;  $\beta$  – показатель степени.

Таким образом, задача сводится к определению допустимого диапазона скоростей ( $V_{pi} \div V_{p \max}$ ), удовлетворяющего проектно заданному уплотнению  $m$ . Методика оценки  $V_{p \max}$  сводится к следующему. Вначале оцениваются максимально достижимые плотности грунта  $\gamma_{c \max}$  и

допустимый интервал уплотнения ( $\gamma_{c \max} \div m \cdot \gamma_{c \max}$ ). Для этого можно использовать целый ряд известных методик [например 4, 5], взаимосвязь пористости грунта и скорости продольной волны:

$$n_i = (V_{p0} / V_{pi} - 1) / (V_{p0} / V_{p.зап} - 1), \quad (5)$$

где  $V_{p0}$  – скорость продольной волны в скальной отдельности грунта;  $V_{pi}$  – скорость продольной волны в грунте, измеренная в реальных натуральных условиях;  $V_{p.зап}$  – скорость продольной волны в заполнителе пор грунта.

Во всех проведенных рассуждениях речь идет о показателях сухого грунта. Для оценки фактического состояния грунтов с учетом влагонасыщения используется относительный показатель отношения скоростей сейсмических волн  $V_s/V_p$ , где  $V_p$ ,  $V_s$  – скорости продольной и поперечной сейсмических волн. Соотношение скоростей продольной и поперечной сейсмических волн характеризуют коэффициент Пуассона среды (коэффициент поперечной деформации) – характеристику состояния и деформируемости среды. Для жидких сред величина  $\nu$  приближается к 0.5. Таким образом, влагонасыщение грунтов способствует росту величин коэффициента Пуассона среды.

Используя корреляционные соотношения для слоя замещенных грунтов, исходя из заданного проектного коэффициента  $m=0.91-0.95$ , был установлен допустимый интервал изменения скоростей упругих волн  $V_p$  в грунте, составляющий (0.65– 0.85) км/с, причем водонасыщенный грунт принимается при  $V_s/V_p < 0.30$ .

Проверка изложенных теоретических представлений о формировании состояния грунтов обратной засыпки осуществляется по измерениям, выполненным в специально созданном на площадке ПДХ эталонном блоке грунта с параметрами: мощность грунтов обратной засыпки 5.0–8.0 м, длина-ширина блока 50х50м. Предельное уплотнение было достигнуто за четыре прохода виброкатка, при этом скорости продольных сейсмических волн, характеризующие это состояние, достигли значений 0.8–1.0 км/с. Все результаты измерений на площадке соотнесены с результатами, полученными на эталонном блоке.

Сейсмоизмерения производились с использованием 24-канальной цифровой сеймостанции «Elliss» (сертификат соответствия рег. № ССПП 01.1.1.-125). Расчеты скоростных кинематических разрезов при моделировании и при обработке данных натуральных наблюдений выполнены с использованием программного томографического пакета «XТomo» (version 1.0, разработка компании X-Geo, г. Санкт-Петербург, лицензия А-545).

## Результаты исследований и их использование

Пример сейсотомографического скоростного разреза по одному из измерительных профилей на площадке Сайда-Губа представлен на рис. 1.

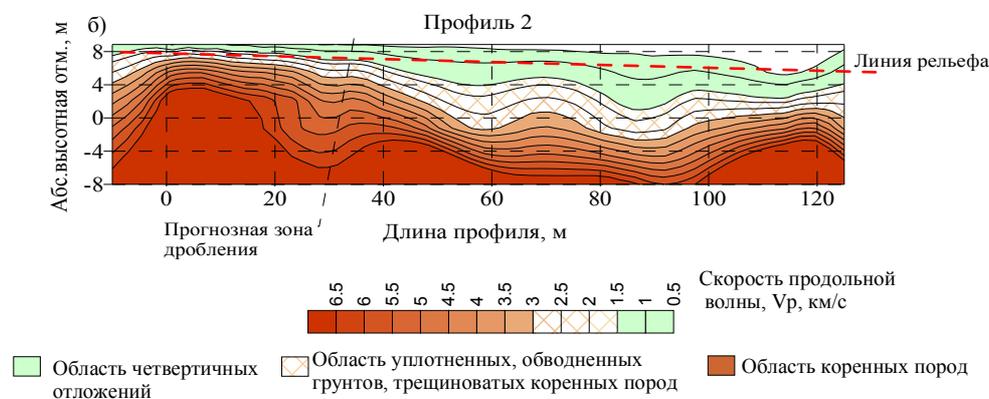


Рис. 1. Сейсотомографический скоростной разрез массива по профилю 2

Разделение скоростного сейсмотомаграфического разреза по геологическим характеристикам пород выполнено исходя из условия:  $\text{Grad } V_p > 60\%$ , где  $\text{Grad } V_p$  – градиент скорости продольной волны в вертикальном разрезе. Результаты расчета поправок сейсмической балльности по данным сейсмотомаграфических измерений и с учетом реальных уровней грунтовых вод по скважинам, полученные по результатам комплексной оценки несколькими методами, включая метод инженерно-геологических аналогий, наблюдений за колебаниями от землетрясений и микросейсм, территории площадки ПДХ представлена на рис. 2. Использование результатов корректировки балльности на территории площадки размещения объектов повышенной ответственности позволило избежать необоснованных расходов на усиление несущих конструкций, исчисляемых миллионами евро (общая стоимость объектов Сайда-Губы составляет 650 млн евро).

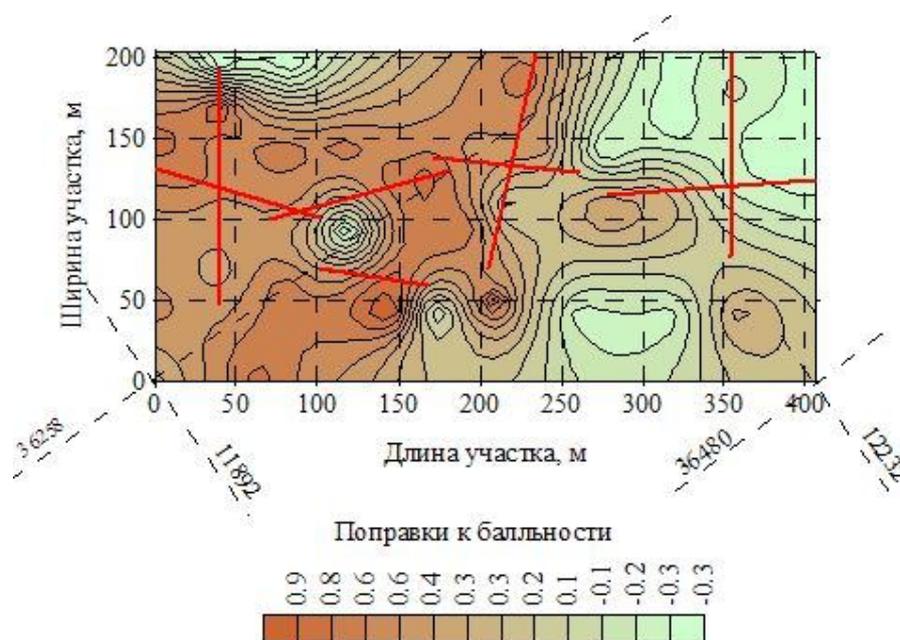


Рис. 2. Карта распределения расчетных поправок сейсмической балльности по результатам исследований на площадке ПДХ:

— — сейсмические профили

В качестве примера, иллюстрирующего возможности разработанной методики по контролю уплотнения замещенных грунтов, приведены сейсмотомаграфические разрезы скоростей продольной (а) и поперечной (б) сейсмических волн по одному из профилей на площадке (рис. 3). Мощность насыпных грунтов варьирует от 4.5 до 8 м.

Зона низких скоростей продольных волн в поверхностном слое грунта, не удовлетворяющая условию достаточного уплотнения по скорости продольной волны  $V_p < 0.65$  км/с (белая палитра рисунка ПК 35-40), фиксируется в самой приповерхностной части и незначительна. Внутри слоя засыпки на отметках +1–2 м фиксируются незначительные локальные зоны (менее 1 % распространенности на участке) с пониженным значением соотношения  $V_s/V_p$  в диапазоне 0.35–0.4. Выявленные локальные зоны с пониженными плотностными характеристиками были дополнительно уплотнены виброкатками, что позволило полностью исключить просадки грунта под стапельной плитой и фундаментами ПДХ РО АПЛ и ЦКДХ РАО.

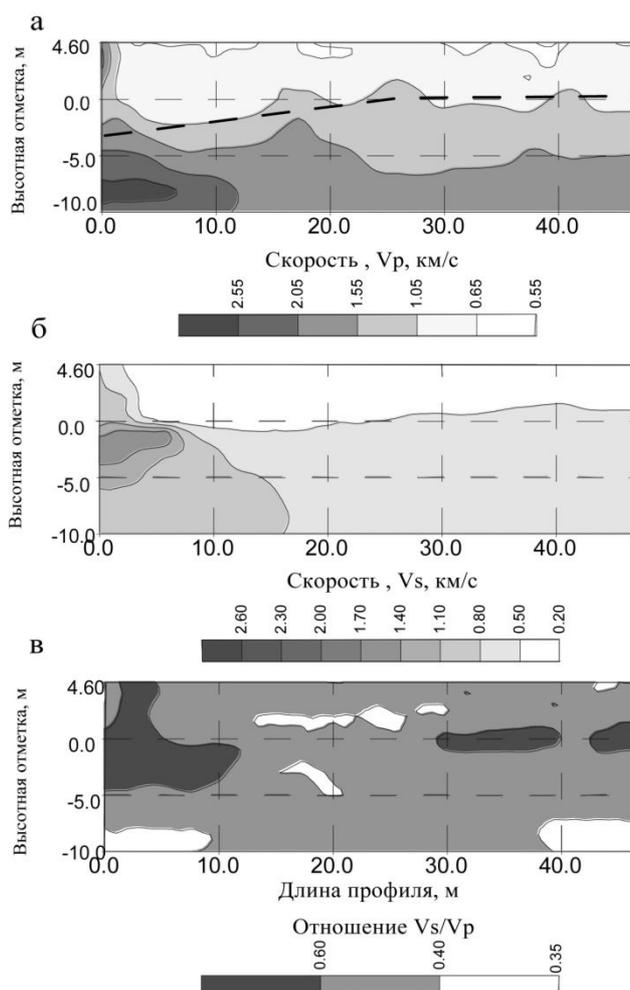


Рис. 3. Томограммы скоростей продольных (а), поперечных (б) волн и соотношения  $V_s/V_p$  (в) по данным натуральных измерений

### Заключение

Полученные результаты позволили откорректировать исходную сейсмическую информацию. В местах выхода скальных коренных пород к свободной поверхности сейсмическая балльность была снижена на 0.35–1.3 балла относительно исходной. На участках площадки с высоким уровнем грунтовых вод и мощным слоем наносных грунтов и четвертичных отложений (примерно до 25 % территории площадки) величины превышений сейсмичности к расчетной могут достигать 0.6–0.9 балла, но не превышают 1.0 балла. Контроль уплотнения грунтов обратной засышки позволил оперативно выделять участки с  $m \leq 0.95$ –1.0, (где  $m$  – проектный коэффициент уплотнения грунтов) для своевременного проведения дополнительного уплотнения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М., 1962. 283 с.
2. Сейсмическое микрорайонирование и техногенез: сб. ст. / под ред. Н. И. Кригер. М., 1985. 102 с.
3. Республиканские строительные нормы. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. М.: Госстрой РФ, 1987. 11 с.
4. Жарницкий В. Я. Оценка качества укладки горной массы из известняков в упорные призмы каменно-земляных плотин // Гидротехническое строительство. 2004. № 12. С. 22–25.
5. Савич А. И., Яценко З. Г.

Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 213 с.

**Сведения об авторах**

*Конухин Владимир Пантелеймонович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН;

e-mail: vladimir@goi.kolasc.net.ru

*Абрамов Николай Николаевич* – кандидат технических наук, и. о. заведующего лабораторией ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН;

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

*Кабеев Евгений Владимирович* – ведущий технолог ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН;

e-mail: kabeev@goi.kolasc.net.ru

**About the author**

*Vladimir P. Konukhin* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of lab. of the Mining Institute of the KSC of the RAS;

e-mail: vladimir@goi.kolasc.net.ru

*Nikolay N. Abramov* – PhD (Eng.), alternate head of lab. of the Mining Institute of the KSC of the RAS;

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

*Evgeny V. Kabeyev* – leading technologist of the Mining Institute of the KSC of the RAS;

e-mail: kabeev@goi.kolasc.net.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Конухин В. П.* Методические особенности геофизических исследований при строительстве объектов переработки и долговременного хранения радиоактивных отходов ВМФ в Северо-Западном регионе России / *В. П. Конухин, Н. Н. Абрамов, Е. В. Кабеев* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 52–58.

**Bibliographic Description**

*Vladimir P. Konukhin, Nikolai N. Abramov, Evgeny V. Kabeev.* Methodical Particularities in Geophysical Studies at Constructing Facilities for Processing and Long-Term Storage of Navy Radioactive Waste in the Northern-Western Region Of Russia. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016, vol. 1, pp. 52-58.

УДК 622.4 : 519.67

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

В. А. Маслобоев<sup>1</sup>, А. А. Бакланов<sup>1,2</sup>, П. В. Амосов<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН<sup>2</sup>Всемирная метеорологическая организация<sup>3</sup>Горный институт КНЦ РАН

## Аннотация

Представлены и апробированы подходы (зависимость Westphal D. L. et al. и схема DEAD) по оценке интенсивности пыления (пустыни, хвостохранилища и др.). Продемонстрирован переход к определению динамической скорости  $u_*$  и скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью  $u_{10}$ , необходимых для выполнения оценок интенсивности пыления. Методический подход реализован на базе двухмерной численной модели аэродинамики атмосферы района «хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты». Проанализированы результаты расчетов и обработки горизонтальной скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью при вариации скорости ветрового потока от 5 до 23 м/с. Выполнен сравнительный анализ и указаны особенности поинтервальной (по размерам частиц) интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2 с использованием зависимости Westphal D. L. et al. и схемы DEAD. Полученные значения интенсивности пыления в нижней части диапазона скорости ветрового потока близки показателю «максимальной удельной сдуваемости пыли», используемого специалистами проектных организаций при разработке документации. Получены прогнозные диапазоны уровней суммарной концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты в виде степенных функциональных зависимостей. Отмечен эффект роста концентрации мелкодисперсной пыли в районе г. Апатиты при увеличении высоты объекта на 20 м.

## Ключевые слова:

*пылящие поверхности, поинтервальная интенсивность пыления, численное моделирование, концентрация пыли.*

## MODELING RESULTS OF DUST PROCESSES OF TAILING DUMPS

V. A. Masloboev<sup>1</sup>, A. A. Baklanov<sup>1,2</sup>, P. V. Amosov<sup>3</sup><sup>1</sup>Institute of North Industrial Ecology Problems<sup>2</sup>World Meteorological Organization<sup>3</sup>Mining Institute of the KSC of the RAS

## Abstract

Approaches to evaluation of dust intensity (of deserts, tailing dumps, etc.; dependence of Westphal D. L. et al. and DEAD scheme) are described and tested. The determination of dynamic velocity and velocity at the height of +10 m above the dusting surface, which are necessary to evaluate the dust intensity, is demonstrated. The mathematical approach is realized based on a two-dimensional model of atmosphere aerodynamics in the area “tailing dumps of ANOF-2 – Apatity town”. The study provides calculations and analysis of horizontal velocity at the height of +10 m above the dusting surface at the wind speed varying from 5 to 23 m/sec. Comparative analysis is given and the peculiarities of interval (based on grains sizes) dust intensity of the tailing dumps of ANOF-2 are shown using the dependence of Westphal D. L. et al. and DEAD scheme. The received values of dust intensity at the lower range limit are close to the “maximum specific dust off” value which is used by project specialists for documentation development. The forecast ranges of total dust concentrations at the height of +2 m above the dusting surface are received in the center of model of Apatity town in the form of exponential

functional dependencies. The effect of fine dust concentrations growth with the height increase above the test object up to 20 m, is registered.

**Keywords:**

*dusting surfaces, interval dust intensity, numerical modelling, dust concentration.*



**Введение**

Данная работа – естественное продолжение исследований специалистов КИЦ РАН по проблеме пыления хвостохранилищ второй апатито-нефелиновой обогатительной фабрики (АНОФ-2), г. Апатиты, Мурманская обл. на базе методов численного моделирования [1–5]. На предыдущем

этапе авторами выполнен анализ существующих подходов по оценке интенсивности пыления (пустыни, хвостохранилища и др.). Некоторые результаты выполненного исследования представлены в докладах на российских и международных конференциях [6–8].

Рассмотрены подходы по оценке интенсивности пыления, приемлемые для решения практических задач по исследованию влияния скорости ветрового потока и высоты пылящей поверхности на загрязнение атмосферы для района г. Апатиты от воздействия близлежащего хвостохранилища АНОФ-2. По результатам анализа сделан предварительный вывод, что наиболее приемлемыми для последующих исследований загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по ветровому потоку могут быть признаны зависимость Westphal D. L. et al. [9] и схема DEAD [10]. Именно эти зависимости дают минимальное расхождение результатов на всем рассмотренном диапазоне скорости ветрового потока. Авторы отмечают, что оба подхода базируются на функциональной зависимости потока массы от динамической скорости на высоте пыления в 4-й и 3-й степенях соответственно.

При рассмотрении турбулентного переноса пыли с хвостохранилища АНОФ-2 представляется разумным ограничиться частицами, размер которых не превышает 70 мкм.

**Авторский подход к оценке динамической скорости**

На рис. 1 представлена схема модели, которая принимается для обоснования величины скорости, необходимой для оценки вертикального потока массы частиц (интенсивности пыления). Основная идея – динамическая скорость на высоте пылящей поверхности  $u_*$  определяется через осредненную горизонтальную компоненту скорости ветра на высоте +10 м над пылящей поверхностью  $u_{10}$ .

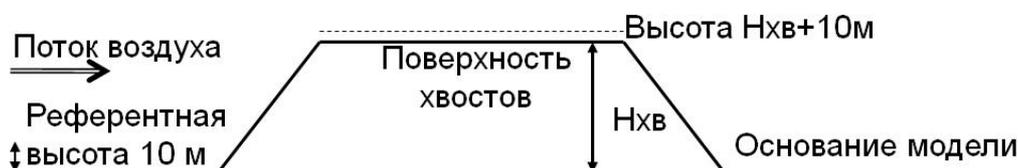


Рис. 1. Схема модели под обоснование методики определения интенсивности пыления

На входной границе модели рассмотрим диапазон значений референтной скорости ветра  $u_{ref}$  на высоте 10 м над основанием модели (от 5 до 23 м/с, например, с шагом 3 м/с). Задавая логарифмический профиль скорости на входной границе области (шероховатость принимается

на уровне 0.05 м), выполняем расчет аэродинамики на базе стационарной стандартной  $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности [3–5]. Далее выполняется обработка расчетных аэродинамических параметров вдоль пунктирной линии рис. 1: операция осреднения горизонтальной компоненты скорости (рис. 2) на высоте +10 м над пылящей поверхностью  $u_{10}$ . Результаты обработки численных экспериментов для горизонтальной скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью, а также переход к динамической скорости  $u_*$  обобщены в табл. 1.

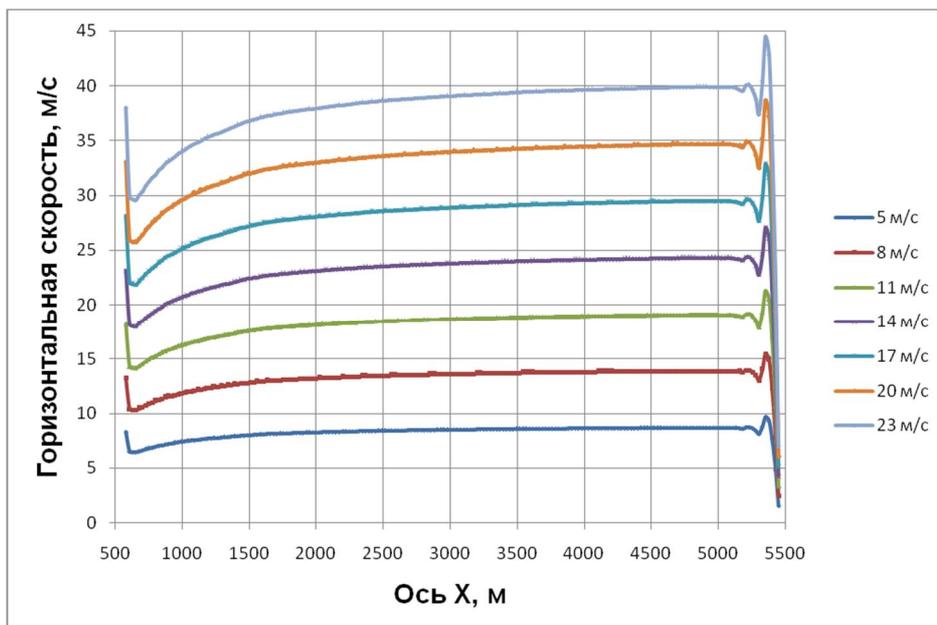


Рис. 2. Расчетные распределения горизонтальной скорости на высоте +10 м над поверхностью хвостохранилища  $u_{10}$

Дополнительно для последующего использования при численном решении уравнения конвективно-диффузионного переноса пыли выполнено осреднение (по области моделирования) значений коэффициентов динамической турбулентной вязкости. Результаты этой операции также представлены в табл. 1. Последующий переход к значениям коэффициентов турбулентной диффузии стандартен, он ранее использован и описан авторами [1, 3].

Таблица 1

Осредненные значения горизонтальной скорости на высоте +10 м  $u_{10}$ , динамической скорости  $u_*$  на высоте поверхности пыления и турбулентной динамической вязкости  $\eta_t$

Скорость ветра, м/с	$u_*$ , м/с	$u_{10}$ , м/с	$\eta_t$ , Па·с
5	0.623	8.246	0.4086
8	0.996	13.19	0.6563
11	1.370	18.14	0.9053
14	1.743	23.09	1.1554
17	2.117	28.04	1.4067
20	2.490	32.98	1.6593
23	2.863	37.93	1.9136

Гранулометрический состав (в графической форме) отвалных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2 приведен в диссертационной работе А. В. Стриженка «Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования» [11, с. 97, рис. 2.8]. Анализ гранулометрического состава отобранных проб пульпы и отвалных хвостов АНОФ-2 проводился на лазерном анализаторе распределения размеров частиц Horiba LA-950. Обработка графической информации позволила авторам получить количественные показатели по долям («вес» интервала) каждого моделируемого класса размера частиц пыли (табл. 2), что необходимо для выполнения численных экспериментов по турбулентному переносу мультимодальной примеси. Отметим, что «весовое» распределение интервалов, рассчитанное по данным работы [11], заметно отличается от того распределения, которое авторы использовали в своих прежних работах [1–3] (оно соответствует экспериментальным данным 1970–1980-х гг.). Кроме того, в табл. 2 приведены значения пороговой скорости  $u_*^{pp}$  для пыли класса крупности  $p$  до 70 мкм в диаметре с шагом 10 мкм, рассчитанные по методике авторов работы [10], и скорости оседания разнокалиберной пыли, которые вычислены в Стоксовом приближении [1–3] и необходимы для последующих вычислений конвективно-диффузионного переноса.

Таблица 2

Значения «веса» интервала, пороговой скорости и скорости оседания  
в зависимости от срединного диаметра частиц пыли

Срединный диаметр (диапазон интервала), мкм	«Вес» интервала, (доли)	Пороговая скорость $u_*^{pp}$ , м/с	Скорость оседания $w_g$ , м/с
5 (0–10)	0.022	0.951	0.00195
15 (10–20)	0.083	0.420	0.0175
25 (20–30)	0.142	0.295	0.0487
35 (30–40)	0.194	0.243	0.0955
45 (40–50)	0.209	0.218	0.1580
55 (50–60)	0.189	0.206	0.2360
65 (60–70)	0.161	0.201	0.3290

### Результаты расчетов и их анализ

#### Интенсивность пыления

Результаты вычислений по соотношениям схемы DEAD [10] и зависимости Westphal D. L. et al. [9] поинтервальных (по размерам частиц) вертикальных потоков массы при вариации скорости ветрового потока с использованием необходимых параметров, приведенных в табл. 1 и 2, представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Поинтервальные интенсивности пыления, вычисленные по схеме DEAD,  
при вариации скорости ветрового потока, кг/(м<sup>2</sup>с)

Скорость ветра, м/с	Срединный диаметр, мкм						
	5	15	25	35	45	55	65
5	***	$0.628 \cdot 10^{-6}$	$0.135 \cdot 10^{-5}$	$0.190 \cdot 10^{-5}$	$0.205 \cdot 10^{-5}$	$0.186 \cdot 10^{-5}$	$0.158 \cdot 10^{-5}$
8	$0.130 \cdot 10^{-6}$	$0.329 \cdot 10^{-5}$	$0.570 \cdot 10^{-5}$	$0.771 \cdot 10^{-5}$	$0.823 \cdot 10^{-5}$	$0.741 \cdot 10^{-5}$	$0.630 \cdot 10^{-5}$
11	$0.170 \cdot 10^{-5}$	$0.867 \cdot 10^{-5}$	$0.145 \cdot 10^{-5}$	$0.195 \cdot 10^{-4}$	$0.208 \cdot 10^{-4}$	$0.188 \cdot 10^{-4}$	$0.159 \cdot 10^{-4}$
14	$0.435 \cdot 10^{-5}$	$0.177 \cdot 10^{-4}$	$0.293 \cdot 10^{-5}$	$0.394 \cdot 10^{-4}$	$0.421 \cdot 10^{-4}$	$0.379 \cdot 10^{-4}$	$0.322 \cdot 10^{-4}$
17	$0.829 \cdot 10^{-5}$	$0.311 \cdot 10^{-4}$	$0.517 \cdot 10^{-5}$	$0.695 \cdot 10^{-4}$	$0.743 \cdot 10^{-4}$	$0.669 \cdot 10^{-4}$	$0.569 \cdot 10^{-4}$
20	$0.138 \cdot 10^{-4}$	$0.500 \cdot 10^{-4}$	$0.831 \cdot 10^{-4}$	$0.112 \cdot 10^{-3}$	$0.120 \cdot 10^{-3}$	$0.108 \cdot 10^{-3}$	$0.917 \cdot 10^{-4}$
23	$0.210 \cdot 10^{-4}$	$0.751 \cdot 10^{-4}$	$0.125 \cdot 10^{-3}$	$0.169 \cdot 10^{-3}$	$0.180 \cdot 10^{-3}$	$0.163 \cdot 10^{-3}$	$0.138 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4

Поинтервальные интенсивности пыления, вычисленные по зависимости [9], при вариации скорости ветрового потока, кг/(м<sup>2</sup>с)

Скорость ветра, м/с	Срединный диаметр, мкм						
	5	15	25	35	45	55	65
5	$0.958 \cdot 10^{-7}$	$0.362 \cdot 10^{-6}$	$0.619 \cdot 10^{-6}$	$0.845 \cdot 10^{-6}$	$0.910 \cdot 10^{-6}$	$0.823 \cdot 10^{-6}$	$0.701 \cdot 10^{-6}$
8	$0.628 \cdot 10^{-6}$	$0.237 \cdot 10^{-5}$	$0.405 \cdot 10^{-5}$	$0.554 \cdot 10^{-5}$	$0.597 \cdot 10^{-5}$	$0.540 \cdot 10^{-5}$	$0.460 \cdot 10^{-5}$
11	$0.225 \cdot 10^{-5}$	$0.847 \cdot 10^{-5}$	$0.145 \cdot 10^{-4}$	$0.198 \cdot 10^{-4}$	$0.213 \cdot 10^{-4}$	$0.193 \cdot 10^{-4}$	$0.164 \cdot 10^{-4}$
14	$0.589 \cdot 10^{-5}$	$0.222 \cdot 10^{-4}$	$0.380 \cdot 10^{-4}$	$0.519 \cdot 10^{-4}$	$0.560 \cdot 10^{-4}$	$0.506 \cdot 10^{-4}$	$0.431 \cdot 10^{-4}$
17	$0.128 \cdot 10^{-4}$	$0.483 \cdot 10^{-4}$	$0.826 \cdot 10^{-4}$	$0.113 \cdot 10^{-3}$	$0.122 \cdot 10^{-3}$	$0.110 \cdot 10^{-3}$	$0.937 \cdot 10^{-4}$
20	$0.245 \cdot 10^{-4}$	$0.925 \cdot 10^{-4}$	$0.158 \cdot 10^{-3}$	$0.216 \cdot 10^{-3}$	$0.233 \cdot 10^{-3}$	$0.211 \cdot 10^{-3}$	$0.180 \cdot 10^{-3}$
23	$0.429 \cdot 10^{-4}$	$0.162 \cdot 10^{-3}$	$0.277 \cdot 10^{-3}$	$0.378 \cdot 10^{-3}$	$0.407 \cdot 10^{-3}$	$0.368 \cdot 10^{-3}$	$0.314 \cdot 10^{-3}$

Безусловно, основная особенность расчетных интенсивностей пыления, выполненных по соотношениям схемы [10], – отсутствие числового значения при скорости ветра 5 м/с для самой мелкой пыли (срединный диаметр 5 мкм). Данный факт имеет очевидное объяснение: величина пороговой скорости (табл. 2, 3-й столбец, 2-я строка) выше значения динамической скорости (табл. 1, 2-й столбец, 2-я строка), т. е. в рамках данной модели (схема DEAD) эмиссии пыли такой крупности не происходит. Кроме того, хорошо видно, что при малых скоростях ветрового потока (не более 8 м/с) для пыли практически любой крупности значения интенсивности пыления, рассчитанные по схеме [10], несколько выше аналогичных расчетных данных по зависимости [9]. При величине скорости ветрового потока 11 м/с результаты расчетов интенсивности пыления по обоим используемым подходам наиболее близки. Дальнейшее увеличение скорости ветра (встречается существенно реже) приводит к тому, что расчетные (по зависимости [9]) интенсивности пыления заметно превышают аналогичные величины, вычисленные с использованием схемы [10].

Дополнительно были проанализированы суммарные интенсивности пыления при вариации либо скорости ветрового потока (строго по решаемой задаче), либо расчетной величины динамической скорости на высоте пыления соответственно. До величины скорости ветрового потока 11 м/с доминирует кривая интенсивности пыления по схеме [10], а при более высокой скорости – кривая по зависимости [9]. Естественно, что анализируемые кривые описываются степенными функциями  $AV^n$  в 4-й (зависимость [9]) и 3-й (схема [10]) степенях или скорости ветрового потока (в рамках решаемой задачи), или расчетной величины динамической скорости на высоте пыления. Коэффициенты пропорциональности  $A$  в степенных зависимостях от динамической скорости следующие: схема [10] – 3.877 и зависимость [9] – 2.896. Размерность скорости  $V$  м/с.

Естественно, авторы понимают, что для верификации численной модели необходимо проведение трудоемких экспериментальных исследований на объекте пыления, что, к сожалению, пока не может быть реализовано по целому ряду причин. Тем не менее предпринята попытка проверить объективность полученных значений интенсивности пыления. Для этого проанализированы данные отчета «Реконструкция хвостохранилища до отметки 200 м: проектная документация. Раздел 8 «Перечень мероприятий по охране окружающей среды», посвященного реконструкции хвостохранилища АНОФ-2 до высотной отметки 200 м. Специалисты ЗАО «Механообр Инжиниринг» используют показатель «максимальная удельная сдуваемость пыли». В своих оценках авторы указанного отчета используют значение

$5.29 \cdot 10^{-6}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), что отвечает значению динамической скорости не выше 0.6 м/с. Представляется возможным сделать два вывода: 1) предлагаемый методический подход достаточно объективен и работоспособен; 2) при высоких скоростях ветрового потока прогнозируемые значения интенсивности пыления будут существенно выше тех величин, которые принимаются проектировщиками в оценках воздействия объектов пыления на окружающую среду.

### **Распределение концентрации пыли**

Расчетные данные интенсивности пыления, представленные в табл. 3 и 4, необходимы для решения конвективно-диффузионного уравнения распространения пыли при описании граничных условий на поверхности пыления. В силу того что указанное уравнение – линейное, достаточно будет выполнить численные эксперименты по пространственно-временному распределению концентрации пыли в исследуемой области, например, для данных табл. 4 (зависимость [9]). Зная соответствующие отношения интенсивностей пыления в табл. 3 и 4, получаем значения концентрации пыли, отвечающие эмиссии пылевых частиц по схеме DEAD. В результате прогноз пространственно-временного распределения концентрации пыли будет определяться в некотором диапазоне значений.

В качестве примера выполненных расчетов приведены графики поинтервального пространственного распределения концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью г. Апатиты для скорости ветрового потока 5 м/с (рис. 3). Пространственные координаты модели соответствуют примерным границам г. Апатиты, а значения интенсивности пыления вычислены по зависимости [9].

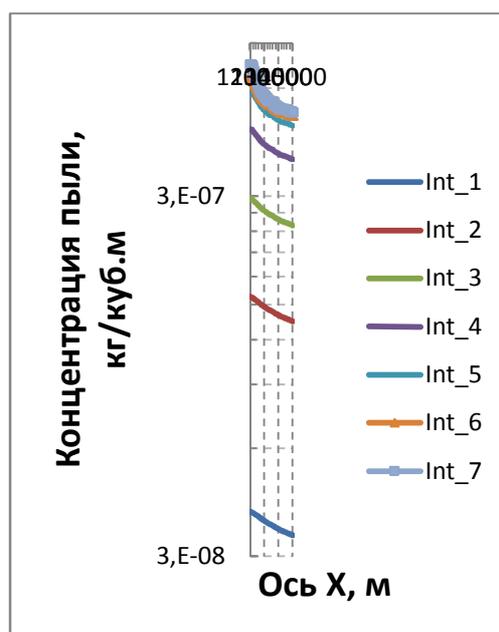


Рис. 3. Поинтервальное пространственное распределение концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью для района г. Апатиты при скорости ветрового потока 5 м/с (оценка интенсивности пыления по зависимости [9])

Далее были проанализированы суммарные концентрации пыли, соответствующие выбранным значениям скорости ветрового потока и вычисленные с помощью используемых подходов и приемов. На рис. 4а и б представлены суммарные концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты при вариации либо скорости ветрового потока (строго по решаемой задаче), либо расчетной величины динамической скорости на высоте пыления (более общая форма) соответственно. Как видно на рис. 4а и б, поведение кривых

концентраций пыли следует за поведением кривых интенсивности пыления: до величины скорости ветрового потока 11 м/с (и соответствующей динамической скорости) превалирует кривая, отвечающая схеме [10], а при более высокой скорости – кривая по зависимости [9]. Пересечение кривых происходит вблизи отметки 11 м/с (и соответствующей динамической скорости).

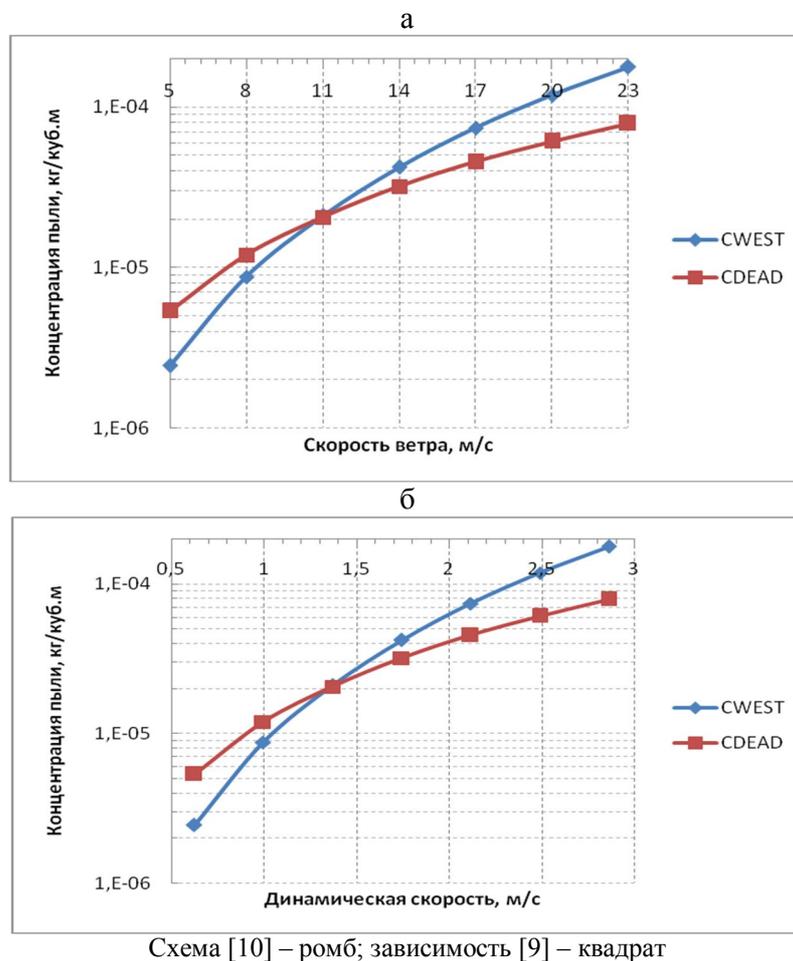


Рис. 4. Суммарные концентрации пыли в зависимости от:  
а – скорости ветрового потока на референтной высоте; б – динамической скорости на высоте пыления

Достаточно очевидно, что кривые на рис. 4а и б описываются, как и функции интенсивности пыления, посредством степенных функций со своими коэффициентами аппроксимации. Например, для кривых рис. 4б наилучшим образом подходят следующие: по схеме DEAD  $C_D = 1.21 \cdot 10^{-5} \cdot u_*^{1.77}$ ; по зависимости [9]  $C_W = 8.96 \cdot 10^{-6} \cdot u_*^{2.81}$ .

Таким образом, используемый методический подход позволяет спрогнозировать потенциальную область значений концентрации пыли, ограниченную графиками, которые соответствуют различным формализациям интенсивности пыления. На рис. 4а и б такое представление выполнено в терминах суммарной концентрации пыли в зависимости либо от скорости ветрового потока, либо от величины динамической скорости на высоте пыления.

### Эффект высоты хвостохранилища

Обосновав и апробировав описанный выше «инструмент» для прогноза уровня концентрации пыли в районе г. Апатиты при вариации скорости ветрового потока, авторы,

естественно, не могли не применить описанный выше подход для различных высот хвостохранилища. Напомним, что ранее авторы попытались ответить на вопрос о влиянии изменения высоты хвостохранилища АНОФ-2 со 180 до 200 м (в абсолютных высотных отметках) на загрязнение приземного слоя атмосферы г. Апатиты [3–5]. По оценкам, сделанным на базе трехмерного численного моделирования, для мелкодисперсной пыли (до 60 мкм) при скорости ветра 6 м/с увеличение высоты хвостохранилища на 20 м должно привести к росту концентрации пыли примерно на 15 %.

Поскольку в данном исследовании для высоты хвостохранилища 200 м модель была «заточена» под скорость ветрового потока 5 м/с, авторами выполнена подготовка компьютерной модели и проведена серия расчетов для высоты хвостохранилища 180 м при той же скорости ветрового потока. При этом соблюдалось условие постоянства площади пыления за счет изменения размера пруда-отстойника. Результаты расчетов поинтервальной интенсивности пыления (зависимость [9]) и концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты обобщены в табл. 5. Графическое сравнение поинтервальной и суммарной концентрации пыли в той же точке модели изображено на рис. 5.

Как видно из данных табл. 5, увеличение высоты хвостохранилища на 20 м при референтной скорости ветра 5 м/с приводит к росту интенсивности пыления примерно на 17 % и увеличению уровня концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты примерно на 20 %.

Согласно приведенным результатам, предыдущие авторские оценки и данные текущего исследования несколько отличаются, но это различие не столь существенное. В обоих случаях отмечается безусловное увеличение концентрации мелкодисперсной пыли с ростом высоты хвостохранилища. При этом именно в представляемой работе получены конкретные величины концентрации пыли, имеющие достаточную объективность.

Таблица 5

Поинтервальные интенсивности пыления ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ), вычисленные по зависимости [9], и концентрации пыли ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты при скорости ветрового потока 5 м/с

Номер (диапазон, мкм) интервала	Интенсивность пыления, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$		Концентрация пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$	
	180 м	200 м	180 м	200 м
1 (0 – 10)	$8.16 \cdot 10^{-8}$	$9.58 \cdot 10^{-8}$	$3.05 \cdot 10^{-8}$	$3.65 \cdot 10^{-8}$
2 (10 – 20)	$3.08 \cdot 10^{-7}$	$3.62 \cdot 10^{-7}$	$1.20 \cdot 10^{-7}$	$1.44 \cdot 10^{-7}$
3 (20 – 30)	$5.27 \cdot 10^{-7}$	$6.19 \cdot 10^{-7}$	$2.21 \cdot 10^{-7}$	$2.66 \cdot 10^{-7}$
4 (30 – 40)	$7.20 \cdot 10^{-7}$	$8.45 \cdot 10^{-7}$	$3.36 \cdot 10^{-7}$	$4.07 \cdot 10^{-7}$
5 (40 – 50)	$7.75 \cdot 10^{-7}$	$9.10 \cdot 10^{-7}$	$4.15 \cdot 10^{-7}$	$5.04 \cdot 10^{-7}$
6 (50 – 60)	$7.01 \cdot 10^{-7}$	$8.23 \cdot 10^{-7}$	$4.41 \cdot 10^{-7}$	$5.40 \cdot 10^{-7}$
7 (60 – 70)	$5.97 \cdot 10^{-7}$	$7.01 \cdot 10^{-7}$	$4.50 \cdot 10^{-7}$	$5.50 \cdot 10^{-7}$

В заключение отметим, что представленные на рис. 5 суммарные концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты при референтной скорости ветра 5 м/с для двух значений высоты хвостохранилища (180 и 200 м) в соответствии с излагаемым методическим подходом можно интерпретировать следующим образом. Для высоты хвостохранилища 180 м прогнозируемый диапазон суммарной концентрации пыли составляет  $2.01 \cdot 10^{-6} - 4.52 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$ , а для высоты 200 м –  $2.41 \cdot 10^{-6} - 5.51 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/\text{м}^3$ . Первое число в этих парах отвечает интенсивности пыления, рассчитанной по зависимости [9], второе – по схеме [10].

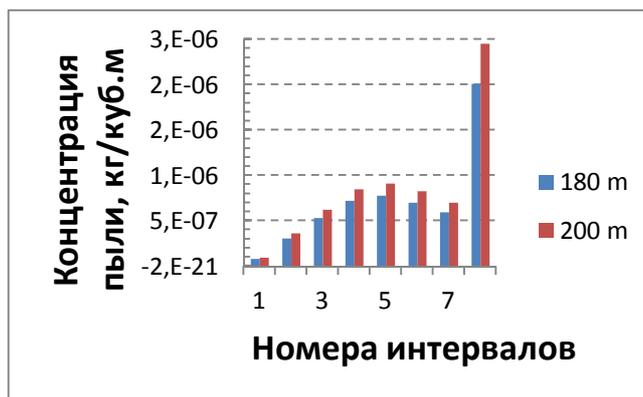


Рис. 5. Поинтервальное и суммарное распределение суммарной концентрации пыли на высоте +2 м в центре модели г. Апатиты при референтной скорости ветра 5 м/с (проварьирована высота хвостохранилища 180 и 200 м)

## Выводы

Продемонстрирован достаточно простой и нетрудоемкий переход к определению динамической скорости  $u_*$  и скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью  $u_{10}$  по данным о скорости ветра набегающего потока и высоты дамбы. Указанные величины необходимы для выполнения прогнозных расчетов вертикального потока массы на базе созданной двумерной численной модели аэродинамики атмосферы исследуемой области.

Переход реализован на базе двух подходов по оценке интенсивности пыления (зависимость [9] и схема [10]), которые приемлемы для решения практической задачи о влиянии скорости ветрового потока и высоты пылящей поверхности на загрязнение атмосферы для района г. Апатиты от воздействия близлежащего хвостохранилища АНОФ-2. Оба подхода базируются на функциональной зависимости потока массы от динамической скорости на высоте пыления в 4-й и 3-й степенях соответственно.

Выполнен сравнительный анализ расчетных значений поинтервальной интенсивности пыления на базе выбранных подходов при вариации скорости ветрового потока в широком диапазоне. Указан экономичный путь дальнейших численных экспериментов по прогнозу пространственно-временного распределения поинтервальной концентрации пыли, основанный на линейной природе конвективно-диффузионного уравнения и выполненном анализе расчетных вертикальных потоков массы пыли с использованием зависимости [9] и схемы [10].

Выполнены расчеты уровней концентрации приземного слоя атмосферы для района г. Апатиты с использованием принятых подходов по описанию интенсивностей пыления в широком диапазоне скоростей ветрового потока и при максимальной проектной высоте хвостохранилища АНОФ-2. Получены прогнозныe диапазоны уровней суммарной концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью в центре модели г. Апатиты в форме аналитических зависимостей степенного вида.

Эффект высоты хвостохранилища на уровень суммарной концентрации пыли продемонстрирован для ситуации изменения высоты объекта со 180 до 200 м при скорости ветрового потока 5 м/с. В подтверждение ранее выполненных оценок доказано: увеличение высоты пылящей поверхности приводит к росту концентрации мелкодисперсной пыли примерно на 20 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФ АН СССР, 1987. 200 с.
2. Baklanov A., Rigina O. Environmental modeling of dusting from the mining and concentration sites in the Kola Peninsula, Northwest Russia // The XI World Clear Air and Environment Congress (Durban, South Africa, IUAPPA-NACA, 14-18 September 1998). Durban, 1998. Vol. 1. 4F-3. P. 1–18.
3. Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 109 с.
4. CFD-

model developing of dust transfer at a tailings dump / P. V. Amosov [et al.] // Proceedings of the 4-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management – CRETE-2014 (Chania, Crete, Greece, 2-5 September 2014.) Executive Summaries. Chania: Technical University of Crete, 2014. P. 279–280. **5.** Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 / В. А. Маслобоев [и др.] // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 376–384. **6.** Амосов П. В., Бакланов А. А. К вопросу оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 1 / под общ. ред. А. А. Большакова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. С. 3–5. **7.** Амосов П. В., Бакланов А. А. Оценка вертикального потока массы пыли на хвостохранилище на базе схемы DEAD // Проблемы недропользования. 2015. № 3. С.80–85. **8.** Amosov P. V., Baklanov A. A. Assessment of dusting intensity on ANOF-2 tailing by using a Westphal D. L. dependency // Proceedings of X International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development (Bor, Serbia; [organizer] University of Belgrade, Technical Faculty, 4-7 November 2015) / ed. by Zoran S. Markovic. Bor: University of Belgrade, 2015 (Bor : Tercija). P. 39–43. **9.** Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A case-study of mobilization and transport of Saharan Dust // Journal of the Atmospheric Sciences. 1988. No. 45. P. 2145–2175. **10.** Marticorena B., Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle. 1. Design of a soil-driven dust emission scheme // Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 1995. Vol. 100, No. D8. P. 16415–16430. **11.** Стриженок А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: дис. ... канд. техн. наук. 2015 // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»: сайт. URL: [http://www.spmi.ru/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/dissertaciya\\_strizhenok.pdf](http://www.spmi.ru/system/files/lib/sci/aspirant-doctorant/avtoreferaty/2015/dissertaciya_strizhenok.pdf) (дата обращения: 12.09.2015).

### Сведения об авторах

*Маслобоев Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор, директор ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН;  
e-mail: masloboev@ksc.ru

*Бакланов Александр Анатольевич* – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, сотрудник научного отдела Всемирной метеорологической организации;  
e-mail: aabaklanov@yahoo.com

*Амосов Павел Васильевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Горного института Кольского научного центра РАН;  
e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

### Information about the authors

*Vladimir A. Masloboev* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, director of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;  
e-mail: masloboev@ksc.ru

*Alexander A. Baklanov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, chief researcher of Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS; researcher at the World Meteorological Organization;  
e-mail: aabaklanov@yahoo.com

*Pavel V. Amosov* – PhD (Eng.), senior researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS;  
e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

### Библиографическое описание статьи

*Маслобоев В. А.* Результаты моделирования процессов пыления хвостохранилищ / В. А. Маслобоев, А. А. Бакланов, П. В. Амосов // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1 (24). – С. 59–68.

### Bibliographic Description

*Vladimir A. Masloboev, Alexander A. Baklanov, Pavel V. Amosov.* Modeling Results of Dust Processes of Tailing Dumps. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016, vol. 1 (24), pp. 59–68.

УДК 550.4 (471.21)

**ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ  
В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО РАЙОНА  
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ БАСЕЙНА БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

**В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин**

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

**Аннотация**

Проведены исследования содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточной части Мурманской области бассейна Баренцева моря. Установлено высокое и значительное загрязнение донных отложений халькофильными элементами (главным образом Pb и Cd), которое носит глобальный характер, в отличие от приоритетных для региона загрязняющих тяжелых металлов, таких как Ni, Cu, Co, которые характеризуются как умеренно загрязняющие. Поступление морских аэрозолей в прибрежной морской зоне оказывает влияние на формирование химического состава донных отложений, что сказалось в повышении концентраций тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, As) в донных отложениях по направлению к побережью Баренцева моря.

**Ключевые слова:**

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

**THE MAIN REGULARITIES OF HEAVY METALS DISTRIBUTION FOR LAKES SEDIMENTS IN THE  
NORTHEAST PART OF MURMANSK REGION OF THE BARENTS SEA BASIN**

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

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

**Abstract**

The content of heavy metals in the Barents Sea basin lakes sediments has been researched for the northeast part of the Murmansk region. High and considerable pollution of sediments by chalcophilic elements (mainly, Pb and Cd) has been established. This pollution has global character, unlike the polluting by heavy metals (such as Ni, Cu, Co) that is typical for the region and characterized as the moderate one. The afflux of sea aerosols in the coastal sea zone has impact on formation of the sediments chemical composition that resulted in increased concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb, As) in sediments towards the Barents Sea coast.

**Keywords:**

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



**Введение**

Условия формирования качества вод озер северо-восточного района Мурманской обл. весьма специфичны и разнообразны, что обусловлено целым рядом факторов, включая климат, геологические и ландшафтные особенности территорий водосборов, близость океана и значительное влияние морских аэрозолей, низкую биологическую продуктивность. В целом это ультрапресные, ультраолиготрофные водоемы с высокой прозрачностью вод.

В северо-восточном районе Мурманской обл. встречаются два различных типа водных систем: крупные озерно-речные системы основных рек и системы многочисленных малых озер и рек. По происхождению озера делятся на две основные группы – ледниковые и тектонические.

Большинство озер относится к ледниковым, которые имеют округлую или овальную форму и небольшие глубины. Иногда встречаются запрудные озера, образовавшиеся в результате преграждения мореной какого-либо поверхностного стока воды. Ложа этих озер удлиненной формы и большой глубины. Озера тектонического происхождения расположены в глубоких котловинах, имеют вытянутую форму, сложную конфигурацию береговой линии и неровный рельеф дна.

Главные компоненты водного баланса озер: приток поверхностных вод с водосборной площади; осадки в виде дождя и снега; поверхностный сток; испарение. Для водоемов северо-восточной части Мурманской обл. характерно преобладание поверхностного притока и осадков в водном балансе, роль поверхностного стока и испарения менее значительна. Для водоемов северо-восточной части, расположенных ближе к центральным районам Мурманской обл., типично преобладание поверхностного притока и стока в водном балансе, осадки близки к потерям на испарение и могут составлять 2–16 % уравненного баланса [1]. Подобные водоемы, изначально обладая высокими природными качествами, представляют собой важнейшие природные ресурсы Субарктики. Водные ресурсы играют важнейшую роль в жизни коренных народов Севера и экономике региона в целом. Однако глобальные изменения, происходящие на нашей планете, бросают серьезный вызов качеству северных водоемов. Бурный рост промышленности, начавшийся в XX и продолжающийся в XXI столетии, обусловил процессы глобального загрязнения окружающей среды.

Для Арктических и Субарктических регионов все большую актуальность приобретает проблема оценки последствий долговременного аэротехногенного загрязнения водоемов, расположенных как в импактных зонах промышленных предприятий, так и в фоновых районах. Надо отметить, что территория восточной части Мурманской обл. не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов. Однако в силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии в приполярные области переносится большая часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями из более южных индустриально развитых регионов. Выбрасываемые в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на большие расстояния, их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

Кумулятивное загрязнение водоемов долгоживущими загрязняющими веществами сопровождается процессами закисления, которое определяется количеством кислотных осадков, выпадающих на территорию водосбора, продолжительностью их воздействия; геохимическими особенностями региона, гидрохимией и морфологией водоемов и др. Озера северо-восточной части Мурманской обл. наиболее чувствительны к закислению вследствие бедного ионного состава и низкой буферной емкости, т. е. обладают небольшим запасом соединений, способных нейтрализовать поступление кислотных соединений.

### **Особенности формирования химического состава донных отложений озер северо-востока Кольского полуострова**

Геологическое строение района весьма однообразно. Вся его северная часть от морского побережья и несколько южнее сложена гранитами. Коренные кристаллические породы скрыты под тонкой подушкой тундрового почвенно-растительного покрова и часто выходят на поверхность, обнажая кислые гранитоидные породы, что обуславливает низкую щелочность поверхностных вод. На остальной территории преобладают олигоклазовые граниты. Ближе к центральным районам коренные породы покрыты четвертичными отложениями (морена и песчаные флювиогляциальные отложения) и продуктами болотных образований; обнажения коренных пород встречаются реже, что создает иные условия формирования качества вод.

Тектоника северо-восточного района проявилась, как и на всем Кольском п-ове, в виде различных по глубине и длине линейных разломов и сбросовых впадин, которые имеют меридиональное и широтное направление. Тектонические разломы в настоящее время заняты

реками, впадины – озерами. Нередко впадины приобретают лопастную форму.

Поверхность исследуемого района представляет собой плато высотой 200–250 м. Общий уклон поверхности идет с юга на север. Абсолютные высоты с отметками более 300 м, которые встречаются в южной части этой зоны, понижаются до 100 м и менее на севере, где граница резко обозначена крутым, обрывистым гранитным берегом Баренцева моря. Здесь глубоко в сушу вдаются многочисленные губы, в которые впадают рассматриваемые в данной работе реки и их водосборные площади.

Поверхность прибрежной части всхолмлена отдельными возвышенностями различной площади и округлой формы с относительным превышением над окружающей местностью от нескольких до 20–30 м. Встречаются также поднятия в виде вытянутых гряд с более мягкими формами очертаний и меньшими относительными отметками. Они чередуются с плоскими межгрядовыми понижениями, как правило, заболоченными. В местах выхода на поверхность коренных пород образуются громадные глыбы гранитов. Чаще всего они приурочены к районам тектонических разломов. На относительно ровных и слабо всхолмленных участках иногда встречается масса разбросанных гранитных обломков различных размеров.

Центральная часть района является наиболее расчлененной, с амплитудой колебания высот до 100 м. Здесь расположены крупнейшие впадины, занятые озерами. Озера, как правило, узкие, вытянутые, ориентировка их имеет три четко выраженных направления. В западной части района – преимущественно северо-западное направление, на востоке – меридиональное и северо-восточное.

Облик южной части района заметно меняется, поверхность выполаживается. Начинают преобладать относительно ровные и сильно заболоченные пространства. Обнажения коренных пород встречаются реже. Их выходы наблюдаются в основном в переломах речных русел. Небольшие речки имеют слабо выраженные долины, берега густо поросли осокой и ивой. Часто встречается крупнобугристый болотный комплекс.

Для северной части характерны примитивные тундровые почвы с различной степенью оподзоленности. В условиях значительного увлажнения бедные растворимыми веществами подзолистые почвы очень мало минерализованы. Подзолистые почвы встречаются небольшими пятнами в речных долинах, в местах развития лесотундровых ассоциаций. Южнее, где рельеф менее расчленен, распространены болотные почвы, хотя и здесь встречаются примитивные тундровые почвы, приуроченные к возвышенным и более расчлененным местам. Коэффициент заболоченности в этом районе составляет 17 %.

В прямой связи с почвами описываемого района находится развитие растительного покрова, который представлен различными комплексами тундровой и таежной растительности. В северных прибрежных районах вдоль побережья Баренцева моря тянется ерничко-кустарничковая тундра шириной 20–30 км. Южнее она замещается комплексами лесов, лесотундры и болотной растительности. Леса состоят в основном из ели, сосны и березы. Здесь же находятся отдельные мерзлотные торфяные бугры. На устьевых участках рек на относительно небольших пространствах встречается березово-лишайниковое лесотундровое криволесье, растущее на склонах долин и поверхности речных террас. Однако березовое редколесье занимает сравнительно незначительные площади, составляя 7 % территории района. К таким участкам относится ледниковая терраса на побережье, поверхность которой после образования почвенного покрова довольно густо поросла березой. В тех местах, где террасу пересекают небольшие водные потоки, развита пышная и разнообразная травянистая растительность [2].

Климат северо-восточной части Кольского п-ова находится под смягчающим влиянием Баренцева моря. Благодаря этому температура воздуха зимой на побережье близка к соответствующим значениям температуры воздуха в районах, расположенных на 10° южнее (например Ленинградская обл.), и вследствие более сглаженных форм рельефа в данном районе климат отличается меньшей территориальной изменчивостью. При удалении вглубь полуострова рельеф местности меняется и влияние моря довольно быстро исчезает, термический режим становится несколько суровее и продолжительнее на 1 месяц [1].

Гидрохимические параметры наряду с климатическими, географическими, ландшафтными и геологическими условиями конкретных водосборов определяют природное состояние водных экосистем. 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 является необходимым условием для обоснованного прогнозирования качества природных вод.

Данная территория не испытывает серьезного антропогенного влияния. Химический состав поверхностных вод северо-восточной части Кольского п-ова определяется в основном атмосферным выпадением ионов и выветриванием, а также ионообменной реакцией на водосборной площади. Процессы, происходящие на водосборной площади, влияют на химический состав стоков в водоемы.

На формирование химического состава озер северо-восточной части Мурманской обл. в значительной степени влияет близость незамерзающего Баренцева моря. Процесс формирования химического состава поверхностных вод начинается с момента выпадения морских аэрозолей и осадков на поверхность водосбора. С удалением от береговой черты к центральным районам Кольского п-ова количество морских аэрозолей, выносимых атмосферными осадками, заметно уменьшается. По мере удаления от побережья происходит закономерное снижение минерализации воды, уменьшение ионов хлора и натрия в поверхностных водах [3].

### Материалы и методы

Данная статья написана на основе 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, например, для строительства Северной приливной электростанции в районе губы Долгая-Восточная Баренцева моря [4], месторождения Федоровые тундры [5] и т. д. Статья является продолжением предыдущей, касающейся оценки экологического состояния озер северо-запада Мурманской обл. и приграничного района Финляндии, Норвегии и России [6]. В статье обобщены результаты исследований донных отложений (ДО) 23 озер, расположенных на 6 водосборных площадях побережья Баренцева моря восточной части Мурманской обл., включающих основные реки, мелкие речные бассейны и межбассейновые пространства (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1

Перечень исследуемых озер восточной части Мурманской области (Баренцево море), в которых отобраны колонки ДО

№№ водосбора и озера	Название озера	Водосбор реки	Высота н. у. м., м	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Максимальная глубина, м	Расстояние до моря, км
1	2	3	4	5	6	7	8
30-1	Зеленецкое	Ручей б/н	36.2	0.55	4.83	14.0	2.3
33-4	Безымянное	Воронья	194.3	0.11	6.73	1.8	170.7
33-5	190.1	То же	190.1	0.08	1.00	2.9	170.1
33-6	190.4	»	190.4	0.06	1.78	3.0	169.0
33-7	199.4	»	199.4	0.12	1.60	2.5	172.2
33-8	Ластьявр	»	176.1	0.67	4.44	3.0	164.7
33-9	Шарьявр	»	173.0	0.14	15.30	7.0	162.7

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
33-10	Верхний Цагаявр	Воронья	172.0	0.08	16.70	2.0	162.5
33-11	Нижний Цагаявр	То же	171.4	0.81	383.20	2.0	161.6
33-13	Олекчъявр	»	167.2	1.48	48.80	4.5	163.9
36-1	1-е Титовское	Ручей б/н	4.6	0.67	19.80	20.5	2.3
36-2	2-е Титовское	То же	10.7	0.20	17.70	8.2	3.4
36-3	3-е Титовское	»	37.2	0.34	16.20	43.3	4.3
37-16	Долгое	Териберка	53.9	0.72	7.50	3.5	9.5
38-1	Долгое-7	Ручей б/н	47.6	0.33	1.61	10.0	4.0
38-4	Долгое-2	То же	37.0	0.69	10.60	33.0	0.9
38-5	Долгое-1	»	33.0	0.05	10.90	3.2	4.0
38-6	Долгое-5	»	78.0	0.06	0.27	6.0	1.2
38-7	Долгое-6	»	97.0	0.06	0.32	3.0	0.3
38-9	Долгое-14	»	75.0	0.06	2.62	2.5	6.5
39-1	Коровье	Долгая	128.7	1.51	8.22	6.0	12.3
39-2	Долгое-11	То же	148.1	0.21	2.59	4.0	9.0
39-6	Долгое-13	»	99.0	0.10	0.52	3.0	6.6

ПРИМЕЧАНИЕ. Указаны номер водосбора (рис. 1), название озера, водосбор реки, высота над уровнем моря, площади озера и водосбора, максимальная глубина и расстояние до моря.

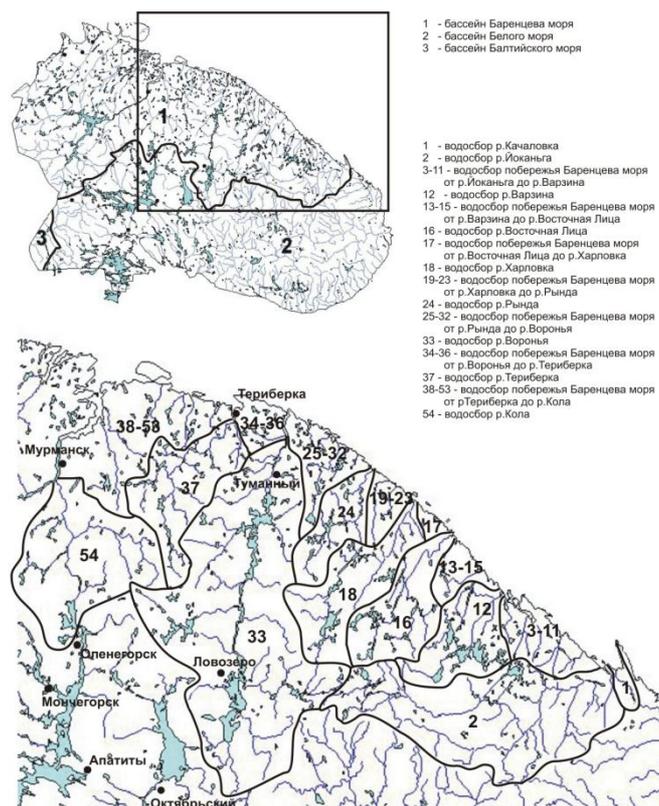


Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер восточной части Мурманской обл. (Баренцево море)

В основном исследовались малые озера площадью от 0.05 до 1.5 км<sup>2</sup> с малыми глубинами, только 5 озер глубже 10 м (максимальная глубина у оз. Третье Титовское – 43.3 м). Озера находятся на высоте от 4.6 до 200 м н. у. м. Площади водосбора озер также меняются в широких

пределах – от 0.3 до 380 км<sup>2</sup>. Географические условия их расположения весьма разнообразны. Ландшафты изменяются от лесных до горных и прибрежных тундр. Исследуемые озера водосбора Баренцева моря, в которых были отобраны образцы ДО, делятся на две группы: 1 – озера прибрежной зоны (на расстоянии от 0.3 до 12.3 км от береговой линии), 2 – озера центральной части Кольского п-ова (160–170 км от Баренцева моря). Из них 14 озер принадлежит к первой группе, 9 озер – ко второй. Влияние морских аэрозолей, помимо гидрохимии водоемов, также сказывается на химическом составе ДО, поэтому две вышеназванные группы озер рассматривались отдельно.

Для оценки экологического состояния озер производился отбор колонок ДО и определение содержания тяжелых металлов (ТМ) в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [7, 8].

### Результаты и их обсуждение

При оценке аккумуляции и распределения химических элементов в ДО озер водосбора Баренцева моря, как и в предыдущей статье [6], 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 создано ТМ, накопленными в ДО.

#### *Фоновые концентрации тяжелых металлов*

При подсчете интенсивности загрязнения очень важно иметь достоверные значения фоновых концентраций. Вместе с тем не существует метода, который мог бы учесть все факторы, влияющие на фоновые концентрации. Фоновые значения определялись в образцах, отобранных из самых глубоких слоев колонок ДО (обычно более 20 см) и отложившихся более 200 лет тому назад, которые характеризуют период до любого заметного загрязнения [9].

Средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер прибрежной зоны выше, чем в озерах центральной части Кольского п-ова – As в 3 раза, Pb и Co в 2.5 раза, Cd в 2 раза, Hg, Ni и Zn в полтора раза (табл. 2). Вероятно, помимо геохимических особенностей территории водосборов озер и увеличения интенсивности выветривания в прибрежной зоне, это связано с влиянием морских аэрозолей на химический состав ДО.

Таблица 2

Средние, минимальные, максимальные фоновые концентрации ТМ (в мкг/г сухого веса) и стандартное отклонение в ДО озер прибрежной зоны (числитель) и озер центральной части Кольского полуострова (знаменатель)

Значение	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	<u>16.7</u>	<u>20.2</u>	<u>86</u>	<u>11.4</u>	<u>0.27</u>	<u>5.28</u>	<u>2.57</u>	<u>0.026</u>
	16.1	13.6	56	4.8	0.13	2.07	0.90	0.016
Минимальное	<u>2.4</u>	<u>8.6</u>	<u>16</u>	<u>4.0</u>	<u>0.02</u>	<u>0.93</u>	<u>0.95</u>	<u>0.007</u>
	3.7	5.0	17	1.6	0.03	0.53	0.63	0.008
Максимальное	<u>36.6</u>	<u>37.5</u>	<u>194</u>	<u>26.7</u>	<u>2.10</u>	<u>12.85</u>	<u>6.77</u>	<u>0.053</u>
	87.1	29.7	139	9.6	0.25	5.30	1.18	0.024
Стандартное отклонение	<u>10.3</u>	<u>8.9</u>	<u>49</u>	<u>7.0</u>	<u>0.53</u>	<u>3.36</u>	<u>2.29</u>	<u>0.016</u>
	26.8	8.2	36	2.5	0.07	1.43	0.21	0.007
Средние по Мурманской обл. [10]	27	27	96	13	0.23	4.4	3.2	0.035
Средние по северо-западу Мурманской обл. [6]	35	34	105	18	0.26	4.6	4.2	0.044

Для большинства ТМ (Ni, Zn, Pb), а также металлов, содержащихся в значительных количествах в морской воде и, следовательно, в морских аэрозолях (Na, K, Mg, Sr), отмечено увеличение содержания в фоновых слоях ДО по мере приближения к побережью моря (рис. 2). Вместе с тем, зафиксировано увеличение содержания Hg и значений потерь при прокаливании по мере удаления от побережья моря.

В основном средние фоновые концентрации изучаемых металлов в ДО водоемов водосбора Баренцева моря меньше, чем в водоемах северо-запада Мурманской обл. и приграничного района Финляндии, Норвегии и России [6], и меньше средних фоновых концентраций в малых озерах Мурманской обл. [10], кроме Cd и Pb в озерах прибрежной зоны. Фоновые концентрации ТМ в ДО исследуемых озер находятся в широком диапазоне (величины стандартного отклонения по большинству металлов сопоставимы со средними значениями), что отражает значительные вариации в геохимии коренных и четвертичных пород и покрывающих их почв, а также интенсивность влияния морских аэрозолей в зависимости от расстояния от побережья, формы рельефа, т. е. в целом условий формирования химического состава ДО озер.

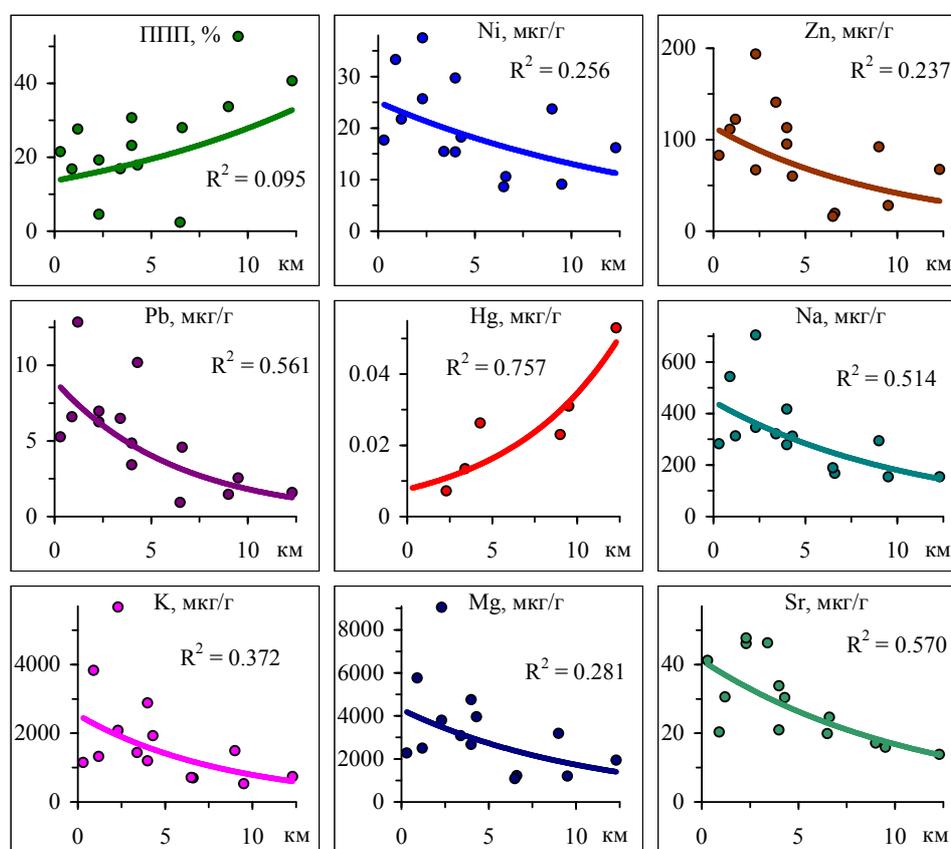


Рис. 2. Распределение величин потерь при прокаливании и концентраций металлов в фоновых слоях ДО исследуемых озер по мере удаления от побережья Баренцева моря

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

Концентрации элементов в фоновых слоях ДО служат маркером, по которому можно судить об интенсивности изменений в аккумуляции металлов на территории водосбора и их последующей седиментации на дно водоема, поэтому установленные в данной работе величины фоновых концентраций металлов в ДО имеют очень большую экологическую и геохимическую ценность. При исследовании вертикального распределения металлов в толще ДО возможно восстановить историю событий, происходивших на территории водосбора конкретного озера, с установлением источника поступления элементов.

Как было сказано выше, территория водосборов исследуемых водоемов не испытывает серьезного антропогенного влияния, озера не получают прямые сбросы загрязняющих веществ. Поступление элементов в водоемы происходит за счет выветривания подстилающих горных пород и атмосферного осаждения. В прибрежной зоне большое влияние оказывает также поступление морских аэрозолей, которое, в силу муссонного характера ветров, усиливается в летние месяцы, когда водоемы не имеют ледяного покрова и преобладают ветры с севера на юг, т. е. от моря в направлении водосборов озер.

В ДО исследуемых водоемов выявлено увеличение содержания ТМ по направлению к поверхности ДО (рис. 3). Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–3 см ДО. Практически во всех озерах отмечается загрязнение ДО халькофильными элементами, в первую очередь Pb и Cd (в 14 и 11 озерах соответственно из 14 озер прибрежной зоны и во всех 9 озерах центральной части Мурманской обл.). К сожалению, не во всех озерах определялись концентрации Hg и As, но там, где они определены, концентрации также увеличиваются по направлению к поверхности ДО (рис. 3). Таким образом, подтвердился результат исследований химического состава ДО озер водосбора Белого моря в пределах Мурманской обл., когда было установлено увеличение концентраций халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb и As) в поверхностных слоях ДО в большинстве водных объектов вне зависимости от того, испытывают они аэротехногенную нагрузку или принимают сточные воды промышленных предприятий [11]. Эти халькофильные элементы в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов [12].

Снижение содержания Pb в поверхностном 1-сантиметровом слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер (рис. 3). Возможно, основная причина этого снижения содержания Pb – запрещение производства этилированного бензина вначале в США и европейских странах (в 1980-е гг.), а затем и в России (1990-е гг.) [13]. Подобная тенденция снижения содержания Pb в поверхностном слое ДО отмечена также в озерах северо-запада Мурманской области и приграничного района между Россией, Норвегией и Финляндией [6].

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

В поверхностном 1-сантиметровом слое ДО некоторых озер установлено увеличение концентраций (по сравнению с фоновыми содержаниями) приоритетных для Мурманской обл. загрязняющих ТМ, главными источниками поступления которых являются горно-металлургические комбинаты «Североникель» и «Печенганикель» – Ni, Cu, Co, Zn (в 12, 10, 8 и 5 озерах прибрежной зоны и в 7, 6, 5 и 6 озерах центральной части Кольского п-ова соответственно). Отмеченное увеличение не достигает масштабов загрязнения, зафиксированного в озерах северо-запада Мурманской обл. и приграничного района Финляндии, Норвегии и России [6], но в некоторых озерах это увеличение многократное. Можно предположить, что при благоприятных погодных условиях воздушные выбросы горно-металлургических комбинатов могут достигать высоких слоев тропосферы, мигрировать на значительные расстояния (до 100 км) и достигать территории водосборов исследуемых озер.

Среднее содержание большинства ТМ в поверхностном слое ДО озер прибрежной зоны выше, чем в озерах центральной части Кольского п-ова – Ni и Cu в 1.5 раза, Cd в 2 раза, Pb в 2.5 раза, Co более чем в 4 раза (табл. 3). Исключение составляют Zn и Hg, средние концентрации которых в озерах центральной части Кольского п-ова в 1.5 раза выше. В целом концентрации ТМ в поверхностном слое ДО исследуемых озер подобны содержаниям, отмеченным в озерах северо-западной части Мурманской обл., удаленных на расстояние около 100 км от горно-металлургических комбинатов [6]. В исследуемых озерах было отмечено уменьшение содержания большинства ТМ в поверхностном слое ДО по мере удаления от побережья Баренцева моря (рис. 4), что можно связать с влиянием морских аэрозолей на формирование химического состава современных ДО. Для щелочных и щелочноземельных металлов подобной закономерности, как в фоновых слоях ДО, отмечено не было.

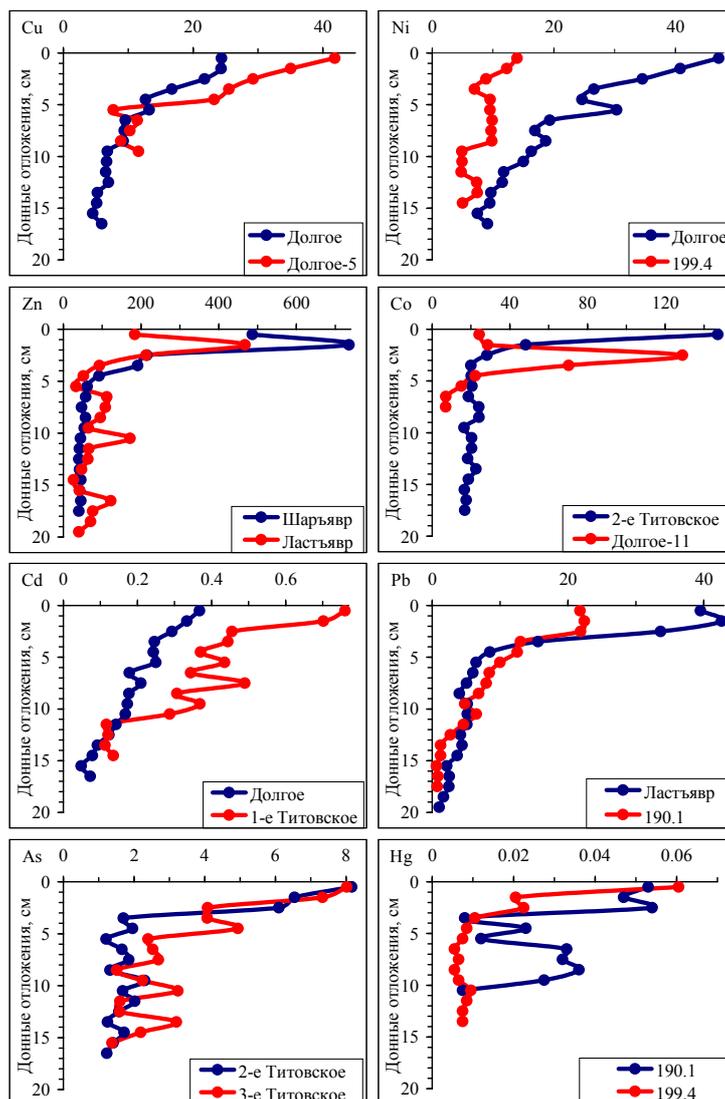


Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г сухого веса) в ДО исследуемых озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря

#### Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер

Для оценки геоэкологического состояния поверхностных вод определялись величины коэффициента и степени загрязнения [14], как это было сделано в предыдущей статье [6]. Коэффициент загрязнения ( $C_f^i$ ) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое ДО к фоновому значению. Степень загрязнения ( $C_d$ ) определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих ТМ.

При оценке состояния придерживались следующей классификации  $C_f^i$ :  $C_f^i < 1$  – низкий;  $1 \leq C_f^i < 3$  – умеренный;  $3 \leq C_f^i < 6$  – значительный;  $C_f^i \geq 6$  – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, из расчета, что суммируются значения коэффициентов загрязнения по 8 элементам (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg), придерживались классификации:  $C_d < 8$  – низкая;  $8 \leq C_d < 16$  – умеренная;  $16 \leq C_d < 32$  – значительная;  $C_d \geq 32$  – высокая степень загрязнения, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Таблица 3

Средние, минимальные, максимальные концентрации ТМ (в мкг/г сухого веса) и стандартное отклонение в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер прибрежной зоны (числитель) и озер центральной части Кольского полуострова (знаменатель)

Значение	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	<u>23.5</u> 15.7	<u>32.9</u> 20.4	<u>100</u> 151	<u>26.0</u> 5.7	<u>0.65</u> 0.32	<u>36.8</u> 15.2	<u>5.03</u> 1.64	<u>0.039</u> 0.056
Минимальное	<u>6.2</u> 6.1	<u>10.9</u> 11.4	<u>27</u> 21	<u>5.0</u> 3.0	<u>0.04</u> 0.05	<u>2.6</u> 6.6	<u>1.55</u> 1.19	<u>0.025</u> 0.018
Максимальное	<u>41.8</u> 52.3	<u>49.1</u> 36.8	<u>200</u> 487	<u>147</u> 12.7	<u>4.11</u> 0.73	<u>136</u> 39.5	<u>8.16</u> 1.99	<u>0.053</u> 0.091
Стандартное отклонение	<u>11.1</u> 14.4	<u>11.3</u> 8.9	<u>58</u> 151	<u>36.6</u> 3.0	<u>1.05</u> 0.20	<u>36.6</u> 10.2	<u>3.19</u> 0.30	<u>0.010</u> 0.026

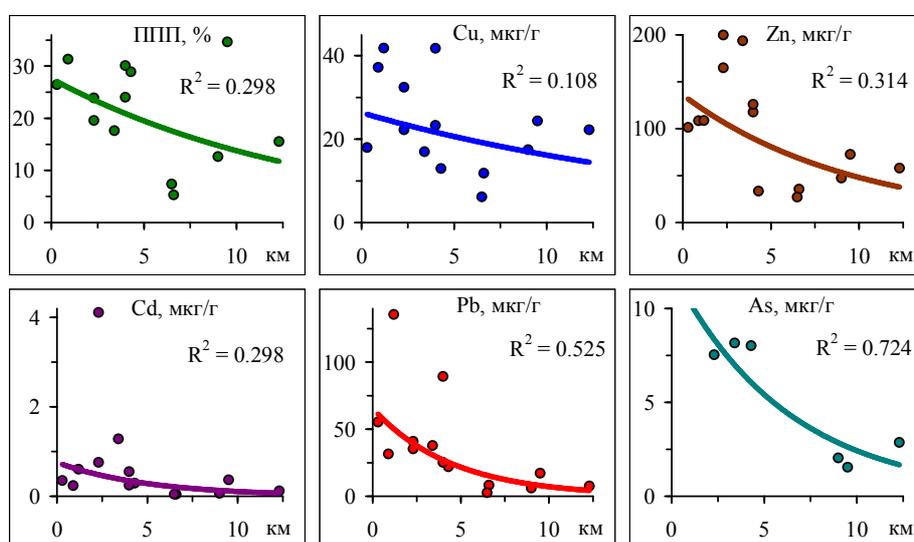


Рис. 4. Распределение величин потерь при прокаливании и концентраций основных загрязняющих элементов в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер по мере удаления от побережья Баренцева моря

В исследуемых озерах отмечено уменьшение значений коэффициента загрязнения халькофильными элементами по мере удаления от побережья Баренцева моря (рис. 5).

Анализ величин коэффициентов загрязнения приоритетных для Мурманской обл. ТМ не выявил определенных закономерностей, за исключением Ni – значения  $C_f^{Ni}$  увеличиваются с удалением от побережья (величина достоверности аппроксимации довольно значительна). Не было выявлено определенных закономерностей в распределении величины степени загрязнения ( $C_d$ ) с удалением от побережья (рис. 5).

Наибольшие величины коэффициента загрязнения отмечены для Pb – высокие значения  $C_f^{Pb}$  имеет почти половина из исследуемых озер как в прибрежной зоне, так и в центральной части Кольского п-ова. Существенное загрязнение также вызывают другие исследуемые халькофильные элементы (Cd, Hg, As) – величины коэффициентов загрязнения этими элементами для более чем половины озер относятся к значительным и высоким по классификации Л. Хокансона [14]. Приоритетные для Мурманской обл. загрязняющие ТМ в преобладающем большинстве озер имеют умеренные величины коэффициента загрязнения.

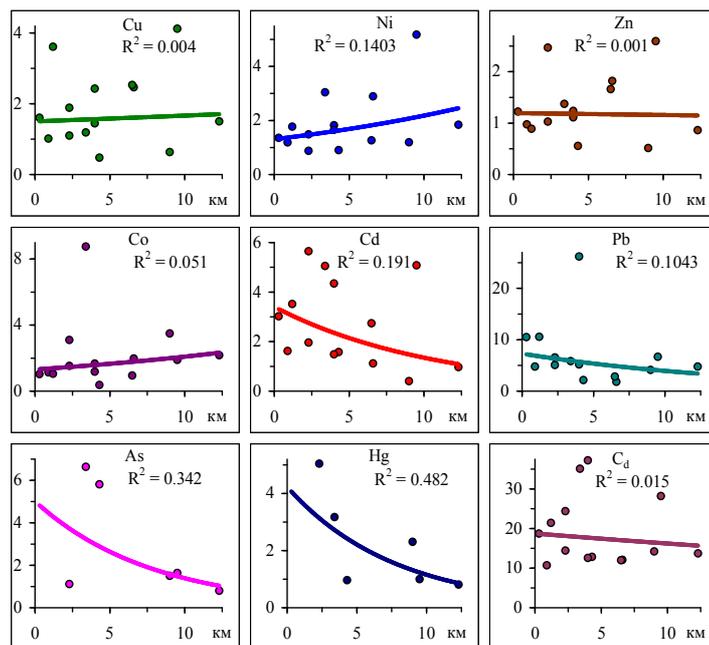


Рис. 5. Распределение величин коэффициента загрязнения ( $C_f^i$ ) ТМ и степени загрязнения ( $C_d$ ) исследуемых озер по мере удаления от побережья Баренцева моря

Таким образом, практически во всех исследуемых озерах зафиксировано загрязнение ДО халькофильными элементами различной степени, от умеренной до высокой, причем не всегда это напрямую связано с точечными источниками загрязнения. Хотя по зависимостям показателя коэффициента загрязнения от удаления от побережья Баренцева моря можно предположить, что перенос морских аэрозолей может являться одним из источников поступления халькофильных элементов. В ранних работах (например [11, 15]) было также установлено, что загрязнение халькофильными элементами в основном носит глобальный характер в отличие от других ТМ, таких как Ni, Cu, Co, Zn, загрязнение которыми в воде и ДО озер явно проявляется в радиусе нескольких десятков километров от источников загрязнения.

### Заключение

Водоемы северо-восточной части Мурманской области бассейна Баренцева моря, несмотря на значительную удаленность от промышленных объектов и населенных пунктов, испытывают довольно значительное загрязнение. Подтверждена выявленная ранее проведенными исследованиями глобальность загрязнения ДО водоемов халькофильными элементами, так как практически во всех исследуемых озерах отмечается загрязнение верхних 1–3 см ДО этими высокотоксичными элементами, в первую очередь Pb и Cd. В прибрежной зоне большое влияние на формирование химического состава ДО оказывает поступление морских аэрозолей, которое, в силу муссонного характера ветров, усиливается в летние месяцы, когда водоемы не имеют ледяного покрова и превалирует направление ветров с севера на юг, т. е. от моря в направлении водосборов озер. Это влияние сказалось в повышении концентраций ТМ в поверхностном слое ДО по направлению к побережью Баренцева моря. Почти половина исследуемых озер характеризуется высокими значениями коэффициента загрязнения Pb. Величины коэффициентов загрязнения другими исследуемыми халькофильными элементами (Cd, Hg, As) для более чем половины озер относятся к значительным и высоким по классификации Л. Хокансона. Приоритетные для Мурманской обл. загрязняющие ТМ (Ni, Cu, Co) в преобладающем большинстве исследуемых озер дают умеренные величины коэффициента загрязнения. В целом пятая часть исследуемых озер загрязнена в высокой степени, треть озер – в

значительной, а остальные озера – в умеренной степени, что свидетельствует о серьезном влиянии на экосистемы водоемов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсы поверхностных вод СССР // Т. С. Антонова и др. Л.: Гидрометеиздат, 1970. Т. 1. 316 с.
2. Водно-энергетические ресурсы Кольского полуострова. М.; Л.: АН СССР, 1958; 1960.
3. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Баренцева моря): в 2 ч. / Н. А. Кашулин и др. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. Ч. 1. 249 с.; ч. 2. 128 с.
4. Инженерно-экологические изыскания для строительства Северной приливной электростанции в районе губы Долгая-Восточная Баренцева моря: отчет о НИР по проведению экологических изысканий в районе губы Долгая-Восточная Баренцева моря. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2008. 169 с.
5. Инженерно-экологические изыскания территории месторождения “Федорова тундра” (Кольский полуостров) (Обоснование инвестиций). Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2007. 151 с.
6. 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.
7. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с.
8. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 103–117.
9. Даувальтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): дис. ... докт. геогр. наук. Апатиты, 1999. 399 с.
10. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н. А. Кашулин и др. // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, №1. С. 98–107.
11. 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.
12. Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace elements to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environ. Rev. 2001. Vol. 4. P. 269–298.
13. 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.
14. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.
15. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в озере Умбозеро, Мурманская область // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 4. С. 461–476.

#### Сведения об авторах

Даувальтер Владимир Андреевич – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

Кашулин Николай Александрович – доктор биологических наук, профессор, зав. лабораторией водных экосистем, зам. директора по научной работе ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;

e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

#### Information about the Author

Vladimir A. Dauvalter – Dr. Sci. (Geogr.), Professor, major scientific 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.. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1 (24). – С. 69–80.

#### Bibliographic Description

Vladimir A. Dauvalter, Nikolai A. Kashulin. The Main Regularities of Heavy Metals Distribution for Lakes Sediments in the Northeast Part Of Murmansk Region of the Barents Sea Basin. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. 2016, vol. 1 (24), pp. 69-80.

УДК 666.12

## ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКОЛ И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**Р. Г. Мелконян<sup>1</sup>, О. В. Суворова<sup>2</sup>, Д. В. Макаров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Московский горный институт НИТУ «МИСиС»

<sup>2</sup>ФГБУН Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН

<sup>3</sup>ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

### Аннотация

Приведены отличия горнопромышленных отходов от традиционного сырья для производства строительных и технических материалов, которые являются причиной столь низкого вовлечения вторичного сырья в переработку. Представлен обзор научной и патентной литературы, посвященной успешному применению горных пород, а также отходов горно-металлургического комплекса и других производств в качестве сырьевых компонентов при производстве стекла и стеклокристаллических строительных материалов.

### Ключевые слова:

*отходы горно-металлургического комплекса, стекла, стеклокристаллические материалы.*

## EXPERIENCE AND PROSPECTS TO USE MINING AND METALLURGICAL WASTES FOR MANUFACTURING GLASS AND GLASS-CERAMIC MATERIALS

**Ruben G. Melkonyan<sup>1</sup>, Olga V. Suvorova<sup>2</sup>, Dmitriy V. Makarov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Moscow State Mining University, National University of Science and Technology MISiS

<sup>2</sup>I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the KSC of the RAS

<sup>3</sup>Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS

### Abstract

Distinctions between raw materials conventionally employed for production of building and technical materials and mining wastes result in very low reprocessing of these secondary raw materials. A survey of scientific literature and patents on the successful involvement of rocks and wastes from mining and smelting enterprises and other industrial wastes in the production of glass-ceramic building materials, is presented.

### Keywords:

*mining and metallurgical waste, glass and glass-ceramic materials.*



Огромные объемы накопленных отвальных пород, хвостов обогащения, шлаков уже в настоящее время создают серьезные экономические и экологические проблемы в районах с развитым горно-металлургическим производством [1]. Как показали В. А. Чантурия и Б. М. Корюкин, горно-металлургический комплекс (ГМК) –

крупнейший источник промышленных отходов, речь идет об экспоненциальном росте загрязнения окружающей среды [2].

В работах В. Т. Калининкова и В. Н. Макарова выделены три класса горнопромышленных отходов (ГПО) по степени их экологической опасности [1, 3]:

- грубодисперсные отходы (вскрышные породы, шлаки), оказывающие неблагоприятное воздействие на природу только вследствие отчуждения земель под их хранение, нарушение гидрологического и гидрогеологического режима и воздушных массопереносов;
- отходы, являющиеся источником вторичного загрязнения воздушного бассейна и открытых водоемов пылью (хвосты безреагентного обогащения, не содержащие сульфидов, золошлаковые смеси ТЭЦ и др.);
- отходы, содержащие водорастворимые загрязнители и токсичные вещества и материалы, переходящие в водорастворимые соединения в процессе хранения в отвалах и хвостохранилищах.

Развиваемая концепция устойчивого развития техносферы предусматривает, в частности, решение экологических проблем путем использования отходов ГМК. С учетом огромных объемов отходов, реальным их потребителем может быть строительная отрасль как наиболее материалоемкая. Как известно, в мире ежегодно добываются сотни миллионов тонн песка, глины, известняка и других видов нерудного сырья для производства строительных материалов. Как правило, такого рода сырье содержится в небольших по глубине карьерах, что приводит к нарушению и выведению из хозяйственного оборота больших площадей земель и нарушению сложившегося экологического равновесия [1]. Объем складированных ГПО соизмерим с потребностью промышленности строительных материалов в минеральном сырье. Однако в настоящее время в России используется не более 8–10 % ГПО. Анализ причин столь низкого вовлечения вторичного сырья в переработку показал, что более 90 % таких материалов существенно отличаются от традиционных по минеральному и химическому составу, физико-химическим и технологическим свойствам [1, 4, 5].

Одним из наиболее существенных отличий является присутствие в составе ГПО минералов и элементов-примесей, не характерных для традиционного минерального сырья. Второе существенное отличие ГПО от традиционного сырья для производства строительных и технических материалов – высокая степень изменчивости их химического, минерального состава, физико-химических и технологических свойств [1, 6, 7].

Оба эти отличия связаны со спецификой образования месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых [1]. Последние формируются в условиях однообразной геохимической и физико-химической обстановки, вследствие этого состав и свойства пород на значительных площадях варьируют в очень небольших пределах. Рудные месторождения возникают в тех случаях, когда возможно повышение концентрации иногда в десятки и сотни раз отдельных компонентов. Это происходит только в условиях значительных градиентов геохимических и термодинамических параметров, что определяет, прежде всего, высокую изменчивость состава и свойств вмещающих пород. В целом ряде случаев возникают околорудные изменения пород и околорудные ореолы – повышенные содержания рудных или сопутствующих рудам минералов или отдельных элементов во вмещающих породах. Поскольку при производстве щебня из вскрышных пород одного из медно-никелевых месторождений не было учтено влияние на свойство бетона таких нехарактерных для традиционного сырья минералов, в период эксплуатации произошло разрушение бетона более чем на 100 объектах [1].

Многолетние исследования В. Н. Макарова с сотрудниками позволили сделать вывод, что неоднородность ГПО обусловлена [1]:

- геологическими причинами (непостоянством состава и свойств сырья в недрах – природная неоднородность);

- техногенными причинами (процессами разубоживания, засорения одного вида нерудного сырья другими видами и дифференциации вещества при складировании в отвалах и хвостохранилищах – техногенная неоднородность).

Как природная, так и техногенная неоднородность состава и свойств ГПО определяется различными факторами и может быть нескольких уровней. Для их устранения или сглаживания должны применяться различные технологические приемы, рассмотренные в работах [1, 7–9].

Опыт успешного применения горных пород, а также отходов ГМК и других производств в качестве сырьевых компонентов при производстве стекла и стеклокристаллических строительных материалов подробно проанализирован в монографии Р. Г. Мелконяна [10]. Проводимые в этой области работы условно разделены на четыре направления, а именно импользование:

- доменных и других металлургических и топливных шлаков для производства стекла и шлакоситаллов;
- первичного и вторичного стеклобоя для получения декоративно-отделочных стекломатериалов;
- горных пород и другого недефицитного минерального сырья для выработки стекловидных и стеклокристаллических материалов;
- отходов химических и других производств для получения стекла и ситаллов.

Ряд исследований посвящен синтезу стекол и разработке технологий производства облицовочных материалов на основе отходов обогащения различных руд. Так, на основе отходов обогащения железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (Лебединский ГОК) с использованием пород вскрыши карьеров разработаны оптимальные составы стекол типа марблит и ситаллов двух видов – эгиринового и геденбергит-диопсидового [11].

В [12] разработана технология утилизации хвостов обогащения медно-колчеданной руды Маднеульского месторождения (Грузия) в стекло. Хвосты использованы в производстве темно-зеленого стекла. При этом повысилась скорость реакции силикато- и стеклообразования в период варки стекла, что объясняется высокой дисперсностью хвостов и аморфностью содержащегося в них кремнезема. Использован следующий рецепт шихты (мас. %): хвосты – 72.6; нефелин – 8.2; известняк – 1.75; сода – 16.4; сульфат – 9.0; уголь – 0.5.

Разработан (С. В. Мулевановым [13, 14]) отделочный материал на основе хвостов обогащения фосфоритной руды.

В работе [15] предложены составы глушеных фосфатосиликатных стекол и технология получения марблита с использованием алюмокремнеземистых отходов.

Авторами [16] исследована возможность использования отходов углеобогажительных фабрик для получения стекла и стеклокристаллических материалов. Получены стекла и стеклокристаллические материалы, не уступающие шлакоситаллам по своим физико-химическим и механическим свойствам.

Разработаны составы бесфтористых стекол, глушение которых осуществляется различными способами, в том числе фосфатными соединениями (апатитовый концентрат Ковдорского ГОКа) [17].

Опыт использования гидрометаллургических шламов и сульфидсодержащих хвостов обогащения для получения стеклокерамических материалов, минерального волокна представлен в работах итальянских исследователей [18, 19].

В РХТУ им. Д. И. Менделеева совместно с НИИ «Автостекло» (г. Константиновка, Донецкая обл., Украина) был разработан новый конструкционный и отделочный материал – шлакоситалл, используемый в промышленности и гражданском строительстве [20]. Также на основе металлургических шлаков разработан новый стеклокристаллический материал – сигран [20]. В качестве технологических добавок предлагается использовать отходы химической промышленности для получения сиграна широкой гаммы цветов, в том числе светлых и красных тонов. Авторами [21] синтезированы составы шлакоситаллов на основе шлаков ТЭС.

В [22] показаны перспективы использования золы-уноса ТЭС для получения стекол и стеклокерамических материалов.

Китайскими авторами выявлена возможность получения эффективного стеклокерамического материала из пустой породы угледобычи [23]. Стеклокерамика, включающая 70 % отходов и 30 % CaO, характеризуется плотной и однородной микроструктурой с размером кристаллов около 4 мкм. Основной кристаллической фазой является геленит  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ , в небольших количествах зафиксирован нефелин  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ . Полученный материал характеризуется хорошими механическими свойствами, кислотостойкостью и щелочестойкостью.

Зарубежный опыт использования шлаков черной и цветной металлургии для производства различных строительных материалов, в том числе стекол и стеклокристаллических материалов, обобщен в обзорах [24, 25].

Развивается и совершенствуется технология каменного литья [26–38]. Производство литых изделий из плавящихся горных пород (базальта, диабазы и др.) в настоящее время широко распространено во всех промышленных странах. Материалы, получаемые методом каменного литья, имеют хорошие механические и химические свойства. Изделия после разлива в металлические или песчаные формы и термообработки приобретают красивый внешний вид, имитирующий природный камень. Полезные свойства изделий могут быть еще более усилены, если в технологии каменного литья использовать метод получения ситаллов (метод катализованной кристаллизации). Возможности использования каменного литья в качестве замены природного материала (мрамора, гранита) для изготовления архитектурно-декоративных изделий рассмотрены авторами [36].

В [37] показана возможность применения фосфогипса – крупнотоннажного отхода производства фосфорных минеральных удобрений – в качестве сырьевого материала при производстве каменного литья. Литой камень, изготовленный с использованием фосфогипса, имеет черный цвет. Это позволяет использовать материал для изготовления наружной и внутренней облицовки зданий, брусчатки и плит мощения улиц и площадей, скульптур, элементов декора и т. д.

Некоторые искусственные и техногенные силикатные стекла рассматриваются как ювелирно-поделочное и декоративное сырье. Так, С. С. Потаповым и В. А. Наумовым [39] описаны техногенные минералоиды: тенгизит – стекловатый материал, образованный в очаге нефтяного пожара, опалесцит и стеклоагат из шлаковых отвалов предприятий черной металлургии Уральского региона, индигофорстерит – частично раскристаллизованный материал из кристаллов форстерита в матрице силикатного стекла, являющийся шлаком производства феррохрома на ряде заводов Челябинской области.

Как известно, традиционные сырьевые материалы для производства минерального волокна – основные горные породы габбро-базальтового типа [40]. Искусственное минеральное волокно широко применяют для производства теплоизоляционных и акустических изделий [41]. В мире наблюдается тенденция к увеличению производства теплоизоляционных материалов из минерального волокна, что обусловлено ростом капитального строительства энергосберегающих объектов и повышением их технико-экономических характеристик [41]. Вместе с тем, месторождения базальтов достаточно редки, а их добыча и подготовка требуют существенных затрат.

В этой связи перспективным направлением становится использование отходов ГМК для получения минерального волокна.

Большое значение при обосновании использования огненно-жидких шлаков медно-никелевой промышленности Заполярья (комбинат «Североникель», АО «Кольская ГМК») в производстве минерального волокна, шлакового литья и других строительных материалов имели работы Е. Е. Россинского, Б. А. Брянцева, В. Н. Макарова [42, 43]. Количество огненно-

жидких шлаков комбината практически полностью обеспечивало потребности стройиндустрии и энергетиков Мурманской обл. в минераловатных плитах.

Экспериментальным и расчетным путем подтверждена возможность использования шихты, содержащей в качестве основного компонента дисперсные отходы переработки гранитных пород, образующихся при производстве щебня и отсевов доломита, для производства минеральной ваты [40].

В Государственном научно-исследовательском институте стекла (ГИС) разработан декоративно-облицовочный материал – стеклокерамит, при изготовлении которого широко используются различные отходы стекла [44, 45]. Стеклокерамит – двухслойный композиционный материал, получаемый путем термообработки смеси стеклобоя, глины и песка. Нижний слой (подложка), содержащий около 70 % отходов стекла, представляет собой спеченный монолит с шероховатостью, обеспечивающей надежное сцепление плит со строительными конструкциями с помощью полимерцементных растворов. Дополнительное введение 30 % глины в нижний слой повышает прочность декоративно-облицовочного материала и существенно упрощает технологию его производства. Увлажненная смесь для нижнего слоя обладает достаточной пластичностью, что позволяет механизировать процесс формирования изделий с сохранением в дальнейшем приданной им формы. Лицевая сторона стеклокерамита представляет собой гладкую огненно-полированную поверхность. Для ее декорирования применяются гранулы различных цветных стекол, в том числе отходы, образующиеся при производстве цветных облицовочных материалов.

В Белорусском научно-исследовательском институте строительных материалов создана технология производства декоративно-облицовочного пеностекла-пенодекора, основным сырьем для которого служат отходы стекла и стекольный бой [46].

Разработан декоративно-облицовочный материал – порокремнезит, изготавливаемый путем спекания смеси из стеклобоя и кварцевого песка [47]. Для снижения плотности плит в нижний слой материала вводили вещества, способствующие газообразованию (мел).

На Ленинском стекольном заводе получен новый вид декоративно-облицовочного материала строительного назначения – стеклокремнезит [48]. Материал синтезирован на основе стеклогранулята определенного химического состава с использованием кварцевого песка и других добавок. Технология производства стеклокремнезита дает возможность производить изделия с практически неограниченным разнообразием цветовых оттенков и текстур, получая материал для внутренней и наружной облицовки зданий и сооружений. Введение в нижний конструкционный слой стеклокремнезитовых плит отходов горных производств, стекол, в том числе кристаллизующихся, дает возможность улучшить качественные показатели материала и его товарный вид, существенно снизить энергоемкость технологического процесса [48].

Как отмечено ранее, важнейшая проблема при переработке отходов ГМК в строительные материалы – неоднородность техногенного сырья. Для устранения ее влияния, регулирования свойств сырья и конечной продукции, управления параметрами технологического процесса В. Н. Макаровым с сотрудниками установлены и математически описаны взаимосвязи состава вторичного сырья и ряда важнейших технологических свойств – температуры полного плавления, вязкости при заданной температуре, растворимости в расплаве компонентов, инициирующих ликвацию, химической стойкости получаемых материалов [8, 9, 49–54]. Авторами разработаны алгоритм и программа вычисления температуры ликвидуса и логарифма вязкости алюмосиликатных расплавов по их химическому составу. Программа позволяет оперативно регулировать технологические параметры и организовать управление процессами варки и выработки расплавов, а также отжига готовых изделий при получении высокосортного минерального волокна, стекол, стеклокристаллических и керамических материалов, в том числе со специальными свойствами (декоративных, кислото- и щелочестойких, термостойких и др.). Данный подход можно применить и к другим технологиям (цветной и черной металлургии) и системам (шлакам, солевым расплавам и др.) [55–57].

Алгоритм исследований техногенного сырья для производства волокна и литых заготовок петруггическим рециклингом рассмотрен в работе А. М. Игнатовой [38]. Методика позволяет сделать вывод о том, какой именно тип петруггических материалов – стеклообразный или стеклокристаллический – возможно получить из исследуемого сырья. Установлено, что рециклинг применим по отношению к любому техногенному силикатному сырью. Отмечены следующие особенности: безжелезистые однокомпонентные шихты предпочтительнее для изготовления волокон, железистые – для литых заготовок. Применение корректирующих подшихтовок позволяет получать каменное литье из безжелезистых и волокно из железистых шихт.

## Заключение

Вовлечение в переработку отходов ГМК – перспективное современное направление в промышленности строительных материалов. Использование вторичного сырья способствует снижению экологической нагрузки на окружающую среду, расширению минерально-сырьевой базы и сокращению потребности в первичном сырье. На основании представленного анализа литературных данных можно заключить, что к настоящему моменту предложено большое число технологических решений по разработке стекломатериалов с использованием техногенного сырья. Для решения проблем, возникающих при переработке отходов ГМК, разработаны алгоритм и программа оптимизации качества стекломатериалов из сырья непостоянного состава, описанные в работах [8, 9, 38, 49–54].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В. Н. Экологические проблемы утилизации горнопромышленных отходов: в 2 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 1. 132 с.; Ч. 2. 146 с.
2. Чантурия В. А., Корюкин Б. М. Анализ техногенного минерального сырья Урала и перспективы его переработки // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения). Доклады международной конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. Т. 3. С. 26–34.
3. Калинин В. Т., Макаров В. Н., Кременецкая И. П. Классификация горнопромышленных отходов по степени их экологической опасности // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. Т. 5, № 5. С. 169–178.
4. Макаров В. Н. Минералогические критерии комплексной переработки рудовмещающих гипербазитов. Апатиты: КНЦ РАН, 1989. 96 с.
5. Возможности и перспективы использования отходов горнопромышленного комплекса для получения стекла и стеклокристаллических материалов / О. В. Суворова [и др.] // Экология промышленного производства. 2011. № 1. С. 54–60.
6. Бетоны из вторичного сырья / Б. И. Гуревич [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 160 с.
7. Использование горнопромышленных отходов как сырья для производства строительных и технических материалов / В. Н. Макаров [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. Т. 7, № 2. С. 183–187.
8. Математическое описание некоторых свойств расплавов базальтового состава / В. Т. Калинин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 105 с.
9. Математическое описание зависимости вязкости от состава и температуры сульфидсодержащего базальтоидного расплава / В. Т. Калинин [и др.] // Доклады РАН. 1998. Т. 362, № 3. С. 357–358.
10. Мелконян Р. Г. Аморфные горные породы и стекловарение. М.: НИА Природа, 2002. 266 с.
11. Минько Н. И., Жерновая Н. Ф. Стеклообразование и свойства стекол в системах  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  // Всесоюзное совещание «Научно-технический прогресс в производстве стекла». М.: ВДНХ, 1983. С. 176.
12. Кутателадзе К. С. К вопросу использования горных пород в стекольной промышленности // Использование в стекольной промышленности неапатитных материалов. М.: ВНИИЭСМ, 1971. С. 3–11.
13. Мулеванов С. В. Синтез и разработка технологии облицовочного материала на основе отходов обогащения фосфоритной руды: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 15 с.
14. Мулеванов С. В. Особенности кристаллизации стекла на основе отходов обогащения фосфоритной руды // Стекло и керамика. 2008. № 6. С. 13–14.
15. Использование алюмокремнеземистых отходов для производства отделочных материалов / Б. Г. Варшал [и др.] // Стекло и керамика. 1982. № 3. С. 21–24.
16. Егорова Л. С., Ярокер Х. Г. Использование промышленных отходов в производстве цветных декоративно-строительных материалов // Сб. ВНИИЭСМ. Сер. 9, вып. 7. М.: ВНИИЭСМ, 1986. С. 15–17.
17. Якунов В. Ш. Использование апатитового концентрата для производства глушеного стекла // Сб. ВНИИЭСМ. Сер. 9, вып. 7. М.: ВНИИЭСМ, 1986. С. 37–39.
18. Crystallization of glasses obtained by recycling goethite industrial wastes to produce glass-ceramic materials / M. Pelino [et al.] // Journal of Material Science. 1994. Vol. 29. P. 2087–2094.
19. New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramics and glass- and rock-wool fibre / A. M. Marabini [et al.] // International Journal of Mineral Processing. 1998. Vol. 53. P. 121–134.
20. Саркисов П. Д. Направленная кристаллизация стекла – основа получения многофункциональных стеклокристаллических материалов. М.: Высшая школа, 1997. 216 с.
21. Синтез стекол для получения шлакоциталлов на основе шлаков ТЭС / Е. А. Яценко [и др.] // Стекло и керамика. 2009. № 9. С. 8–9.
22. Erol M., Küçükbayrak S., Ersoy-Merçiboşu A. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 153. P. 418–425.
23. Preparation of  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  glass ceramics from coal gangue / M. Yang [et al.] // International Journal of Mineral Processing. 2012. Vol. 102–103. P. 112–115.
24. Gorai B., Jana R. K., Premchand. Characteristics and utilization of copper slag – a review // Resources, Conservation and Recycling. 2003. Vol. 39, N 4. P. 299–313.

- 25** Piatak N. M., Parsons M. B., Seal R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: a review // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. P. 236–266. **26.** Лебедева Г. А., Озерова Г. П., Калинин Ю. К. Классификация петруггического сырья. Л., 1979. 120 с. **27.** Технология декоративного каменного литья и механическая обработка изделий из него / Л. К. Тимофеева [и др.] // Сб. ВНИИЭСМ. Сер. 9, вып. 12. М.: ВНИИЭСМ, 1983. С. 15. **28.** Декоративное каменное литье: а. с. СССР № 1143710 / Е. К. Назимова [и др.]. **29.** Способ получения каменного литья: а. с. СССР № 1230839 / Е. К. Назимова, А. А. Предовский, Г. В. Вебер. **30.** Декоративное каменное литье – веберит: а. с. СССР № 1289851 / Е. К. Назимова, А. А. Предовский, Г. В. Вебер. **31.** Декоративное каменное литье: а. с. СССР № 330096 / Е. К. Назимова [и др.]. **32.** Ушаков Д. Ф., Ильина В. П. Декоративный стеклокристаллический материал // Стекло и керамика. 1991. № 6. С. 25–26. **33.** Декоративное каменное литье и шихта для декоративного каменного литья: пат. РФ № 2033398. / В. Н. Макаров, И. С. Кожина. **34.** Ильина В. П. Стеклокристаллические материалы на основе минерального и техногенного сырья Карелии // Стекло и керамика. 2007. № 9. С. 20–23. **35.** Физико-химическое моделирование процессов формирования базальтовых расплавов для петруггии / И. З. Бабиевская [и др.] // Неорганические материалы. 2008. Т. 44, № 12. С. 1476–1482. **36.** Игнатова А. М., Черных М. М., Игнатов М. Н. Изготовление художественных и архитектурно-декоративных изделий каменного литья // Стекло и керамика. 2011. № 6. С. 31–35. **37.** Колдаев А. Б. Каменное литье: применение при производстве строительных изделий // Химическая технология. 2014. Т. 15, № 4. С. 193–200. **38.** Игнатова А. М. Алгоритм исследования техногенного сырья для производства волокна и литых заготовок петруггическим рециклингом // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 160–165. **39.** Потапов С. С., Наумов В. А. Искусственные и техногенные силикатные стекла как ювелирно-поделочное и декоративное сырье // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. Пермь: ПГУ, 2006. Вып. 9. С. 146–153. **40.** Исследование возможности использования дисперсных отходов переработки гранитных горных пород для производства минеральной ваты / А. В. Бортников [и др.] // Обогащение руд. 2014. № 6. С. 33–37. **41.** Термическая устойчивость минераловатных теплоизоляционных материалов / М. П. Красновских [и др.] // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87, № 10. С. 1429–1433. **42.** Россинский Е. Е. Металлургические шлаки медно-никелевой промышленности Заполярья (свойства и применение). Л., 1974. 284 с. **43.** Строительные и технические материалы из минерального сырья Кольского полуострова / В. Н. Макаров [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2003. Ч. 1. 234 с. **44.** Стеклокерамит – новый декоративно-облицовочный материал / Н. Г. Кисиленко [и др.] // Стекло и керамика. 1983. № 8. С. 15–17. **45.** Туркина В. Ю., Кисиленко Н. Г., Полуротова Т. В. Стеклокерамит – эффективный облицовочный материал // Реф. информация. Серия «Стекольная промышленность». М.: ВНИИЭСМ, 1988. Вып. 7. С. 6–8. **46.** Производство пеностекла – облицовочного материала из вспененного стекла / Б. К. Демидович [и др.] // Промышленность строительных материалов. Серия «Стекольная промышленность». М.: ВНИИЭСМ, 1985. Вып. 9. С. 8–11. **47.** Мелконян Р. Г., Тимонина Г. П. Использование отходов в производстве отделочных материалов // ВНИИЭСМ. Экспресс-информация. Технология строительных материалов. М.: ВНИИЭСМ, 1983. Вып. 2. С. 8–11. **48.** Быков А. С. Стеклокремнезит. Технология производства и применения в строительстве. М.: Стройиздат, 1994. 256 с. **49.** Макаров В. Н., Суворова О. В., Макарова И. В. Расчет вязкости расплавов в системе  $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$  // Физика и химия стекла. 1998. Т. 24, № 6. С. 767–773. **50.** Макаров В. Н., Суворова О. В. Растворимость апатита в силикатных расплавах, содержащих диопсид // Стекло и керамика. 1997. № 2. С. 18–20. **51.** Декоративные стекла из вторичного сырья / В. Н. Макаров [и др.] // Стекло и керамика. 1998. № 8. С. 22–24. **52.** Химический состав и свойства фосфатсодержащего декоративного стекла / В. Н. Макаров [и др.] // Журнал прикладной химии. 1998. Т. 71, № 5. С. 736–739. **53.** Растворимость апатита в алюмосиликатных расплавах систем альбит-диопсид, анортит-диопсид и ортоклаз-диопсид / В. Н. Макаров [и др.] // Физика и химия стекла. 2002. Т. 28, № 3. С. 255–264. **54.** Рентгенографическое исследование структуры многокомпонентных стекол на основе горнопромышленных отходов / Р. Н. Осауленко [и др.] // Кристаллография. 2004. Т. 49, № 4. С. 649–654. **55.** Макарова И. В., Макаров В. Н., Макаров Д. В. К вопросу расчета вязкости некоторых металлургических шлаков // Металлы. 1999. № 5. С. 22–25. **56.** Макарова И. В., Макаров В. Н., Макаров Д. В. Математическое описание поверхности ликвидуса некоторых металлургических шлаков // Изв. вузов. Черная металлургия. 2000. № 3. С. 10–13. **57.** Калинин В. Т., Макарова И. В., Макаров Д. В. Математическое описание некоторых свойств металлургических шлаков. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. 139 с.

### Сведения об авторах

*Мелконян Рубен Гарегинович* – доктор технических наук, профессор Московского горного института НИТУ «МИСиС»;

e-mail: mrg-kanazit@mail.ru

*Суворова Ольга Васильевна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН;

e-mail: suvorova@chemy.kolasc.net.ru

*Макаров Дмитрий Викторович* – доктор технических наук, зав. лабораторией экологии промышленного производства ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;

e-mail: makarov@inep.ksc.ru

**Information about the authors**

*Ruben G. Melkonyan* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow State Mining University, National University of Science and Technology MISiS;

e-mail: mrg-kanazit@mail.ru

*Olga V. Suvorova* – PhD (Eng.), senior researcher 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: suvorova@chemy.kolasc.net.ru

*Dmitry V. Makarov* – Dr. Sci. (Eng.), head of laboratory of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;

e-mail: makarov@inep.ksc.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Мелконян Р.Г.* Опыт и перспективы использования отходов горно-металлургического комплекса для получения стекол и стеклокристаллических материалов / *Р. Г. Мелконян, О. В. Суворова, Д. В. Макаров* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1 (24). – С. 81–88.

**Bibliographic Description**

*Ruben G. Melkonyan, Olga V. Suvorova, Dmitry V. Makarov.* Experience and Prospects to Use Mining And Metallurgical Wastes for Manufacturing Glass And Glass-Ceramic Materials. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016, vol. 1 (24), pp. 81-88.

УДК 631.46.461

**ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ  
ПРИГРАНИЧНОГО РАЙОНА РОССИЯ – НОРВЕГИЯ****Г. А. Евдокимова, М. В. Корнейкова, Н. П. Мозгова, В. В. Редькина, Н. В. Фокина**  
ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН**Аннотация**

В 2010–2015 гг. проводились исследования почв и почвенной биоты в Государственном заповеднике «Пасвик». Выявлено, что бактериальная масса под сосняками превосходила ее размеры под березняками, причем в сосняке лишайниково-брусничном наибольшая численность и биомасса почвенных бактерий была под брусникой (0.71 мг/г почвы), наименьшая – под багульником и лишайниками (0.42 мг/г). Длина грибного мицелия в почве мониторинговых площадок достигала значительных величин – более 1000 м в 1 г почвы, его биомасса изменялась от 1.5 до 3.0 мг/г почвы. Грибная биомасса в органогенных горизонтах значительно, в 2-4 раза, превосходит бактериальную. Степень сходства видового состава комплексов микромицетов соснового и березового лесов составила 67 %. Виды *Aspergillus ustus*, *Acremonium egyptiacum*, *Myxotrichum deflexum* были выделены в почвах Кольского полуострова впервые. Разнообразие грибов в почве березового леса было более богатым, чем в почве под сосняком. В ризосфере различных растений формируется довольно специфичный грибной комплекс, отличающийся доминантными видами. Численность жизнеспособных клеток водорослей в подстилке березняка превосходила их численность в подстилке соснового леса, где она была наименьшей под багульником и лишайниками, что характерно и для бактерий. Максимальное число водорослей выявлено в березняке под хвощом – более 1 млн клеток.

**Ключевые слова:**

*бактерии, грибы, численность, биомасса, разнообразие, лесные и горные почвы.*

**ENVIRONMENTAL AND BIOLOGICAL DESCRIPTION OF SOILS  
IN THE RUSSIAN–NORWEGIAN BORDER AREA****Galina A. Evdokimova, Mariya V. Korneykova, Natalia P. Mozgova,  
Vera.V. Redkina, Nadezhda V. Fokina**

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

**Abstract**

Soils and soil biota of “Pasvik” State Reserve were studied in 2010-2015. Bacterial mass under pine forests is higher than under birch forests, besides, the highest number and biomass of bacteria in the lichen-cowberry pine forest are found under cowberry (0.71 mg/g of soil), the lowest one – under wild rosemary and lichens (0.42 mg/g). The length of fungi mycelium in the soil of monitored plots amounts to considerable values, namely more than 1000 m per 1 kg of soil, mycelium biomass varies from 1.5 to 3.0 mg/g. The fungi biomass in organic horizons substantially (by 2-4 times) exceeds the bacterial biomass. The degree of similarity in species composition of micromycetes complexes between pine and birch forests was 67 %. The species *Aspergillus ustus*, *Acremonium egyptiacum* and *Myxotrichum deflexum* were found in soils of the Kola Peninsula for the first time. Fungi diversity in the soil of birch forests is richer than in the soil of pine forests. Quite a specific fungi complex, characterized by dominating species, is formed in the rhizosphere of different plants. The abundance of viable algae cells in the litter of the birch forest exceeds their number in the litter of the pine forest where the lowest value was under wild rosemary and lichens, which is typical for the bacteria too. The highest abundance of algae was found in the birch forest under the horsetail, namely more than 1 million cells.

**Keywords:**

*bacteria, fungi, abundance, biomass, diversity, forest and mountain soils.*

В 2010 г. совместно с профессором В. Н. Переверзевым были начаты исследования почв и почвенной биоты в Государственном заповеднике «Пасвик». Они продолжаются и в настоящее время. Работы по изучению бактерий, микроскопических грибов и микроводорослей в почвах заповедника являются пионерными.

### **Объекты и методы исследований**

Исследования проведены на территории Мурманской обл. в Государственном природном заповеднике «Пасвик», расположенном в Печенгском районе в долине р. Паз по обе стороны государственной границы России и Норвегии. Объект исследования – почвенная биота заповедника (г. Калкупя, мониторинговые площадки ICP-Forest лаборатории наземных экосистем на о. Варлама и под пос. Янискоски, г. Кораблекк как прилегающая территория) (табл. 1).

Образцы для микробиологического анализа брали из органогенного горизонта с каждой площадки в трех точках со всеми мерами, предупреждающими их контаминацию. Микробиологические анализы выполнены общепринятыми в практике стандартными методами: посев на плотные селективные питательные среды и прямое микроскопирование. Определяли численность сапротрофных бактерий на мясо-пептонном агаре и олиготрофных бактерий на слабоминерализованной среде Аристовской. Численность грибов определяли методом посева на среду Чапека и сусло-агар с добавлением молочной кислоты из расчета 4 мл на 1 л среды для ингибирования роста бактерий. Выделение грибов для их идентификации проводили с этой среды. Расчеты численности микроорганизмов выполнены на 1 г абс. сухой почвы.

Анализ биологического разнообразия грибов выполнен на основе культурально-морфологических признаков с использованием определителей [1–6]. Видовые названия уточняли по пополняемым спискам видов в базе данных “Species fungorum” [7].

Общая численность и биомасса бактерий и грибов определена современным, принятым в практике микробиологических исследований методом флуоресцентной микроскопии с использованием поликарбонатных мембранных фильтров [8].

Для определения численности и разнообразия микроскопических водорослей брали образцы из верхнего слоя органогенного горизонта (подстилки) в 3–5-кратной повторности. Численность живых клеток водорослей определяли методом прямого счета под люминесцентным микроскопом на сухих мазках почвенной суспензии [9].

Для исследования таксономического состава водорослевых ценозов использовали метод чашечных культур с покровными стеклами, метод посева почвенного мелкозема на агаризованную среду, а также водные культуры водорослей на среде Болда. Родовую и видовую принадлежность водорослей определяли по морфологическим признакам, следуя отечественным и зарубежным определителям [10–12].

**Почвы. Горы Кораблекк и Калкупя.** На северо-западных склонах гор достаточно четко проявляется вертикальная поясность растительного покрова. Лесной пояс представлен мохово-кустарничковым сосновым лесом, который выше по склону меняется на пояс березового редколесья. Вершины гор заняты воронично-лишайниковой тундрой. Почвообразующие породы – элювий коренных пород, маломощным и прерывистым плащом покрывающий сглаженную ледником поверхность коренных пород. Скопления каменистого элювия занимают обычно неглубокие (до 30–40 см) депрессии. На нем сформировались подбуры – почвы с недифференцированным профилем. Описание почв дано по В. Н. Переверзеву [13].

В верхней части минерального профиля, на контакте с залегающим выше оторфованным органогенным горизонтом, мощность которого составляет 10–12 см, явно видны признаки оподзоливания – кремнеземистая присыпка на темно-буром фоне. Иллювиальный горизонт, залегающий под торфянистым слоем, неравномерно окрашен: на темно-буром фоне более светлые пятна. Минеральный профиль отличается тиксотропностью, вызванной его

переувлажнением, которое связано с микрорельефом. На дне разреза (на глубине 60 см) выступала вода.

Таблица 1

Характеристика мест отбора почвенных образцов

Место отбора	Координаты	Горизонт Ао, глубина, см	Характеристика участка
Г. Кораблекк, вершина	69° 14' N 29° 27' E 303 м над ур. м.	0–10	Горная тундра, воронично-лишайниковая. Вороника, карликовая березка, черника, мхи, лишайники
Г. Кораблекк, северо- западный склон	69° 14' N 29° 27' E 232 м над ур. м.	0–10	Горная лесотундра. Березовое редколесье. Карликовая березка, вороника, черника, брусника, голубика, морошка, багульник, мхи
Г. Кораблекк, северо-западный склон	69° 14' N 29° 27' E 155 м над ур. м.	0–5	Сосняк мохово-кустарничковый с примесью березы. Вороника, черника, брусника, голубика, багульник, мхи
Г. Калкупя	69°17'15" N 29°22'25" E 276 м над ур. м	0–5	Горная тундра, воронично- лишайниковая. Вороника, карликовая березка, лишайники, мхи, ива
Г. Калкупя	69°17'08" N 29°23'03" E 180 м над ур. м	0–5	Березовое редколесье. Вороника, черника, зеленые мхи.
Г. Калкупя	69°17'01" N 29°23'47" E 85 м над ур. м	0–3	Сосняк мохово-кустарничковый. Вороника, черника, брусника, зеленые мхи
О. Варлама ICP-Forest	68° 58' N 28° 48' E 120 м над ур. м.	0–5 (7)	Березняк разнотравный. Хвощ, вороника, брусника, злаки, вика. Почва под хвощом
О. Варлама ICP-Forest	68° 58' N 28° 48' E 120 м над ур. м.	0–5 (7)	Березняк разнотравный. В растительном покрове доминирует <i>Vicia</i> spp. Почва под бобовыми
О. Варлама ICP-Forest	68° 58' N 28° 48' E 120 м над ур. м.	0–5	Березняк разнотравный. В растительном покрове доминируют злаки. Почва под злаками
Янискоски ICP-Forest	69° 08' N 29° 14' E 51 м над ур. м.	0–2 (3)	Сосняк лишайниково-брусничный. Брусника, вороника, багульник, зеленые мхи, лишайники. Почва под лишайниками
Янискоски ICP-Forest	69° 08' N 29° 14' E 51 м над ур. м.	0–3 (5)	Сосняк лишайниково-брусничный. Почва под брусничкой
Янискоски ICP-Forest	69° 08' N 29° 14' E 51 м над ур. м.	0–3	Сосняк лишайниково-брусничный. Почва под зелеными мхами
Янискоски ICP-Forest	69° 08' N 29° 14' E 51 м над ур. м.	0–10	Сосняк лишайниково-брусничный. Почва под багульником

В тундровом поясе изредка встречаются пятна, лишенные растительности, образование которых связано с проявлением сезонных криогенных процессов: замораживания и размораживания минеральной массы, изливающейся на поверхность в виде криогенного пятна.

Диаметр таких пятен небольшой – примерно 0.5 м. Профиль почвы-криозема не дифференцирован на генетические горизонты, он сложен криотурбированным слоем тиксотропного мелкозема с большим количеством дресвянистого и обломочного материала.

В лесотундровом и лесном поясах горы сформировались типичные Al-Fe-гумусовые подзолы с хорошо развитым подзолистым горизонтом мощностью до 7–10 см. Почвообразующей породой служит элюво-делювий коренных пород песчаного гранулометрического состава с некоторой примесью моренного материала, доля которого вниз по склону возрастает. Породы и сформировавшиеся на них почвы отличаются значительным количеством крупнообломочного материала. Нередки выходы на поверхность коренных пород. Микрорельеф на склонах горы связан в основном с крупными валунами, выступающими над поверхностью почвы и покрытыми обычно довольно мощной торфянистой подстилкой.

Почвы остальных мониторинговых участков – Al-Fe-гумусовые подзолы с мощностью органогенного горизонта 5–10 см.

### Результаты и обсуждение

Значимым и относительно ряда других свойств почвы стабильным показателем состояния почвы, ее кислотно-основного режима служит показатель значений pH почвенной суспензии. В то же время этот показатель – определяющий для развития в природных средах представителей двух больших экологических групп биоты – ацидофилов и алкалофилов. Как и следовало ожидать, подстилка на всех апробированных участках кислая, в среднем значения pH изменялись от 3.81 до 5.46 (табл. 2). Влажность подстилки горных ландшафтов высокая, в лесах равнинных ландшафтов она ниже. Влажность подстилок в сосняке была наименьшей под кустарничками, включая багульник ( $67.8 \pm 9.5\%$ ), и значительно выше под мхами ( $152.4 \pm 35.2\%$ ). В березняке она была выше под бобовыми и ниже под злаковыми травами, отличающимися большей разреженностью.

Таблица 2

Влажность почвы (%) и pH водной вытяжки

Место отбора проб	Влажность	pH
Г. Кораблекк, горная тундра	203.0	$4.40 \pm 0.01$
Г. Кораблекк, березовое редколесье	455.6	$4.80 \pm 0.02$
Г. Кораблекк, сосняк мохово-кустарничковый	395.0	$4.50 \pm 0.02$
Г. Калкупя, горная тундра	$191.0 \pm 59.0$	$3.99 \pm 0.13$
Г. Калкупя, березовое редколесье	$201.0 \pm 28.0$	$4.22 \pm 0.07$
Г. Калкупя, сосняк мохово-кустарничковый	$213.0 \pm 40.0$	$3.81 \pm 0.04$
ICP-Forest, березняк разнотравный, почва под хвощом	$98.9 \pm 18.0$	$5.43 \pm 0.11$
ICP-Forest, березняк разнотравный, почва под бобовыми	$175.8 \pm 27.0$	$5.46 \pm 0.05$
ICP-Forest, березняк разнотравный, почва под злаками	$48.5 \pm 8.9$	$5.03 \pm 0.09$
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под лишайниками	$149.1 \pm 27.4$	$4.08 \pm 0.05$
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под брусникой	$67.8 \pm 9.5$	$4.06 \pm 0.09$
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под мхами	$152.4 \pm 35.2$	$3.96 \pm 0.11$
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под багульником	$67.8 \pm 8.9$	$3.92 \pm 0.08$

**Микроорганизмы.** В почвах горных экосистем численность сапротрофных бактерий, требовательных к источникам питания, ниже числа олиготрофных бактерий (табл. 3).

Очень низкая численность бактерий была в почве горной тундры г. Кораблекк, что в целом характерно для горных тундр Кольского Севера [8]. Численность бактерий и грибов в почвах г. Калкупя превосходила их число в почвах г. Кораблекк.

Таблица 3

Численность бактерий (тыс./ г) и грибов (тыс. КОЕ/г) в почвах гор

Место отбора проб	Бактерии		Грибы
	сапро-трофные	олиго-трофные	
Г. Кораблекк, горная тундра	0	7±3	9.6±1.5
Г. Кораблекк, березовое редколесье	311±62	260±66	8.2±1.0
Г. Кораблекк, сосняк мохово-кустарничковый	75±6	95±23	6.4±1.0
Г. Калкупя, горная тундра	310±47	732±48	38.7±8.5
Г. Калкупя, березовое редколесье	1844±287	8797±1819	66.4±8.0
Г. Калкупя, сосняк мохово-кустарничковый	1727±704	5830±1589	43.5±5.7

Показатели общей численности и биомассы бактерий, включающей как жизнеспособные, так и мертвые клетки, представлены в табл. 4. В сосняке лишайниково-брусничном участков ICP-Forest (пос. Янискоски) наибольшая численность и биомасса почвенных бактерий выявлена под брусникой (0.71 мг/г почвы), наименьшая – под багульником и лишайниками (0.42–0.44 мг/г). Известно, что усниновая кислота лишайников является антибиотиком широкого спектра действия. Багульник также вырабатывает ряд метаболитов, обладающих асептическим действием. В березняке участков ICP-Forest (о. Варлама) биомасса бактерий под различными растительными ассоциациями выровнена.

Таблица 4

Общая численность (млрд /г) и масса (мг/г) бактерий, длина (м/г) и биомасса (мг/г) грибного мицелия

Место отбора проб	Бактерии		Грибы	
	млрд/г	мг/г	м/г	мг/г
Г. Кораблекк, горная тундра	2.4	0.10	1945	1.9
Г. Калкупя, горная тундра	2.4	0.10	2021	2.0
Г. Калкупя, березовое редколесье	2.0	0.08	3065	3.0
Г. Калкупя, сосняк мохово-кустарничковый	7.1	0.28	2318	2.3
ICP-Forest, березняк разнотравный. Почва под хвощом	11.90	0.48	1813	1.80
ICP-Forest, березняк разнотравный. Почва под бобовыми	10.58	0.42	2111	2.10
ICP-Forest, березняк разнотравный. Почва под злаками	11.80	0.47	1560	1.55
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под лишайниками	10.98	0.44	1594	1.59
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под брусникой	17.69	0.71	1437	1.43
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под мхами	12.81	0.51	1634	1.63
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под багульником	10.58	0.42	1170	1.16

Длина грибного мицелия в почве мониторинговых площадок достигала значительных величин – более 1000 м в 1 г почвы, его биомасса изменялась от 1.5 до 3.0 мг/г почвы. Грибная

биомасса в органогенных горизонтах значительно, в 2–4 раза, превосходит бактериальную. Максимальная длина грибного мицелия и его биомасса выявлена в горных экосистемах. Однако, сопоставляя данные по прямому счету с данными, полученными методом посева, мы пришли к выводу, что в горных почвах много нежизнеспособных грибных пропагул.

**Биоразнообразие грибов.** На г. Калкупя было выделено 8 видов микроскопических грибов, относящихся к 3 родам, 3 семействам, 2 порядкам, 2 классам и 2 отделам. Наименьшее разнообразие микромицетов (3 вида) было отмечено в сосняке. В березняке выделено 8 видов, в горной тундре – 7 (табл. 5). Преобладают виды рода *Penicillium* – 67 % от общего количества выделенных видов. На г. Кораблекк выделено 8 видов микромицетов, относящихся к 5 родам, 5 семействам, 4 порядкам, 4 классам и 2 отделам.

Таблица 5

Структура комплексов почвенных микромицетов на горах Калкупя и Кораблекк

Вид	Г. Калкупя			Г. Кораблекк
	горная тундра	березняк	сосняк	
<b>Отдел Zygomycota</b>				
<b>Класс Incertae sedis</b>				
<b>Порядок Mucorales</b>				
<b>Семейство Mucoraceae</b>				
<i>Mucor</i> sp.	–	1.6/33	–	–
<b>Семейство Umbelopsidaceae</b>				
<i>Umbelopsis isabellina</i> (Oudem.) W. Gams	3.7/33	1.3/67	–	11.0/100
<b>Отдел Ascomycota</b>				
<b>Класс Eurotiomycetes</b>				
<b>Порядок Eurotiales</b>				
<b>Семейство Trichocomaceae</b>				
<i>Penicillium canescens</i> Sopp	–	–	–	9.0/66
<i>P. glabrum</i> (Wehmer) Westling	–	–	–	17.0/66
<i>P. lividum</i> Westling	–	–	–	35.0/100
<i>P. implicatum</i> Biourge	19.4/67	17.9/67	–	–
<i>P. multicolor</i> Grig.-Man. et Porad.	0.3/33	–	–	–
<i>P. raistrickii</i> G. Sm.	4.8/33	4.6/67	2.6/67	–
<i>P. spinulosum</i> Thom	26.9/100	18.2/67	55/100	9.0/66
<i>P. thomii</i> Maire	6.5/67	1.3/100	–	–
<i>P. trzebinskii</i> K. M. Zalessky	18.7/100	16.6/33	34.3/100	–
<b>Класс Sordariomycetes</b>				
<b>Порядок Hypocreales</b>				
<b>Семейство Hypocreaceae</b>				
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	–	–	–	2/66
<b>Семейство Incertae sedis</b>				
<i>Memnoniella echinata</i> (Rivolta) Galloway	–	–	–	3/66
<b>Класс Dothideomycetes</b>				
<b>Порядок Dothideales</b>				
<b>Семейство Muxotrichaceae</b>				
<i>Muxotrichum deflexum</i> Berk.	–	–	–	1/33

ПРИМЕЧАНИЕ. Через косую линию слева – обилие видов, справа – пространственная частота встречаемости, %. Прочерк означает «не выявлены».

На г. Калкупя по обилию видов во всех исследованных зонах доминировали грибы *Penicillium spinulosum*, *P. trzebinskii*, а в горной тундре и березняке к ним еще добавился вид *P. implicatum*. По частоте встречаемости в горной тундре и сосняке доминировали виды *P. spinulosum* и *P. trzebinskii*, в березняке – *P. thomii* (100 % встречаемость).

На г. Кораблекк по обилию видов доминировали *Penicillium lividum* и *P. glabrum*, по частоте встречаемости – *P. lividum* и *Umbelopsis isabellina*.

На участках ИСР-Forest в почве соснового леса было выделено 10 видов микромицетов и грибы со стерильным мицелием, в почве березняка – 12 видов. Они относились к 8 родам, 6 семействам, 5 порядкам, 5 классам, 2 отделам (табл. 6). Степень сходства видового состава комплексов микромицетов соснового и березового лесов составила 67 %. Разнообразие грибов в почве березняка было более богатым (рр. *Aspergillus*, *Gliocladium*, *Mucor*, *Acremonium*, *Penicillium*, *Torula*, *Trichoderma* и *Umbelopsis*), чем в почве под сосняком (рр. *Gliocladium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Trichoderma* и *Umbelopsis*).

Таблица 6

Таксономическая структура комплексов грибов мониторинговых площадок

Вид	Сосняк лишайниковый				Березняк разнотравный		
	лишай-ники	брус-ника	мхи	багуль-ник	хвощи	бобо-вые	злаки
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Отдел Zygomycota</b> <b>Класс Incertae sedis</b> <b>Порядок Mucorales</b> <b>Семейство Umbelopsidaceae</b>							
<i>Umbelopsis isabellina</i> (Oudem.) W. Gams	–	5.7/66	–	–	22.9/66	6.0/100	4.0/33
<b>Семейство Mucoraceae</b>							
<i>Mucor</i> sp.	0.3/33	2.3/33	3.0/66	–	3.6/33	43.7/66	2/66
<b>Отдел Ascomycota</b> <b>Класс Eurotiomycetes</b> <b>Порядок Eurotiales</b> <b>Семейство Trichocomaceae</b>							
<i>Aspergillus ustus</i> (Bainier) Thom et Church	–	–	–	–	9.3/33	15.3/66	39.8/66
<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling	34.7/66	52.1/100	60.1/100	37.1	28.6/33	2.7/33	4.7/33
<i>P. multicolor</i> Grig.-Man. et Porad.	–	4.6/66	–	–	0.7/33	–	–
<i>P. nigricans</i> K. M. Zalesky	56.3/100	15.2/100	3.8/100	60	9.3/33	23.5/33	8.7/33
<i>P. raistrickii</i> G. Sm.	0.3/33	0.4/33	–	–	–	–	–
<i>P. thomii</i> Maire	–	–	0.5/33	–	3.6/66	–	–
<i>P. trzebinskii</i> K. M. Zalesky	4.6/66	17.5/100	28.7/100	2	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Класс <i>Sordariomycetes</i></b> <b>Порядок <i>Hypocreales</i></b> <b>Семейство <i>Hypocreaceae</i></b>							
<i>Gliocladium catenulatum</i> J. C. Gilman et E. V. Abbott	0.3/33	–	–	–	3.6/33	–	–
<i>Trichoderma koningii</i> Oudem.	–	–	–	–	4.3/100	0.5/33	3.4/33
<i>T. viride</i> Pers.	2.3/100	–	3.0/100	0.7	9.3/66	6.0/66	37.1/66
<b>Отдел <i>Ascomycota</i></b> <b>Класс <i>Leotiomycetes</i></b> <b>Порядок <i>Erysiphales</i></b> <b>Семейство <i>Erysiphaceae</i></b>							
<i>Acremonium egyptiacum</i> (J. F. H. Beyma) W. Gams	–	–	–	–	5.0/66	0.5/33	–
<b>Отдел <i>Ascomycota</i></b> <b>Класс <i>Incertae sedis</i></b> <b>Порядок <i>Incertae sedis</i></b> <b>Семейство <i>Incertae sedis</i></b>							
<i>Torula lucifuga</i> Oudem.	–	–	–	–	–	1.6/33	–
<i>Sterilia mycelia</i> dark	1.0/33	–	–	–	–	–	–

ПРИМЕЧАНИЕ. Через косую линию слева – обилие видов, справа – пространственная частота встречаемости, %. Прочерк означает «не выявлены».

В сосновом лесу по обилию видов на всех участках доминировал *Penicillium glabrum*, под кустарничками и мхами – *P. glabrum* и *P. trzebinskii*, под лишайниками и багульником – *P. nigricans*. В березняке виды-доминанты изменялись в зависимости от компонента растительного покрова: под группировкой хвощей доминировали *P. glabrum* и *Umbelopsis isabellina*, под бобовыми – *Mucor* sp. и *P. nigricans*, под злаками – *Aspergillus ustus* и *Trichoderma viride*. По пространственной частоте встречаемости в почвах соснового леса под всеми типами растительности преобладал *P. nigricans*, под кустарничками и мхами – *P. glabrum* и *P. trzebinskii*, под лишайниками и мхами – *T. viride*. В почве березового леса под хвощами доминировал *T. koningii*, под бобовыми – *U. isabellina*, под злаками – *A. ustus*, *Mucor* sp., *T. viride*. Таким образом, в ризосфере различных растений формируется довольно специфичный грибной комплекс, отличающийся доминантными видами.

Виды *Aspergillus ustus*, *Acremonium egyptiacum*, *Muxotrichum deflexum* были выделены в почвах Кольского полуострова впервые.

**Численность и разнообразие водорослей.** Данные по исследованию численности и разнообразия почвенной альгофлоры в заповеднике «Пасвик» – пионерные. Численность жизнеспособных клеток водорослей в подстилке березняка превосходила их число в подстилке соснового леса, где она была наименьшей под багульником и лишайниками (153–100 тыс./г), что характерно и для бактерий (табл. 7). Максимальное число водорослей выявлено в березняке под хвощом – более 1 млн клеток.

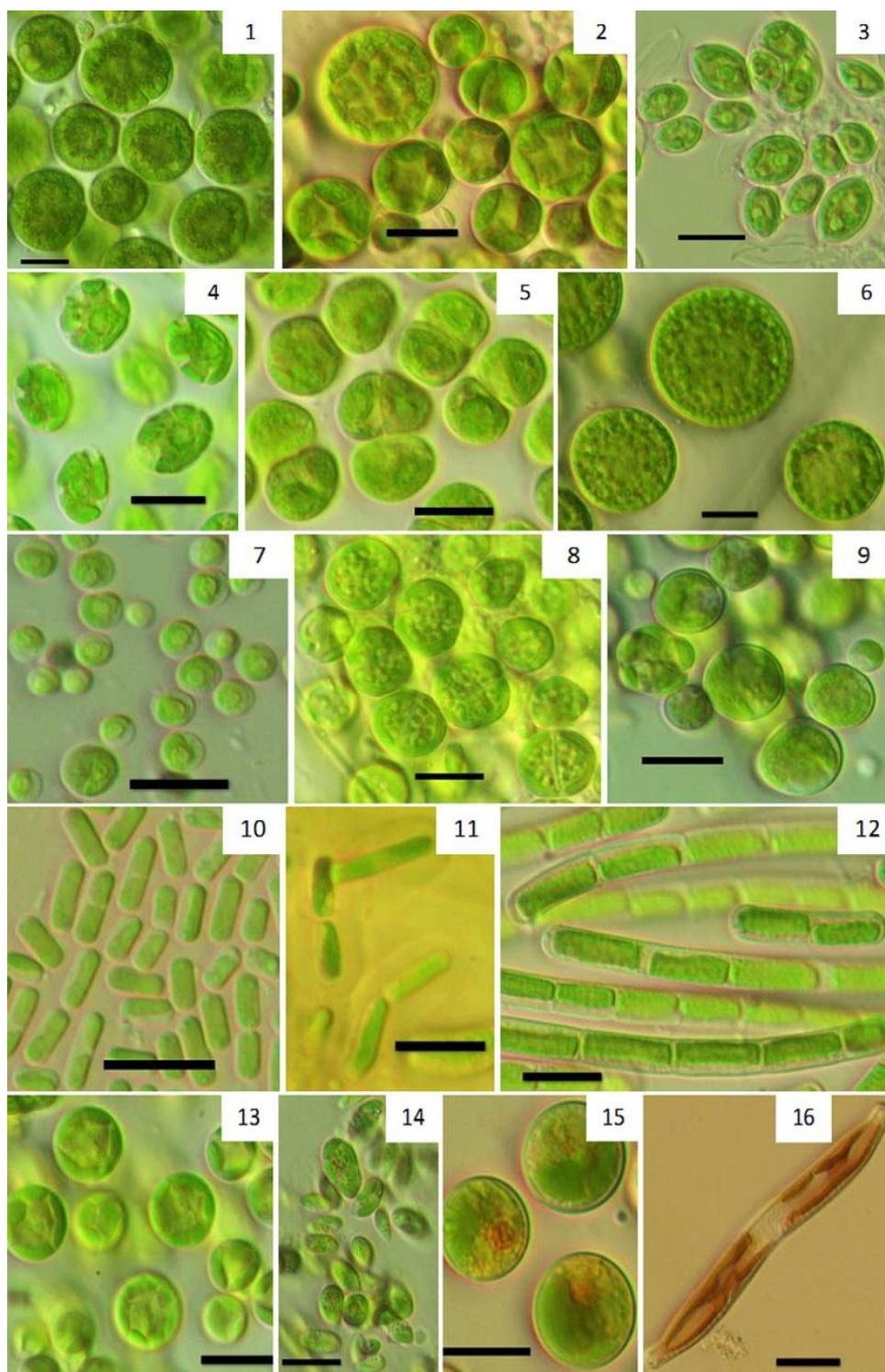


Рис. Водоросли почв на участках ICP-Forest:

1 – *Borodinellopsis* cf. *oleifera* Schwarz; 2 – *Bracteacoccus* cf. *minor* (Chodat) Petrová; 3 – *Coelastrella terrestris* (Reisigl) Hegewald & N.Hanagata; 4 – *Chlamydocapsa lobata* Broady; 5 – *Desmotetra* sp.; 6 – *Dictyochloris* cf. *fragrans* Vischer; 7 – *Chlorella* sp.; 8 – *Elliptochloris* sp.; 9 – *Parietochloris* sp.; 10 – *Stichococcus bacillaris* Nägeli; 11 – *Fottea stichococcoides* Hindák; 12 – *Klebsormidium flaccidum* (Kützing) P. C. Silva, K. R. Mattox & W. H. Blackwell; 13 – *Botrydiopsis* cf. *eriensis* Snow; 14 – *Monodopsis subterranean* (J. B. Petersen) D. J. Hibberd; 15 – *Eustigmatos* cf. *magnus* (J. B. Petersen) D. J. Hibberd; 16 – *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow. Шкала 10  $\mu$ m

Численность водорослей (тыс./г) в подстилке мониторинговых площадок

Место отбора проб	Численность
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под лишайниками	199
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под брусникой	739
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под мхами	533
ICP-Forest, сосняк лишайниково-брусничный. Почва под багульником	153
ICP-Forest, березняк разнотравный. Почва под хвощом	1258
ICP-Forest, березняк разнотравный. Почва под бобовыми	992
ICP-Forest, березняк разнотравный. Почва под злаками	641

В исследованных почвах обнаружен 51 вид водорослей и цианобактерий, относящихся к 4 отделам, 8 классам, 14 порядкам, 29 семействам (рис.). По числу видов преобладали водоросли из отдела Chlorophyta (Chlorophyceae – 18 видов, Trebouxiophyceae – 13, Ulvophyceae – 2). В меньшей степени представлены Cyanobacteria (7 видов), Charophyta (Klebsormidiophyceae – 4), Ochrophyta (Xanthophyceae – 4, Bacillariophyceae – 2, Eustigmatophyceae – 1). Водоросли и цианобактерии с наибольшей частотой встречаемости: *Chlamydomonas* spp., *Pseudococcomyxa simplex*, *Fottea stichococcoides*, *Stichococcus bacillaris*, *Halochlorella rubescens*, *Aphanocapsa* sp. Большинство из них характерны для лесных подзолов Кольского Севера [8], в то время как *Fottea stichococcoides* является новым видом для почв Мурманской обл.

### Выводы

1. Бактериальная масса органогенных горизонтов сосняков превосходит величину биомассы бактерий под березняками, причем в сосняке лишайниково-брусничном наибольшая численность и биомасса почвенных бактерий выявлена под брусникой (0.71 мг/г почвы), наименьшая – под багульником и лишайниками (0.42 мг/г).

2. Длина грибного мицелия в почве мониторинговых площадок достигала значительных величин – более 1 тыс. м в 1 г почвы, его биомасса изменялась от 1.5 до 3.0 мг/г почвы. Грибная биомасса в органогенных горизонтах значительно, в 2-4 раза, превосходит бактериальную.

3. Разнообразие грибов в почве березового леса было более богатым, чем в почве под сосновым лесом. Степень сходства видового состава комплексов микромицетов двух типов лесов составила 67 %.

4. В ризосфере различных растений формируется довольно специфичный грибной комплекс, отличающийся доминантными видами. Виды *Aspergillus ustus*, *Acremonium egyptiacum*, *Muxotrichum deflexum* были выделены в почвах Кольского п-ова впервые.

5. Численность жизнеспособных клеток водорослей в подстилке березняка превосходила их численность в подстилке соснового леса, где она была наименьшей под багульником и лишайниками, что отмечено и для бактерий. Максимальное число водорослей выявлено в березняке под хвощом: более 1 млн клеток.

6. В исследованных почвах заповедника «Пасвик» обнаружен 51 вид водорослей и цианобактерий. По числу видов преобладали водоросли из отдела Chlorophyta (33 вида). Среди водорослей и цианобактерий наиболее часто встречались: *Chlamydomonas* spp., *Pseudococcomyxa simplex*, *Fottea stichococcoides*, *Stichococcus bacillaris*, *Halochlorella rubescens*, *Aphanocapsa* sp. Большинство из них характерны для лесных подзолов Кольского Севера, в то время как *Fottea stichococcoides* является новым видом для почв Мурманской области.

### Благодарности

Авторы благодарят директора заповедника В. Е. Чижова, зам. директора по научной работе Н. В. Поликарпову и сопровождающего нас в маршрутах Г. А. Дмитренко за предоставление всех условий, необходимых для выполнения данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Raper B.; Thom C. A. Manual of the Penicillia. 1968. 1-875. 2. Rifai A. Revision of the genus Trichoderma. Mycological Papers. 1969. 1-56. 3. Ellis M. B. More Dematiaceus hyphomycetes. CAB Inter. Mycological Institute. 1989. 1-507. 4. Klich M. A. Identification of common Aspergillus species. 2002. 1-116. 5. Domsh K. H.; Gams W.; Anderson T. H. Compendium of soil fungi. 2007. 1-672. 6. The genera of Hyphomycetes / K. Seifert [et al.]. 2011. 1-997. 7. База данных "Species fungorum": сайт. URL: [www.indexfungorum.org](http://www.indexfungorum.org). 8. Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П. Микроорганизмы тундровых и лесных подзолов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 2001. 184 с. 9. Кондакова Л. В., Домрачева Л. И. Флора Вятского края. Ч. 2. Водоросли (Видовой состав, специфика водных и почвенных биоценозов). Киров: ОАО «Кировская областная типография». 2007. 192 с. 10. Андреева В. М. Почвенные и аэрофильные зеленые водоросли. М., 1998. 348 с. 11. Ettl H., Gärtner G. Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen. 2., ergänzte Auflage. Springer Berlin Heidelberg. 2014. 773 p. 12. The freshwater algal flora of the British Isles: An identification guide to freshwater and terrestrial algae. Second Edition / ed. by David M. John, Brian A Whitton and Alan J. Brook. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. 878 p. 13. Исследование состояния почвенного покрова в долине р. Паз, в том числе на территории заповедника «Пасвик»: отчет по договору о научном и научно-практическом сотрудничестве между ИППЭС КНЦ РАН и Государственным природным заповедником «Пасвик». Архив «Пасвик». 2010. 34 с.

**Сведения об авторах**

*Евдокимова Галина Андреевна* – доктор биологических наук, профессор, зам. директора по научной работе ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;  
e-mail: [galina@inep.ksc.ru](mailto:galina@inep.ksc.ru).

*Корнейкова Мария Владимировна* – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;  
e-mail: [korneykova@inep.ksc.ru](mailto:korneykova@inep.ksc.ru)

*Мозгова Наталья Петровна* – старший научный сотрудник ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;  
e-mail: [mozgova@inep.ksc.ru](mailto:mozgova@inep.ksc.ru)

*Редькина Вера Вячеславовна* – кандидат биологических наук, и. о. старшего научного сотрудника Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;  
e-mail: [kalmykova@inep.ksc.ru](mailto:kalmykova@inep.ksc.ru)

*Фокина Надежда Викторовна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН;  
e-mail: [voronina@inep.ksc.ru](mailto:voronina@inep.ksc.ru)

**Information about the authors**

*Galina A. Evdokimova* – Dr. Sci. (Biol.), Professor, vice-director on science of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;  
e-mail: [galina@inep.ksc.ru](mailto:galina@inep.ksc.ru).

*Mariya V. Korneykova* – PhD (Biol.), senior scientific researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;  
e-mail: [korneykova@inep.ksc.ru](mailto:korneykova@inep.ksc.ru)

*Natalia P. Mozgova* – senior researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;  
e-mail: [mozgova@inep.ksc.ru](mailto:mozgova@inep.ksc.ru)

*Vera V. Redkina* – PhD (Biol.), acting senior scientific researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;  
e-mail: [kalmykova@inep.ksc.ru](mailto:kalmykova@inep.ksc.ru)

*Nadezhda V. Fokina* – PhD (Eng.), senior scientific researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;  
e-mail: [voronina@inep.ksc.ru](mailto:voronina@inep.ksc.ru)

**Библиографическое описание статьи**

Эколого-биологическая характеристика почв приграничного района Россия-Норвегия / Г. А. Евдокимова [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 89-99.

**Bibliographic Description**

Environmental and Biological Description of Soils in the Russian–Norwegian Border Area / Galina A. Evdokimova, Mariya V. Korneykova, Natalia P. Mozgova, Vera V. Redkina, Nadezhda V. Fokina. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. 2016, vol. 1, pp. 89-99.

УДК 519.673: 004.9

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА БАЗ ДАННЫХ СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ИХ КОНЦЕПТУАЛЬНОМУ ОПИСАНИЮ\*****А. Я. Фридман**ФГБУН Институт информатики и математического моделирования  
технологических процессов КНЦ РАН**Аннотация**

Представлены средства автоматической генерации реляционных баз данных, необходимых для конструирования модели, выполнения имитационного моделирования промышленно-природных комплексов (ППК), хранения и анализа его результатов с учетом возможности оперативного изменения структуры модели, а также средств моделирования компонентов ППК. Основное достоинство предложенного способа создания БД состоит в том, что пользователь непосредственно формирует только концептуальную модель данных с использованием привычных ему терминов, а создание файловой структуры БД и выборка необходимых подсхем данных производится в соответствии с заданными описаниями автоматически.

**Ключевые слова:**

*концептуальная модель, пространственный динамический объект, автоматическая генерация баз данных, имитационное моделирование.*

**CONCEPTUAL-DESCRIPTION-BASED AUTOMATION OF DATABASES SYNTHESIS IN SITUATIONAL MODELING SYSTEM****Alexander Ya. Fridman**Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes  
of the KSC of the RAS**Abstract**

The paper introduces automatic means to generate relational databases necessary to create a model of an industry-natural complex (INC), simulate its functioning, store and analyze results of this simulation considering operative changes of the model structure and software to simulate the INC components. The major advantage of the proposed technique of DBs generation is that a user has to just design a conceptual model of an INC based on his/her customary terms while DBs files structure generation and specification of necessary data subschemas, according to the given descriptions, are accomplished automatically.

**Keywords:**

*conceptual model, spatial dynamic object, automatic generation of databases, simulation.*

**Введение**

Различные вопросы анализа и синтеза сложных объектов в настоящее время решаются с помощью информационно-аналитических систем (ИАС). Их функционирование связано с вводом, обработкой, хранением и выдачей в соответствии с требованиями пользователей разнородной информации, которую нельзя регламентировать и стандартизовать заранее. Эффективность и качество подобных ИАС существенно зависят от методов и технологии автоматизации проектирования их баз данных (БД). Поскольку количество, структура и объем необходимых данных определяется непосредственно в

\*Работа частично поддержана грантами РФФИ (проекты № № 14-07-00256-а, 14-07-00257-а, 15-07-04760-а, 15-07-02757-а).

ходе эксплуатации ИАС, необходимо включать в их состав средства автоматической генерации БД.

Одно из направлений повышения оперативности и гибкости структуры БД ИАС – использование при их разработке принципа типизации, реализуемого применением адекватных экономическим и организационным условиям моделей и методов синтеза типовых структур локальных и распределенных баз данных. В то же время существующие методологии разработки, а также инструментальные и программные средства автоматизации проектирования и сопровождения БД, как правило, не обеспечивают комплексных решений, не поддерживают многих функций автоматизации проектирования БД [1–3]. Изложенное обосновывает актуальность темы настоящей работы, в которой предлагается метод автоматической генерации стандартизованных таблиц данных на основе их пользовательского описания в концептуальной модели предметной области (КМПО) ИАС. Без потери общности изложение ведется на примере ситуационной системы моделирования (ССМ) [4–7], которая представляет собой ИАС для исследования иерархических пространственных динамических объектов, в частности промышленно-природных комплексов, и, соответственно, содержит встроенные геоинформационную (ГИС) и экспертную (ЭС) системы, что вносит специфику и в организацию БД ССМ. Основа КМПО – не алгоритмическая модель передачи и преобразования данных, как в аналитических моделях, а декларативное описание структуры объекта и взаимодействия его составных частей. Таким образом, КМПО изначально ориентирована на формализацию знаний экспертов. В КМПО определяются элементы исследуемой предметной области и описываются отношения между ними, которые задают структуру и причинно-следственные связи, существенные в рамках определенного исследования. КМПО поддерживает соответствие между реальным ППК и его моделью.

Как следует из названия, любой ППК включает природные и технические объекты. Каждый такой объект может представлять собой многоуровневую систему подобъектов, связанных различными сигналами, которые моделируются потоками данных и трактуются в ССМ как ресурсы, используемые и/или расходуемые объектами в ходе их жизнедеятельности. Изменения ресурсов внутри объектов описываются в модели некоторым набором процедур или функций, именуемых процессами. Для анализа поведения ППК и сравнения различных наборов значений ресурсов между собой используются один или несколько критериев качества – функционалов, определенных на тех или иных наборах ресурсов. Таким образом, в КМПО ППК описываются три вида элементов (сущностей) реального мира – объекты, процессы и данные (или ресурсы). Объекты отображают организационную и пространственную структуру моделируемого комплекса с каждым из них можно связать набор процессов. Под процессом понимается некоторое действие (процедура), преобразующее подмножество данных, называемых входными по отношению к рассматриваемому процессу, в другое их подмножество, именуемое выходным. Данные характеризуют состояние системы. Они используются при реализации процессов, являются результатами их выполнения. Выполнение любого процесса изменяет данные и соответствует переходу системы из одного состояния в другое. Взаимосвязи и взаимодействие объектов реального мира описываются с помощью отношений на множествах элементов модели. Имена элементов КМПО задаются в терминах предметной области, как правило, каждому элементу модели назначается исполнитель, обеспечивающий его реализацию в ходе моделирования. Тип исполнителя определяет характеристики реализации, например, язык программирования, на котором реализуется исполнитель некоторого процесса, и тип исполнителя в алгоритмическом языке.

### **Организация баз данных ситуационной системы моделирования**

Значения исходных данных для проведения моделирования могут вводиться в ССМ либо из базы экспериментальных (исходных) данных (БИД), либо из базы, в которой хранятся сценарные данные, соответствующие желаемой или предполагаемой динамике объекта

исследования. Для имитации используются встроенные функции и библиотека программных модулей (БИЭЗ), имитирующих представленные в КМПО процессы, ссылки (указатели) на процессы обработки данных также хранятся в БД.

В ССМ применяются реляционные базы данных, которые наиболее распространены в приложениях, несмотря на наличие альтернативных принципов построения БД [8]. В качестве стандартного формата хранения данных в исследовательской версии ССМ принят формат DBF, поскольку его поддерживает используемая в настоящее время ГИС ArcInfo.

Базу данных ССМ можно разделить на две части: предметно-зависимую и предметно-независимую, структура файлов первой части постоянна и не зависит от предметной области, в которой применяется ССМ, структура файлов второй части БД определяется структурой КМПО, т. е. проведенной пользователем декомпозицией понятий и связей элементов объекта исследования. В первую часть входят базы данных основных подсистем ССМ: КМПО, ЭС и ГИС, вторую часть назовем базой данных предметной области (БДПО), ее структура синтезируется автоматически на различных этапах работы ССМ. В первых версиях ССМ БДПО была реализована в виде файловой структуры, последние версии используют идеологию сервера SQL [2]. Далее, если это не вызывает разночтений, БД будет называться каждая реляционная таблица, содержащая записи определенного типа.

При разработке баз данных ССМ, кроме обычных принципов проектирования БД, ориентированных на повышение эффективности процедур поиска, были приняты меры по устранению возможных ошибок, часто вызываемых различным написанием строковых величин. Поэтому все процедуры логической обработки, поиск, сортировка и т. д. выполняются только по служебным числовым кодам, присваиваемым именам и значениям данных в ходе их ввода в компьютер. Строковые величины используются только при визуализации данных. Даже списковые данные, имеющие числовые значения, обрабатываются по такому же принципу [4]. Это дает возможность осуществлять контроль диапазонов значений величин, хранимых в полях переменной длины (далее они называются еще тето-полями [2]), не обращаясь к содержимому этих полей. Кроме того, тем самым существенно упрощается изменение языка, на котором ведется диалог с пользователем (например, переход с русского языка на английский). Ниже, кроме специально оговоренных случаев, при упоминании значения строковой величины имеется в виду соответствующий ей код, доступ к строковым данным осуществляется через специальные справочники, структура которых поясняется при описании использующих их баз.

Рассмотрим структуру основных баз данных, присутствующих во всех реализациях ССМ, поскольку в каждом приложении по пожеланиям заказчика создавались дополнительные специализированные БД, включаемые обычно в БДПО.

### **База данных концептуальной модели**

Одно из требований к системе моделирования состоит в обеспечении хранения модели предметной области, созданной пользователем в режиме редактирования. Назначение БД КМПО состоит в хранении и обеспечении ускоренного доступа к характеристикам элементов модели и связей между ними. Для создания БД хранения концептуальной модели в ССМ используется принцип модели сущность – связь (ER-модели) [2]. Как уже упоминалось, в КМПО имеются три множества сущностей – это множество процессов  $P$ , множество объектов  $O$  и множество данных (ресурсов)  $Res$ . Множества однотипных связей образуют отношения, заданные между объектами КМПО в явном виде:  $OP$ ,  $PO$ , и отношения, определяемые косвенно: объект – суперобъект, объект – приписанные к нему процессы, процесс – последующий процесс, данное – процессы-генераторы, данное – процессы-потребители.

Наиболее удобной для хранения данных, имеющих древовидную структуру, представляется вторая нормальная форма. Установленные на КМПО иерархические и другие отношения между объектами можно отобразить в реляционной структуре в виде ключей идентификации строк таблицы. Если из атрибутов таблицы, содержащей экземпляры данных

некоторого уровня иерархии КМПО, построить ключевое выражение для строк таблицы, содержащей экземпляры подобъектов, то выбор экземпляра объекта верхнего уровня будет однозначно определять выбор соответствующих экземпляров подчиненных данных. Таким образом в физическую структуру БДПО закладывается система ссылок, соответствующих отношениям, заданным на КМПО.

Иерархическая структура в этом случае определяется по системе встроенных указателей [6]. Для каждого элемента КМПО в базе данных КМПО создается одна запись, тип полей записи определяется форматом фреймов элементов КМПО. В запись включается набор указателей – ссылок на другие записи, которые соответствуют элементам модели, вступающим с рассматриваемым в определенные отношения. Под указатели на управляющее данное и суперданное (при его наличии) отводится по одному полю записи, в которые помещаются номера записей соответствующих элементов. Число элементов, вступающих с рассматриваемым в другие отношения (например отношения порождения), является переменным и не может быть определено однозначно для всех элементов модели. В этом случае набор указателей на соответствующие элементы представляется массивом из  $N$  номеров записей. Массив переменной длины в реляционной БД удобно располагать в двух полях записи. В одном поле хранится число  $N$ , определяющее количество элементов массива, а в другом поле, размер которого не фиксирован (поле типа memo), хранятся значения элементов массива.

Кроме полей, задающих отношения элемента с другими элементами модели, в записи присутствуют поля данных, идентифицирующих сам элемент и задающих его атрибуты: номер, имя, вид (процесс, ресурс или данное), тип отношения иерархии и др.

Каждому элементу модели каждого вида соответствует одна запись файла формата DBF. В определенные memo-поля каждой записи заносятся данные о связях данного элемента с другими элементами модели (входные и выходные элементы, подчиненные элементы, предшествующие процессы, если таковые заданы), а также данные о характеристиках элемента (имена, формулы и типы характеристик). Связи описываются путем перечисления в соответствующих memo-полях номеров элементов КМПО, с которыми указанный элемент вступает в определенные отношения. Данные о характеристиках есть упорядоченное перечисление соответствующих значений.

Кратко представим структуру и ключевые поля основных баз данных КМПО в той степени, насколько это необходимо для описания интерфейса между подсистемами ССМ в различных режимах работы системы. Во всех таблицах этого подраздела, иллюстрирующих тип записей баз данных, затенены поля переменной длины, при описании ключей, которые состоят из нескольких полей, символ  $\oplus$  используется для обозначения конкатенации как строковых, так и числовых величин, причем результат последней операции рассматривается как число (например, при значении поля “а” – 300, а поля “б” – 15 значение ключа “а  $\oplus$  б” равно 30015).

База данных “Описание объектов” и ее справочники представлена на рис. 1, здесь  $\alpha$  – номер уровня объекта в дереве объектов,  $\beta$  – порядковый номер объекта на его уровне,  $t_h$  – тип декомпозиции,  $cat_o$  – категория объекта. Первичный ключ равен  $\alpha \oplus \beta$ , вторичные – все поля. Когда ниже употребляется выражение “код объекта” без специальной оговорки, имеется в виду соответствующая этому объекту величина  $\alpha \oplus \beta$ . В поле  $\beta_{sup}$  заносится порядковый номер  $\beta$  суперобъекта данного объекта на вышележащем уровне декомпозиции.

$\alpha$	$\beta$	код_типа <sub>o</sub>	$t_h$	$\beta_{sup}$	$cat_o$	$\alpha \oplus \beta$	имя <sub>o</sub>	код типа <sub>o</sub>	тип <sub>o</sub>

Рис. 1. База данных “Описание объектов”

База данных “Связи объектов” показана на рис. 2, здесь list\_in и list\_out – списки входных и выходных ресурсов. В соответствии с вышеизложенным перед каждым memo-полем вводится

числовое поле (на рисунках обозначается  $N$ ), в которое заносится количество данных, хранимых в мето-поле. Эта величина – параметр стандартных функций СУБД, обеспечивающих запись и считывание данных из полей переменной длины. В поле  $N$  графы  $comp$  рис. 2 заносится список кодов подобъектов текущего объекта либо код имени покрытия ГИС, реализующего опцию “area”, в таком случае  $N := 0$ . В графы  $OP$ ,  $OA$  и  $OO$  по той же схеме при конструировании и анализе КМПО заносятся списки элементов КМПО, находящихся с заданным в соответствующих отношениях [4].

$\alpha \oplus \beta$	comp		list_in		list_out		OP		OA		OO	
	$N$	list	$N$	list	$N$	list	$N$	list	$N$	list	$N$	list

Рис. 2. База данных “Связи объектов”

Две уже описанные базы являются основными базами КМПО и используются на всех стадиях создания и исследования модели. Две следующие базы “Классификация объектов” и “Классификация процессов” (рис. 3 и 4) применяются при решении задачи классификации и поэтому содержат поля с параметрами критерия качества.

$\alpha \oplus \beta$	код <sub>r</sub> (crit <sub>o</sub> )	$a_i$	$a_{i0}$	$\Delta a_i$	$\Delta a_i$

Рис. 3. База данных “Классификация объектов”

код <sub>p</sub>	код <sub>p</sub> (crit <sub>p</sub> )	$m$	$a_i$		$a_{i0}$		$\Delta a_i$	
			list		list		list	

Рис. 4. База данных “Классификация процессов”

Значения ключевого поля <код<sub>p</sub>> базы “Классификация процессов” присваиваются при формировании базы “Описание процессов”, показанной с ее справочниками на рис. 5. В поле “код объекта” заносится величина  $\alpha \oplus \beta$  объекта, к которому приписан процесс.

код <sub>p</sub>	код_типа <sub>p</sub>	код_исп <sub>p</sub>	cat <sub>p</sub>	код функц. типа	код объекта

Рис. 5. База данных “Описание процессов”

В поле “код\_исп<sub>p</sub>” вводится код исполнителя процесса из справочников для процессов и ресурсов КМПО (рис. 6).

код_исп.	имя_исп.	расширение
0	ЭС	

Рис. 6. Структура справочников по исполнителям процессов и ресурсов

Указанные справочники имеют одинаковый тип записи для процессов и ресурсов, в них заносятся имена и при необходимости расширения всех функций и программ, реализующих соответствующие элементы КМПО в ходе имитации. Нулевой код присваивается ЭС ССМ.

Структура базы данных “Связи процессов” аналогична структуре базы “Связи объектов” (рис. 7), но в графы *PO* и *PP* вводятся коды элементов КМПО, связанные с данным процессом отношениями *PO* и *PP* (см. выше).

Поля базы “Описание ресурсов” содержат данные для фреймов процессов (рис. 8). В поля “source” и “destin” в ходе анализа КМПО заносятся коды процессов, порождающих и потребляющих данный ресурс соответственно.

код <sub>p</sub>	list in		list out		PO		PP	
	<i>N</i>	list	<i>N</i>	list	<i>N</i>	list	<i>N</i>	list

Рис. 7. База данных “Связи объектов”

код <sub>r</sub>	cat <sub>r</sub>	код исп <sub>r</sub>	source	destin		код <sub>r</sub>	код типа <sub>r</sub>	код типа <sub>p</sub>	тип <sub>r</sub>

Рис. 8. База данных “Описание ресурсов”

Альтернативные структуры объектов в КМПО хранятся в базе “Описание объектов” (поле  $t_h$  на рис. 1), для хранения альтернативных процессов используется специальная база “Наборы ресурсов” (рис. 9). В поля “потребитель” и “источники” заносится код и списки кодов элементов КМПО, для которых данный набор является входным и выходным соответственно.

<i>d</i>	<i>k</i>	ind	list res	потребитель	источники	

Рис. 9. База данных “Наборы ресурсов”

Последняя база, входящая в состав БД КМПО, содержит информацию о результатах анализа разрешимости шаблонов процессов КМПО [4].

### Хранение данных и правил в ЭС ССМ

База данных ЭС в ССМ содержит параметры и переменные, не описанные в КМПО и предназначенные пользователем для внутреннего применения в правилах ЭС. В частности, это могут быть и вспомогательные переменные управляющих формул ЭС, и переменные вероятности. Поэтому в ЭС ССМ в полной мере представлены средства ручного ввода и корректировки параметров и переменных.

КОД <sub>д</sub>	ТИП <sub>д</sub>	КОЛ_ЗН	ИМЯ <sub>д</sub>	ПОЛОЖЕНИЕ

Рис. 10. Справочник “Данные ЭС”

В процессе ввода и вывода данных используется справочник “Данные ЭС” (рис. 10), который содержит следующие поля: “код<sub>д</sub>” – численное значение кода данного (первичный ключ); “тип<sub>д</sub>” – указатель типа данного – 1 для параметров, 2 для переменных и 3 для переменных вероятностей (кроме фиксированного значения вероятности, любому данному может быть поставлена в соответствие переменная, в которой хранится распределение вероятности – используется при формировании правил и проведении экспертизы); “кол\_зн” – количество значений параметра или переменной, список которых хранится в тето-поле “Значения”; “имя<sub>д</sub>” – имя данного в виде последовательности символов (применяется только

для визуализации); “положение” – расположение данного в дереве вывода:  $G$  – цель,  $L$  – лист и  $M$  – промежуточное данное.

Имеется еще ряд полей, содержащих вспомогательную информацию, которая используется в процессе экспертизы.

Для работы со значениями данных используется справочник “Значения данных ЭС” (рис. 11), содержащий, кроме уже описанных, следующие поля: “код<sub>зн</sub>” – код значения данного, который присваивается автоматически при вводе значения; “имя<sub>зн</sub>” – имя значения в виде последовательности символов; “ $p_0$ ” – начальная вероятность (при вероятностном выводе).

КОД <sub>д</sub>	КОД <sub>зн</sub>	ИМЯ <sub>зн</sub>	$p_0$

Рис. 11. Справочник “Значения данных ЭС”

Каждое логическое условие правила ЭС хранится в отдельной записи БД ЭС, что, по мнению автора, существенно ускоряет процедуры вывода, так как позволяет пометить появление фактов, констатацию истинности или ложности, а также блокировку использования некоторого данного сразу во всех правилах, содержащих это данное. Такая возможность в значительной степени объясняет и оправдывает выбор СУБД в качестве программной среды для разработки ЭС в исследовательской версии ССМ.

При вводе и редактировании правил используется база данных “Правила” (рис. 12), которая содержит, кроме описанных ранее, поля: “н<sub>пр</sub>” – номер правила; “часть” – признак части правила (1 – для части ЕСЛИ, 2 – для части ТО и 3 – для части ИНАЧЕ); “знак” – код знака отношения данного и его значения (для параметров – 1 – равно, 2 – не равно, для переменных – 1 – равно, 2 – не равно, 3 – больше, 4 – больше или равно, 5 – меньше, 6 – меньше или равно); “список” – поле мемо, в котором перечислены коды используемых в правиле значений данного;  $N$  – как и ранее, количество значений данного в предыдущем мемо-поле; “Rem” – поле примечаний (это обозначение используется для полей комментариев и в других базах); “Act” – признак активности правила (заполняется в ходе экспертизы).

н <sub>пр</sub>	часть	знак	список	Rem	Act

Рис. 12. База “Правила”

База данных “Правила” содержит также другие поля для хранения вспомогательной информации и организации управления выводом.

н <sub>пр</sub>	часть	н <sub>об</sub>	итер	$p_{усл}$	ИСПОЛЬЗ

Рис. 13. База данных “Факты”

База данных “Факты” (рис. 13) хранит информацию об имеющихся к началу экспертизы и появляющихся в ее ходе фактах. В процессе сеанса работы с ЭС база редактируется, пополняется новыми фактами и т. д., она содержит следующие еще не описанные поля: “н<sub>пр</sub>” и “часть” – поля, совпадающие по формату с соответствующими полями базы “Правила”, сюда записываются номер правила и признак части правила из базы “Правила”, из которого получен данный факт. Если он получен по данным пользователя (введен в базу до начала экспертизы), то в эти поля записываются значения 9999 и 9 соответственно; “н<sub>об</sub>” – номер объекта, для которого проводится экспертиза ( $\alpha \oplus \beta$  при экспертизе массива объектов, 1 – при экспертизе одиночного объекта); “итер” – номер итерации в процессе экспертизы, на которой получен факт

(для начального факта – 0); “ $p_{\text{усл}}$ ” – условная вероятность значения данного, для которого записан факт; “использ” – признак использования факта в процессе экспертизы (0 – не учтен, 1 – учтен, 2 – ошибка).

Кроме вышеописанных основных баз данных, имеется база данных “Контроль БЗ”, содержащая вспомогательную информацию для проведения процедур контроля базы знаний.

Для всех перечисленных баз данных разработан набор индексов, ускоряющих подготовку и выбор данных по различным условиям, которые требуются в ходе экспертизы.

Существенной и ценной частью базы данных ЭС является архив логико-трансформационных правил (ЛТП), созданных автоматически или вручную в процессе исследования модели ССМ. Эти правила хранятся в том же формате, как и все действующие правила ЭС (они дополнительно атрибутируются временем создания и комментарием пользователя), и могут быть вновь активированы по выбору пользователя.

### Основные характеристики БД ГИС

Пространственные данные в языке ГИС ArcInfo хранят геометрическое местоположение географических объектов вместе с атрибутивной информацией об этих объектах. Данные о местоположении хранятся в векторных структурах, а соответствующая атрибутивная информация – во множестве таблиц, географически связанных с описываемыми объектами. Это также называется геосвязанной структурой данных (georelational data structure).

Если существуют дополнительные таблицы, обеспечивающие описательные характеристики объектов, то они могут быть присоединены к атрибутивной таблице темы. Присоединение основано на значениях полей, одинаковых в обеих таблицах. Названия полей могут быть различны в обеих таблицах, но тип данных должен быть одним и тем же. Во время присоединения устанавливается тип соединения одна-к-одной (one-to-one) или много-к-одной (many-to-one) между результирующей таблицей (таблицей темы) и дополнительной таблицей.

Основной справочник, обеспечивающий взаимодействие ГИС с КМПО и ЭС – справочник “ГИС-элементы КМПО”, связывающий коды ГИС-элементов с таблицами их ГИС-описаний.

Для представления результатов моделирования на картографической основе используется набор ГИС-операций над ГИС-элементами КМПО, который зависит от языка используемой ГИС. Применение операций описывает справочник “ГИС-операции” (рис. 14), связывающий служебный код операции ( $\text{код}_{\text{оп}}$ ) с ее именем на языке ГИС ( $\text{имя}_{\text{оп}}$ ), количеством участвующих в операции объектов  $N_{\text{оп}}$  (в исследовательской версии ССМ это 1 или 2) и списком их ГИС-типов ( $\text{типы}_{\text{о}}$ ), а также количеством параметров операции ( $N_{\text{пар}}$ ) и списком их ГИС-имен ( $\text{list}_{\text{пар}}$ ).

$\text{код}_{\text{оп}}$	$\text{имя}_{\text{оп}}$	$N_{\text{оп}}$	$\text{типы}_{\text{о}}$	$N_{\text{пар}}$	$\text{list}_{\text{пар}}$

Рис. 14. Справочник “ГИС-операции”

### База данных предметной области

Под базой данных предметной области моделирования понимается совокупность конкретных значений данных предметной области, хранящихся на внешних запоминающих устройствах (ВЗУ) компьютера. Кроме данных, хранящихся на ВЗУ, при моделировании используются данные, которые существуют только в оперативной памяти компьютера, и данные, которые вводятся в диалоговом режиме или выводятся на устройства вывода. Данные такого рода могут не сохраняться на внешних запоминающих устройствах и, следовательно, не принадлежат БД предметной области [9, 10].

При описании данных вводится три категории данных предметной области: постоянные, временные, оперативные. Этим категориям при конструировании КМПО назначаются исполнители типов DB (GEN), SMP и TMP соответственно. К постоянным относятся данные, которые не изменяются в ходе моделирования (данные натурального эксперимента, данные

сценариев, постоянные коэффициенты и т. п.). Временные данные – это, как правило, промежуточные или целевые результаты вариантов моделирования. При повторных реализациях моделирования временные данные либо заменяются, либо хранятся в виде версий. Постоянные и временные данные записываются в ходе моделирования на внешние запоминающие устройства и составляют БД предметной области. Временные данные могут удаляться при завершении моделирования. Оперативные данные создаются и хранятся в памяти только в процессе выполнения соответствующей программы и уничтожаются по ее завершению.

Предложенное разделение на классы позволяет использовать аппарат имен, исполнителей и типов исполнителей при автоматической генерации БДПО и анализе КМПО на целостность и разрешимость. Логическая структура БДПО определяется структурой исполнителей для постоянных и временных данных.

Основной “границей” между БДПО и БД КМПО по типу включенных в нее данных является использование значений данных, а по типу задач – анализ ситуаций. Поэтому главный справочник БДПО “Данные КМПО” имеет вид, показанный на рис. 15. В дополнение к обычному числовому полю “кол\_зн” (количество значений данного) и соответствующему ему мето-полю “Значения”, аналогичным полям справочников “Данные ЭС” (рис. 10) и “Значения данных ЭС” (рис. 11), в него введены еще поля “код\_зн<sup>max</sup>” и “код\_зн<sup>min</sup>”, содержащие максимальное и минимальное значение кодов значений данного. Поскольку при программной реализации ССМ принято соглашение, что коды значений каждого данного представляют собой последовательности натуральных чисел без пропусков, причем для переменных направление увеличения этих кодов совпадает с направлением увеличения самих значений, такая структура справочника значений данных КМПО позволяет проводить все процедуры контроля корректности формирования любых подмножеств значений данного без обращения к самим значениям. В этом же справочнике хранятся коды значений данных по умолчанию (default).

код_	кол-во зн-й	код_зн <sup>max</sup>	код_зн <sup>min</sup>	список зн-й	default

Рис. 15. Справочник “Данные КМПО”

Значительную часть БДПО составляют базы исходных данных, в которых, как уже отмечалось, хранятся и экспериментальные данные (ЭД), и данные сценариев. Обычно для каждого листового параметра/переменной с типом исполнителя DB создается отдельная база исходных данных с двумя основными полями: дата-время и код значения данного, выбираемый из списка допустимых значений. Обоснование такого решения дано ниже [9, 10].

Характерной чертой исследуемых с помощью ССМ нестационарных ППК является изменение значений многих их характеристик во времени. Некоторые изменения можно описать функциональными зависимостями (тип исполнителя GEN). Для определения значений таких данных в некоторый момент  $t$  достаточно задать функцию изменения и начальные условия:

$$Y = F(Y_0, X, t) \text{ или } dY/dt = f(Y_0, X, t_0). \quad (1)$$

При этом в БДПО имеет смысл хранить только значения параметров уравнений (1) –  $Y_0$  и  $X$  с привязкой к конкретной временной точке  $t_0$ . Значения данных для произвольного времени вычисляются в процессе моделирования с помощью соотношения (1). Однако в реальных пространственных системах возможность функционального описания динамики характеристик ограничена, так как сложность самих систем и их взаимодействия с окружающим миром не позволяет выявить или учесть все значимые параметры и формализовать взаимосвязи между ними. Некоторые аналитические взаимосвязи параметров исследуемой системы удается определить (выявить) только в результате проведения моделирования.

Основная часть изменяющихся характеристик задается в виде временных рядов. Рассмотрим несколько типичных ситуаций формирования временных рядов значений

параметров исследуемой системы. Первая, самая простая ситуация, когда при моделировании используется только один изменяющийся параметр объектов исследуемой системы и изменения фиксируются с постоянным временным шагом. В этом случае данные, характеризующие объект, реализуются в компьютере в виде записи базы данных. Причем в явном виде объект, соответствующий этой записи, в КМПО может быть не декларирован. Запись определяется набором полей, куда, как правило, входят:

“адресные” данные, определяющие связь конкретного экземпляра объекта с соответствующим экземпляром объекта верхнего уровня иерархии;  
 одиночные данные  $\{ges_i\}$ , характеризующие объект и не изменяющиеся во времени;  
 массив, представляющий временной ряд значений  $ges_{jk}$  изменяющегося параметра  $ges_j$ , помещенный в поле переменной длины (мето-поле).

Использование поля типа *мето* в данном случае позволяет хранить в БД временные ряды с различным числом элементов. Число элементов временного ряда задается значением данного, которое назначено в КМПО управляющим для  $ges_j$ .

Такой способ хранения временных рядов обеспечивает максимальную компактность БД. Однако он не эффективен, когда при моделировании требуется индивидуальный доступ к отдельному заданному элементу временного ряда или возникает необходимость использовать значения элементов временного ряда для поиска или сортировки данных.

Второй вариант – изменение некоторого набора параметров исследуемой системы с одинаковым временным шагом. Подобная ситуация достаточно типична при моделировании производственных систем, в частности, региональной энергетики [4]. Для каждого энергопроизводящего объекта ежегодно фиксируется набор параметров. Значение практически любого параметра может изменяться ежегодно. При исследованиях энергопроизводителей необходим целевой доступ к набору показателей для любого года. Для каждого года создается отдельная запись в соответствующей БД. Для каждого типа энергопроизводящих объектов формируется отдельный исполнитель – файл БД, так как состав параметров для них различен. Поле, в котором содержится год, используется в индексном выражении для БД.

Недостаток такой организации БДПО – частичное дублирование неизменяющихся данных в записях БД.

Третий вариант – наличие данных предметной области, изменяющихся нерегулярно и имеющих различную дискретность изменений. Здесь необходимо определить временной шаг для рядов значений каждого из изменяющихся параметров, в пределах которого значение параметра считается неизменным. Для хранения данных можно предложить несколько моделей.

По аналогии с первой ситуацией значения изменяющихся параметров можно разместить в *мето-полях*, дополнив значением момента времени получения экземпляра данного. Однако при этом невозможно организовать быстрый доступ к экземплярам на заданный момент времени. Кроме того, в БД может появиться большое количество дублирующихся значений, если в течение нескольких временных шагов параметр не изменялся.

Использование отдельных записей для каждого временного шага также неэффективно. Во-первых, редко удастся использовать кратные значения дискретности различных параметров исследуемого объекта, что позволило бы совместить моменты времени фиксации их значений. Во-вторых, не избежать избыточности БД из-за дублирования значений параметров с большей дискретностью в записях изменений значений параметров с малой дискретностью.

Решение проблемы дает использование БДПО, в которой для каждого типа изменяющегося данного (переменной или параметра) формируется отдельная база. Связь экземпляра значения с конкретным объектом задается полем “Идентификатор Объекта”. Запись в БД производится только в том случае, если значение параметра  $X_k(i)$  для объекта  $o_j$  на момент времени  $t(i)$  отличается от значения  $X_k(i-1)$ , записанного на момент времени  $t(i-1) = t(i) - \Delta t$  (где  $\Delta t$  – шаг дискретности). Фактически в БД хранятся моменты времени, отмечающие границы интервалов, на протяжении которых значения параметра не изменялись, и значения параметра на этих

интервалах. Продолжительность любого интервала может составлять произвольное число шагов дискретности от 1 до  $N$  (где  $N = T / \Delta t$  – число шагов дискретности за все время наблюдений  $T$ ).

Таким образом обеспечивается компактное хранение параметров исследуемой системы и возможность доступа к параметрам и экземплярам их значений на любой момент времени.

После ввода ЭД получают статус “только для чтения” и могут быть только введены повторно, а для сценариев допускается одновременное существование в системе многих версий. Чтобы обеспечить доступ ко всем имеющимся в ССМ БИД, их имена формируются как “код<sub>д</sub> ⊕ Ver”, где код<sub>д</sub> – код данного, а Ver – номер версии (целое неотрицательное число), причем ЭД соответствует версия 0. Каждая БИД имеет 2 поля, куда записываются моменты модельного времени, в которые происходит изменение значения данного, и код нового значения (естественно, из списка допустимых значений), причем любая БИД должна содержать значения данного на моменты начала и окончания сценария, чтобы эти моменты были четко заданы. Для ЭД, вводимых в ССМ автоматически, в базу их описания вводятся дополнительные поля, содержащие интервал опроса датчиков данных и команду для опроса. Этот способ применялся в приложении ССМ к прогнозу горных ударов для организации ввода данных от частных методик.

Результаты имитации (данные категории СМР) хранятся в базах такой же структуры, как БИД, но имена этих баз строятся как “код<sub>с</sub> ⊕ код<sub>р</sub>”, где код<sub>с</sub> есть код сценария, по которому проводилась имитация, он описан несколько ниже.

Следующая группа баз БДПО содержит описания преобразований, выполняемых процессами частного вида, а именно разветвителями, преобразователями и буферами [4, 5]. База “Разветвители” включает код процесса и количество ветвлений, а также мемо-поле с описанием коэффициентов ветвления, в него могут вводиться либо константы (тогда они записываются в формате с плавающей точкой), либо коды функций из справочника “Исполнители процессов”. Данные в это поле вносятся в порядке, соответствующем порядку перечисления ресурсов в списках входных данных этих процессов.

Аналогично построена база “Буферы/преобразователи”, но в ней есть 2 мемо-поля, содержащие описания значений или функций потерь и задержек по времени, вносимых соответствующими процессами. Контроль корректности значений состоит в проверке их неотрицательности, а значения потерь должны быть еще и меньше 1.

Последняя база собственно БДПО, база “Фрагменты” (рис. 16), содержит описание исследованных фрагментов КМПО, ее первичным ключом является “код<sub>опр</sub> ⊕ код<sub>ф</sub>”, где код<sub>опр</sub> есть код объекта принятия решения (ОПР) для данного фрагмента, а код<sub>ф</sub> – служебный код фрагмента, вводимый при утверждении фрагмента для имитации. Одному ОПР может соответствовать много фрагментов, различающихся списками объектов – участников фрагмента  $O_{\phi}$ , а при одинаковых участниках фрагмента – списками зафиксированных на время имитации альтернатив. Эта информация хранится в трех последних полях базы “Фрагменты”, причем в предпоследнее поле вносятся величины  $\alpha \oplus \beta$  для альтернатив объектов и  $\alpha \oplus k$  – для альтернатив наборов ресурсов ( $k$  – номер набора). В последнее поле базы вносятся значения зафиксированных управляющих данных (т. е. фактически номер зафиксированной ветви) в том же порядке, в каком альтернативы перечислены в предыдущем поле.

код фраг.	код <sub>опр</sub>	$O_{\phi}$		$N$ фикс альт-в	список фикс. альт-в	

Рис. 16. База “Фрагменты”

Две оставшиеся базы входят в архив БДПО, поскольку в них хранятся основные результаты решения задач ССМ за длительный срок, которые могут применяться пользователем и системой для сопоставления результатов моделирования, разработки новых и уточнения имеющихся ЛТП.

База “Сценарии” (рис. 17) содержит описание исследованных сценариев, большинство данных в ней соответствуют данным фрейма сценария, в мето-поле данных по сценарию заносятся значения “код<sub>с</sub> ⊕ Ver” (см. выше) для данных, которые конструировались пользователем. Остальные исходные данные фрагмента должны иметься в базах ЭД. В поля “ЛТП” экспертная система вносит информацию о сработавших в ходе исследования фрагмента логико-трансформационных правилах, в поля “ГИС-операции” вносятся имена ГИС-покрытий с результатами применения использованных в данном сценарии ГИС-операций. Справочник базы “Сценарии”, показанный на том же рисунке, кроме обычных полей со служебным кодом и именем сценария, содержит пользовательский комментарий, который вводится при утверждении сценария для имитации и предназначен для облегчения поиска по архиву при необходимости восстановить данные и результаты уже смоделированного сценария.

Набор баз “Классы ситуаций” (рис. 18) предназначен для аккумуляции результатов решения задачи классификации ситуаций в целях их дальнейшего использования. Для каждого ОПР создается своя база, имя которой синтезируется по коду ОПР. Первичным ключом служит код фрагмента, связываемый с аналогичным полем базы “Фрагменты” (рис. 16). В базы “Классы ситуаций” заносятся сведения о фактах, заданных при формировании исходной ситуации, и перечни объектов-участников  $O_{\phi}$  для достаточных ситуаций, оптимальных в каждом классе достаточных ситуаций. Количество таких классов равно количеству входных переменных критерия качества для данного ОПР, столько же полей “Оптимальные достаточные ситуации” содержит соответствующая база “Классы ситуаций”.

код <sub>ф</sub>	код <sub>с</sub>	начало	конец	данные по сценарию		ЛТП		ГИС-операции	
				<i>N</i>	list	<i>N</i>	list	<i>N</i>	list <sub>покр</sub>

код <sub>с</sub>	имя <sub>с</sub>	Rem

Рис. 17. База “Сценарии”

код <sub>ф</sub>	исходная ситуация		сист. время	оптим. дост. ситуации			Rem
	кол-во фактов	список фактов		класс 1	...	класс $N_{опр}$	
				$O_{1\phi}$	...	$O_{N\phi}$	

Рис. 18. База “Классы ситуаций”

### Внутренние БД объектов КМПО

Практика использования ССМ показала, что в ряде приложений, где имеются значительные предшествующие наработки в части создания моделей объектов, которые должны быть включены в состав КМПО ССМ, не всегда удается организовать обмен ресурсами внутри объекта, используя только форматы данных, представленные выше в этом разделе. Например, в задаче моделирования лесных экосистем типичные объекты модели – контрольные и исследуемые площадки – характеризовались массивом строковых данных и могли содержать различное (от 50 до 200) количество разновозрастных деревьев, в свою очередь описываемых некоторым массивом числовых и строковых данных, а также временным рядом годовых приростов, длина которого соответствовала возрасту дерева. Поэтому в ССМ предусмотрены возможности автоматизированного ввода и анализа массивов данных различных форматов, связанных при необходимости системой ссылок, а также некоторые дополнительные средства работы с более сложными структурами данных, опирающиеся на аппарат исполнителей данных [4] и представленные далее. Цель применения этих средств в ССМ состоит в организации интерфейса между нестандартными (для КМПО ПТК) моделями объектов предметной области

и остальными компонентами КМПО ССМ. Поскольку такие наборы данных обычно локализованы внутри объектов КМПО, в дополнение к дереву объектов может строиться дерево внутренних процессов объекта, дерево исполнителей, и почти всегда строится дерево данных (ресурсов).

Типы данных в языках программирования подразделяются на два класса: стандартные (встроенные) и произвольные (пользовательские) типы. Для организации имитационного моделирования существен не тип самого данного предметной области, а тип его представления в компьютере – исполнителя данного. В качестве встроенного множества типов в ССМ используется традиционный для большинства языков программирования высокого уровня набор: символьный, числовой, логический (простые или конкретные типы); массив, запись, файл (структурные или родовые типы).

При использовании архитектуры SQL-сервера термину “файл” соответствует понятие “таблица” или “таблица данных”. Ниже используется термин “файл”.

В массив могут входить только однотипные данные (простые или одинаковые по структуре родовые). Запись может состоять из разных по типам элементов, как простых, так и структурных. Файл может рассматриваться как массив записей или неделимая, без определения структуры, единица хранения данных на внешних запоминающих устройствах. В процессе формирования данных КМПО исполнители задаются только тогда, когда они необходимы как структурные единицы алгоритмического уровня. Конкретные исполнители создаются для структур данных не выше уровня файла. Для данных верхних уровней иерархии исполнитель трактуется как некоторая структура, возможно именованная, исполнителей более низких уровней.

БД объекта предметной области со сложной внутренней структурой данных в общем случае представляет собой набор файлов, содержащих экземпляры постоянных и временных данных, декларированных в концептуальной модели. Файлы как исполнители могут быть назначены данным различных уровней иерархии данных. Если файл задан в качестве исполнителя элементарному данному КМПО, то он – неделимый элемент модели БД. Формат файла в таком случае может быть произвольным, но учитывается при создании программы – исполнителя процесса, для которого соответствующее данное является входным.

Процессам концептуальной модели предметной области в качестве исполнителей назначаются программные модули. Следовательно, структуру исполнителей данных, связанных с процессами отношениями “вход – выход”, можно рассматривать как описание логической структуры данных в исполняемых прикладных программах – подсхемы данных [11]. Элементы подсхемы не всегда можно связать с одним суперобъектом, имеющим исполнителем файл. В общем случае описание данных в КМПО задает внешнюю структуру базы данных объекта.

Базис для построения файловой структуры БД сложного объекта составляет множество исполнителей исходных данных КМПО. Каждому экспериментально данному соответствует исполнитель файлового типа (неделимый файл) или встроенного типа. Исполнители неэлементарных уровней представляются некоторой структурой исполнителей нижних уровней иерархии. В зависимости от типов подчиненных данных это может быть массив или запись.

Для обеспечения автоматизации создания файловой системы БД в ССМ введены вспомогательные структурные типы данных, не отражающиеся в КМПО. Один из них – тип  $POF_{X_i}$  – “часть файла  $X_i$ ”. Исполнитель такого типа не имеет собственной физической реализации в компьютере. Назначение  $t_{er}(res_j) := POF_{X_i}$  трактуется как указатель на то, что структура данных, соответствующая ресурсу  $res_j$ , физически есть часть файла БД с именем  $FILE\_NAME$ . Введение предложенного типа данных делает необязательным включение в модель ресурса, которому назначается исполнитель с именем  $FILE\_NAME$  файлового типа, чтобы создать требуемый файл БД  $FILE\_NAME$  [10].

Понятия первичных и вторичных файлов БД рассмотрены в [12]. К первичным файлам отнесены файлы, ориентированные на задачу первичного учета. При полноте учета первичные файлы составляют полную информационную модель характеризуемого ими объекта. Файлы,

формы и порядок записей в которых ориентированы на прикладные программы, отнесены к вторичным. Целесообразность создания вторичных файлов обосновывается ускорением доступа к данным, хранящимся в этих файлах. Осуществление ускоренного селективного доступа к данным по заданным условиям входит в стандартные требования к современным СУБД. Для этого используются ключевые выражения – индексы. При работе с СУБД индексы задаются на этапе формирования физической структуры файла БД и представляют собой некоторые выражения, построенные из функциональных лексем и имен полей БД. Любую таблицу данных (файл БД) можно проиндексировать по нескольким полям и иметь любое число индексов (индексных файлов). Индексные файлы содержат информацию о расположении записей БД в соответствии с заданным порядком тех полей, по которому выполнено индексирование. Средства современных СУБД позволяют создавать мультииндексные файлы, являющиеся по существу соединением нескольких простых индексных файлов. Простейший вариант ключевого выражения, по которому проводится индексирование, имеет вид:  $I = F_1 + \dots + F_k$ , где  $F_i$  – имя поля базы данных. Использование мультииндексных файлов, фильтров и т. д. позволяет, не создавая вторичных файлов, осуществлять выборки необходимых подсхем данных из первичных файлов.

Часть данных КМПО, включающая постоянные и временные данные с исполнителями типов DB и SMP, задает структуру первичных файлов БД объекта предметной области. Подсхемы данных, которые необходимы при выполнении конкретных вариантов расчета, задаются в основном в классе оперативных (тип исполнителя TMP). В соответствии с принципом разделения данных на классы, эти данные не имеют собственных структурных единиц хранения на внешних устройствах. Назначение типа исполнителя  $POF_{X_i}$  данным этого класса означает, что в оперативной памяти создается динамическая структура для хранения соответствующей подсхемы данных, хранящихся в первичном файле БД с именем, совпадающим с именем исполнителя рассматриваемого ресурса.

Введение другого вспомогательного структурного типа –  $IND_{X_i}$  – позволяет автоматизировать процесс создания индексных выражений для ускоренного селективного доступа к данным [4]. Порядок включения элементов в индексное выражение задается отношениями следования, определенными на множестве подобъектов объекта с типом исполнителя  $IND_{X_i}$ . Ресурсы КМПО, из которых формируется индексное выражение, могут иметь разные типы исполнителей. Поэтому в систему поддержки моделирования включается набор функций построения индексных выражений. Эти функции генерируют индексное выражение на основе шаблона соответствующего ресурса КМПО, осуществляя при необходимости определенные преобразования типов элементов индекса. При этом должны соблюдаться некоторые дополнительные правила назначения типов, описанные далее.

Ресурс  $res_i$ , которому назначен такой исполнитель, т. е.  $t_r(res_i) = IND_{X_i}$ , может содержать в соответствующем ему поддереве данных КМПО объекта только данные с типом отношения иерархии “композиция”. Кроме этого, в КМПО объекта должен входить ресурс  $res_k$  такой, что он является суперобъектом по отношению к  $res_i$ , и его исполнитель однозначно определяет принадлежность исполнителей соответствующего поддерева данных к некоторому файлу. Приведенные условия дают правило использования типа исполнителя данного  $IND_{X_i}$ : для любых двух ресурсов  $res_i, res_j$ , принадлежащих некоторому объекту КМПО ССМ, должно выполняться следующее соотношение:

$$\begin{aligned} & ((t_r(res_i) = IND_{X_i}) \vee (res_j \in h_r^*(res_i) \vee (t_{hr}(o_i) = \&))) \Rightarrow \\ & \Rightarrow ((t_{hr}(res_j) = \&) \vee (t_r(res_k) = POF_{X_i}) \vee (t_r(res_k) = FILE) \vee (e_o(o_i) = e_o(o_k))) \end{aligned} \quad (2)$$

для некоторого  $res_k: res_i \in h_r^*(res_k)$ , где  $h_r^*(res_k)$  – множество подчиненности [4] объекта, порождающего этот ресурс.

Правило (2) учитывается при анализе назначений типов исполнителей ресурсов.

Если в КМПО отсутствует нужный ресурс  $res_i: (e_r(res_i) = FILE\_NAME, t_r(res_i) = FILE)$ , но имеет место некоторое множество данных  $\{res_i^1, \dots, res_i^k\}: (e_r(res_i^1) = \dots = e_r(res_i^k) = FILE\_NAME,$

$t_r(\text{res}_i^1)=\text{POF}_1, \dots, t_r(\text{res}_i^k)=\text{POF}_K$ , то файл формируется на их основе. Число полей записи файла равно мощности множества  $FN$ , полученного в результате объединения множеств элементарных данных поддеревьев КМПО, соответствующих каждому данному  $\text{res}_i^i$ :

$$FN ::= \{\text{res}_x^1: (\text{res}_x^1 \in \mathbf{h}_r^*(\text{res}_i^1)) \vee (h_r(\text{res}_x^1) = \emptyset)\} \cup \dots \cup \{\text{res}_x^k: (\text{res}_x^k \in \mathbf{h}_r^*(\text{res}_i^k)) \vee (h_r(\text{res}_x^k) = \emptyset)\}. \quad (3)$$

Имя и тип каждого поля определяются именем и типом исполнителя соответствующего данного –  $e_r(\text{res}_x^i)$ ,  $t_r(\text{res}_x^i)$ ,  $\text{res}_x^i \in FN$ . Если в состав записи в качестве элементарных данных входят элементы массива и этот массив, в свою очередь, является элементом записи, т. е. существуют данные  $\text{res}_j^i, \text{res}_k^i, \text{res}_d$  и множество данных  $\{o_x^i\}$ , для которых справедливо:

$$(e_r(\text{res}_j^i)=\text{FILE\_NAME}) \vee (t_r(\text{res}_j^i) = \text{POF}_I) \vee (\text{res}_k^i \in \mathbf{h}_r^*(\text{res}_j^i)) \vee (t_{hr}(\text{res}_k^i) = *) \vee \vee (\text{res}_d \in \mathbf{h}_r^*(\text{res}_j^i) \vee (h_r(\text{res}_d) = \&)) \vee (\text{res}_x^i \in h_r(\text{res}_k^i)) \vee (t_r(\text{res}_x^i)=*) \vee \vee (\text{res}_x^i \in \mathbf{h}_r^*(\text{res}_j^i)) \vee (h_r(\text{res}_x^i) = \emptyset), \quad (4)$$

то массив можно не разбивать на отдельные элементы, а хранить в одном поле БД типа memo. При этом, как и в случае хранения массивов ссылок в БД концептуальной модели, в записи присутствует поле, задающее длину массива с именем  $e_r(\text{res}_d)$ .

При наличии в КМПО данных  $\text{res}_j^1, \dots, \text{res}_j^k$  таких, что  $t_r(\text{res}_j^1) = \text{IND}_1, \dots, t_r(\text{res}_j^k) = \text{IND}_K$  и существовании данного  $\text{res}_i^i$ , для которого найдется другое данное  $\text{res}_i$ , такое, что  $(\text{res}_j^i \in \mathbf{h}_r^*(\text{res}_i) \vee (e_r(\text{res}_i)=\text{FILE\_NAME}))$ , для созданного файла БД с именем FILE\_NAME формируется мультииндексный файл с тем же именем – структурный мультииндексный файл, где хранятся индексные выражения, сформированные по данным  $\text{res}_j^1, \dots, \text{res}_j^k$  КМПО. Получаемые индексные выражения представляют собой текстовую конкатенацию полей БД, соответствующих подобъектам элементарного уровня каждого  $\text{res}_j^i$ . Число индексов для каждого файла FILE\_NAME БД будет равно числу данных, имеющих тип исполнителя IND\_X и имя исполнителя FILE\_NAME.

Общее количество файлов, образующих БД объекта, равно количеству различных имен исполнителей, тип которых определяет наличие соответствующего файла.

Для обмена данными между БД и программами – исполнителями процессов КМПО в ССМ включаются два вида сервисных процедур – процедуры считывания и процедуры записи. Процедуры считывания осуществляют индексацию БД по индексу выбираемой подсхемы и считывание в оперативную память из файлов БД элементов заданной подсхемы. Процедуры записи реализуют обратную процедуру – запись результатов работы программы – исполнителя процесса в БД. При этом либо происходит поиск требуемых записей в БД и обновление значений полей, входящих в рассматриваемую подсхему, значениями соответствующих переменных памяти, либо создание новых записей и заполнение в них определенных полей. Указанные сервисные процедуры автоматически включаются в исполняемые программы реализации процесса, если входными или выходными данными процесса являются подсхемы БД [9].

Автоматическое формирование БД объекта не предусматривает индивидуального задания размеров полей БД. Размер поля, отводимого под данное, зависит от его типа. В результате размеры БД, полученной в ходе работы ССМ, будут, как правило, превышать размеры аналогичной БД, построенной средствами стандартной СУБД. В качестве еще одного недостатка следует отметить ограниченность конструкций индексных выражений. В современных СУБД допускается построение индексов не только непосредственно из имен полей БД, но и в виде некоторой комбинации различных функций от этих полей. Основное достоинство предложенного способа создания БД состоит в том, что пользователь непосредственно формирует только концептуальную модель данных с использованием привычных ему терминов, а создание файловой структуры БД и выборка необходимых подсхем данных производится в соответствии с заданными описаниями автоматически.

## Заключение

На примере ситуационной системы моделирования, ранее разработанной автором, представлены средства автоматической генерации реляционных баз данных, необходимых для конструирования модели, выполнения имитационного моделирования ППК, хранения и анализа его результатов с учетом возможности оперативного изменения структуры модели, а также средств моделирования компонентов ППК. Описаны способы организации моделирования с использованием информации от встроенных ГИС и ЭС.

Основные отличия предложенных методов от существующих заключаются в том, что они базируются на концептуальном описании элементов ППК и предоставляют широкие возможности автоматизации контроля корректности модели, сопоставительного анализа вариантов реализации структуры ППК при различных сценариях его функционирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Интероперабельные информационные системы: архитектуры и технологии / Брюхов Д. О. [и др.] // СУБД. 2005. № 4.
2. *Ling Liu, Tamer M. Özsu* (Eds.). Encyclopedia of database systems. 2009. 4100 p.
3. *Teorey T., Lightstone S., Nadeau T.* Database modeling & design: Logical design. 4th edition. Morgan Kaufmann Press, 2005. 720 p.
4. *Фридман А. Я.* Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 530 с.
5. *Фридман А. Я.* Ситуационная концептуальная модель пространственного динамического объекта как семиотическая формальная система // Когнитивно-семиотические аспекты моделирования в гуманитарной сфере. Казань: НИИ «Прикладная семиотика» АН РТ, 2015. С. 37-60.
6. *Фридман А. Я., Курбанов В. Г.* Формальная концептуальная модель промышленно-природного комплекса как средство управления вычислительным экспериментом // Труды СПИИРАН. 2014. № 6(37). С. 424–453.
7. *Фридман А. Я.* Интерпретация концептуальной модели пространственного динамического объекта в классе формальных систем // Вестник КНЦ РАН. 2015. № 4 (23). С. 100–112.
8. *Kroenke David M. and David J. Auer.* Database concepts. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Prentice, 2007.
9. Информационные технологии регионального управления / С. В. Емельянов [и др.]. М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с.
10. *Олейник А.* Концептуальное моделирование региональных систем. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 204 с.
11. *Мартин Дж.* Организация баз данных в вычислительных системах. М.: Мир, 1980. 664 с.
12. *Дейт К.* Введение в системы баз данных. М.: Наука, 1980. 464 с.

## Сведения об авторе

*Фридман Александр Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН;  
e-mail: fridman@iimm.ru

## Information about the author

*Alexander Ya. Fridman* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, leading scientific researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of the KSC of the RAS;  
e-mail: fridman@iimm.ru

## Библиографическое описание статьи

*Фридман А. Я.* Автоматизация синтеза баз данных системы ситуационного моделирования по их концептуальному описанию / *А. Я. Фридман* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1 (24). – С. 100–115.

## Bibliographic Description

*Alexander Ya. Fridman.* Conceptual-Description-Based Automation of Databases Synthesis in Situational Modeling System. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016, vol. 1 (24), pp. 100-115.

УДК 004.057.4, 004.94

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ МНОГОШАГОВЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ

**И. О. Датьев, А. А. Павлов**

ФГБУН Институт информатики и математического моделирования  
технологических процессов КНЦ РАН

### Аннотация

На сегодняшний день имитационное моделирование – основное средство, позволяющее оценить эффективность решений, разрабатываемых для самоорганизующихся мобильных сетей. В работе представлен протокол маршрутизации для самоорганизующихся мобильных сетей и модель, созданная для имитации процесса перемещения сетевых узлов. Кроме того, приведены основные сведения о разрабатываемой в сетевом симуляторе NS-3 модели самоорганизующейся мобильной сети для тестирования разработанного протокола.

### Ключевые слова:

*мобильные беспроводные сети, имитационное моделирование, протокол маршрутизации.*

## MODELLING OF WIRELESS MULTIHOP SELF-ORGANIZING MOBILE NETWORKS

**Igor O. Datyev, Alexey A. Pavlov**

Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes  
of the KSC of the RAS

### Abstract

Simulation today is practically the only way to evaluate the effectiveness of algorithms developed for mobile self-organizing networks. The paper presents a routing protocol for mobile self-organizing networks and a model created to simulate the network nodes mobility. In addition, the basic information about a network simulator of the NS-3 model for testing the developed protocol, is given.

### Keywords:

*mobile ad-hoc networks, simulation, routing protocol.*



### Введение

Беспроводные многошаговые самоорганизующиеся мобильные сети, или сети MANET (англ. Mobile Ad hoc Network), состоят из мобильных устройств, каждое из которых может передвигаться в любом направлении [1].

Самоорганизующиеся сети MANET обладают следующими преимуществами:

- возможностью передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика;
- устойчивостью к изменениям в инфраструктуре сети;
- возможностью быстрой реконфигурации в условиях неблагоприятной помеховой обстановки;
- простотой и высокой скоростью развертывания.

Положительные особенности MANET:

- возможность организации информационно-коммуникационных сетей без создания наземной инфраструктуры базовых станций на территориях с «очаговым» характером

как заселения, так и ведения хозяйственной деятельности, что на сегодняшний день характерно практически для всей Арктической зоны и многих других районов Российской Федерации;

- быстрота и относительная простота организации (развертывания) информационно-коммуникационной сети;

- возможность использования незадействованного телекоммуникационного и вычислительного ресурса мобильных устройств, находящихся в распоряжении современных пользователей.

К областям применения MANET относятся:

- сенсорные (телеметрические) сети различного назначения;
- сети, развертываемые в условиях чрезвычайных ситуаций и природных бедствий при поисковых и спасательных операциях;

- сети, создаваемые в удаленных районах, где отсутствует стационарная инфраструктура (сельская местность, пустыни, Арктика и Антарктика, тундра, тайга и т. д.);

- домашние сети («умный дом»);

- развлекательные сети (сетевые игры, домашние роботы).

Мобильные самоорганизующиеся сети – одно из наиболее перспективных направлений развития информационно-коммуникационных сетей. Однако необходимо отметить и проблемы, непосредственно следующие из самого определения самоорганизующихся мобильных сетей: мобильность узлов ведет к дополнительному повышению динамичности топологии сети, так как к возможности обрыва связи из-за помех или включения/выключения узла добавляется вероятность его перемещения; запас источников питания мобильных узлов может быть ограничен, в связи с чем при проектировании аппаратных средств и протоколов необходимо учитывать еще и энергопотребление (проблема особенно актуальна для сенсорных сетей) [2].

Несмотря на усилия исследователей [3], отсутствует формальная (аналитическая) основа для оценки эффективности решений, предлагаемых в сфере MANET. Эксперименты на основе реальных мобильных самоорганизующихся сетей затруднены по причинам сложности организации (требуется большое количество участников), воспроизведения одинаковых условий моделирования для серий экспериментов, а также в связи с большими временными затратами. Поэтому основным инструментом такой оценки является имитационное моделирование.

## Существующие протоколы маршрутизации мобильных самоорганизующихся сетей

### Протоколы маршрутизации MANET

Протоколы маршрутизации для мобильных самоорганизующихся сетей с привязкой						
к сетевой топологии			к местоположению			
упреждающего типа или табличные	реагирующего типа или с запросом по требованию	гибридные	с зональным обслуживанием	с использованием ретрансляции		
				на основе принципа минимальной ретрансляции	ограниченная направленная ретрансляция	иерархическая маршрутизация
DSDV CGSR WRP RIP OSPF FSR TBRPF OLSR	AODV ABR DSR TORA SSR RDMAR SSA LMR	ZRP LANMAR CEDAR	DREAM Quorum-based GLS Homezone	MFR NFP Compass GPSR	LAR	Terminodes Routing Grid Routing GeoCast

Основная проблема создания самоорганизующихся мобильных сетей – правильное построение маршрута передачи данных от источника до адресата. Беспроводные соединения имеют ограниченный радиус действия, а сами узлы сети постоянно перемещаются. Поэтому доступность узла в некоторый момент времени нельзя гарантировать, и построить точную топологию сети практически невозможно. Для решения этой проблемы создаются протоколы маршрутизации, предназначенные именно для мобильных самоорганизующихся сетей (см. табл.). Традиционно эти протоколы разделяются на проактивные (табличные или упреждающего вида) и реактивные (реагирующего типа или с запросом по требованию). Отдельной группой являются протоколы так называемого гибридного типа, предусматривающие разделение сети на подсети. Как правило, в каждой из таких подсетей маршрутизация осуществляется одним способом (например проактивным), а между сетями – другим. Кроме того, следует выделить протоколы, использующие информацию о местоположении узла [4].

Протоколы каждого класса показывают хорошие результаты только при определенных условиях функционирования сети. Однако заранее предсказать топологию сети или характер трафика зачастую не представляется возможным, поэтому необходимо добиваться максимального снижения зависимости эффективности способа рассылки сетевой информации от сценария работы сети.

### **Разрабатываемый протокол маршрутизации MANET**

В настоящее время коллективом авторов ИИММ КНЦ РАН разрабатывается алгоритм маршрутизации MANET, основанный на использовании векторов расстояний. Данный протокол можно отнести к классу реактивных. Общая проблема подобных протоколов – ухудшение характеристик при увеличении количества узлов и динамичности узлов сети. Разрабатываемый протокол призван улучшить коэффициент доставки пакетов данных при большем количестве узлов и увеличении территории развертывания сети. На сегодняшний день авторы формулируют основное назначение протокола как предоставление возможности развертывать сеть MANET на территории относительно небольшого (площадью около 5 км<sup>2</sup>) населенного пункта или аналогичной по площади территории устойчивой хозяйственной активности. Одно из главных предположений, позволяющих улучшить характеристики существующих протоколов, заключается в наличии устойчивых и повторяющихся в течение суток шаблонов движения узлов (людей, обладающих мобильными устройствами). Эти шаблоны обусловлены графиками труда и отдыха, личными предпочтениями, особенностями архитектурной инфраструктуры населенного пункта и другими факторами.

Поэтому в качестве одного из компонентов метрики предлагается использовать частоту встречаемости пар узлов в определенные промежутки времени.

Суть подхода заключается в следующем. Все узлы сети с определенной периодичностью осуществляют широковещательную рассылку Hello-сообщений, узнавая своих соседей в шаговой доступности. Следует отметить, что на сегодняшний день проблема исследования соседей выделена в отдельную область и существуют разработки специализированных протоколов, используемых для исследования соседей [5]. Эти данные обрабатываются и записываются в таблицы маршрутизации узлов, наряду со временем (моментом) доступности узла-соседа. При необходимости передачи данных узел-источник производит поиск узла назначения в своей таблице маршрутизации. В случае отсутствия соответствующей записи узел-источник начинает рассылку сообщений-запросов для обнаружения узла-получателя. Если узел, принявший запрос, не знает маршрута к узлу назначения (варианты действия узла при получении пакета изображены на рис. 1), то он добавляет свой идентификатор и информацию по частоте встреч со своими соседями в пакет-запрос и транслирует пакет дальше (это позволяет получить обратный путь передачи и избежать закливания маршрута).

Обозначения, используемые на рис. 1:

D – узел назначения, S – узел-источник; DP – пакет данных;

RT – таблица маршрутизации; RREQ – пакет-запрос маршрута;  
 RR – пакет-ответ на запрос маршрута;  
 RE – пакет, содержащий информацию об ошибке передачи на маршруте;  
 NREQ – пакет-опрос соседей (узлов, находящихся в радиусе передачи);  
 NR – ответ на запрос поиска соседей;  
 hq – общее количество хопов маршрута;  
 hc – текущий хоп маршрута, по которому передается пакет;  
 f(hq) – некоторая функция.

При получении запроса узел назначения посылает ответ узлу-источнику с указанием маршрута. Узел-источник, получив ответ, помещает информацию о маршруте в свою кэш-память. Промежуточные узлы, передающие ответ, также сохраняют полученные маршруты к адресату и отправителю. Если узел-источник за определенное небольшое время получает несколько ответов-маршрутов до узла назначения, то будет выбран маршрут с меньшим «расстоянием» (которое вычисляется с помощью предложенной метрики).

Обозначим множество таблиц маршрутизации узла  $RT = \{rt_i\}$ , где  $i = 1, I$ ,  $I$  – количество временных полуинтервалов  $T_i = (t_{i-1}, t_i]$ , где  $t_{i-1}$  – начало интервала,  $t_i$  – конец интервала. Таблица маршрутизации представлена следующим образом:  $rt_i = \{ \langle ID, mc_i \rangle_k \}$ , где  $k = 1, K$ ,  $K$  – количество записей в таблице,  $ID$  – идентификатор узла самоорганизующейся мобильной сети,  $mc_i$  – количество встреч данного узла (хранящего таблицу  $rt_i$ ) и узла  $ID$  на временном полуинтервале  $i$ .

Каждый узел рассылает запросы обнаружения соседей NREQ с частотой  $F$ . Если запрос был разослан в момент времени  $t \in T_i$ , то обновляется соответствующая таблица маршрутизации  $rt_i$ . Обновление заключается в увеличении или уменьшении счетчика встреч, либо добавлении или удалении строки таблицы.

Пусть  $ls(T_i)$  – длительность временного интервала  $T_i$ , обозначим  ${}^ID_s mc_i$  – счетчик встреч узла  $s$  с узлом  $ID$  во временном интервале  $T_i$ , тогда (при условии, что присутствие каждого узла в сети не зависит от другого узла) вероятность доступности узла  $ID$  для узла  $r$  во временном интервале  $i$  равна:

$${}^ID_s p_i = \frac{{}^ID_s mc_i}{F \times ls(T_i)}.$$

Обозначим  ${}^{dest}_s rs_i^j$  – последовательность узлов маршрута с номером  $j$  ( $j$ -й альтернативы достижения узла  $dest$  из узла  $s$ ) от узла  $s$  до узла  $dest$  на временном интервале  $i$ , полученная после рассылки запроса, либо сохраненная в кэш-памяти узла ранее,  ${}^{dest}_s rs_i^j = \langle n_1, n_2, \dots, n_H \rangle$ , где  $n_1$  – узел-источник  $s$ ,  $n_H$  – узел назначения  $dest$ , а узлы  $n_2, \dots, n_{H-1}$  – промежуточные узлы маршрута, т. е. общее количество хопов маршрута  $j$  равно  $H-1$ . Обозначим  $HQ = \frac{H-1}{HMAX}$ , где  $HMAX$  – максимально возможное количество хопов (зависит от предполагаемого диаметра сети).

Тогда расстояние до узла  $dest$  ( $ID$ ) рассчитывается следующим образом:

$$D({}^{dest}_s rs_i^j) = c1 \times \prod_{k=1}^{H-1} {}^k p_i + c2 \times HQ + c3 \times TRC, \text{ где } TRC = \frac{TR}{TRMAX},$$

где  $TR$  – время получения ответа на запрос маршрута (NREQ) или пакет проверки маршрута (RC) от узла назначения,  $TRMAX$  – максимальное время ожидания ответа;  $c1, c2, c3$  – весовые коэффициенты, отражающие

важность вероятности доступности узла, количества хопов маршрута и времени следования по маршруту соответственно.

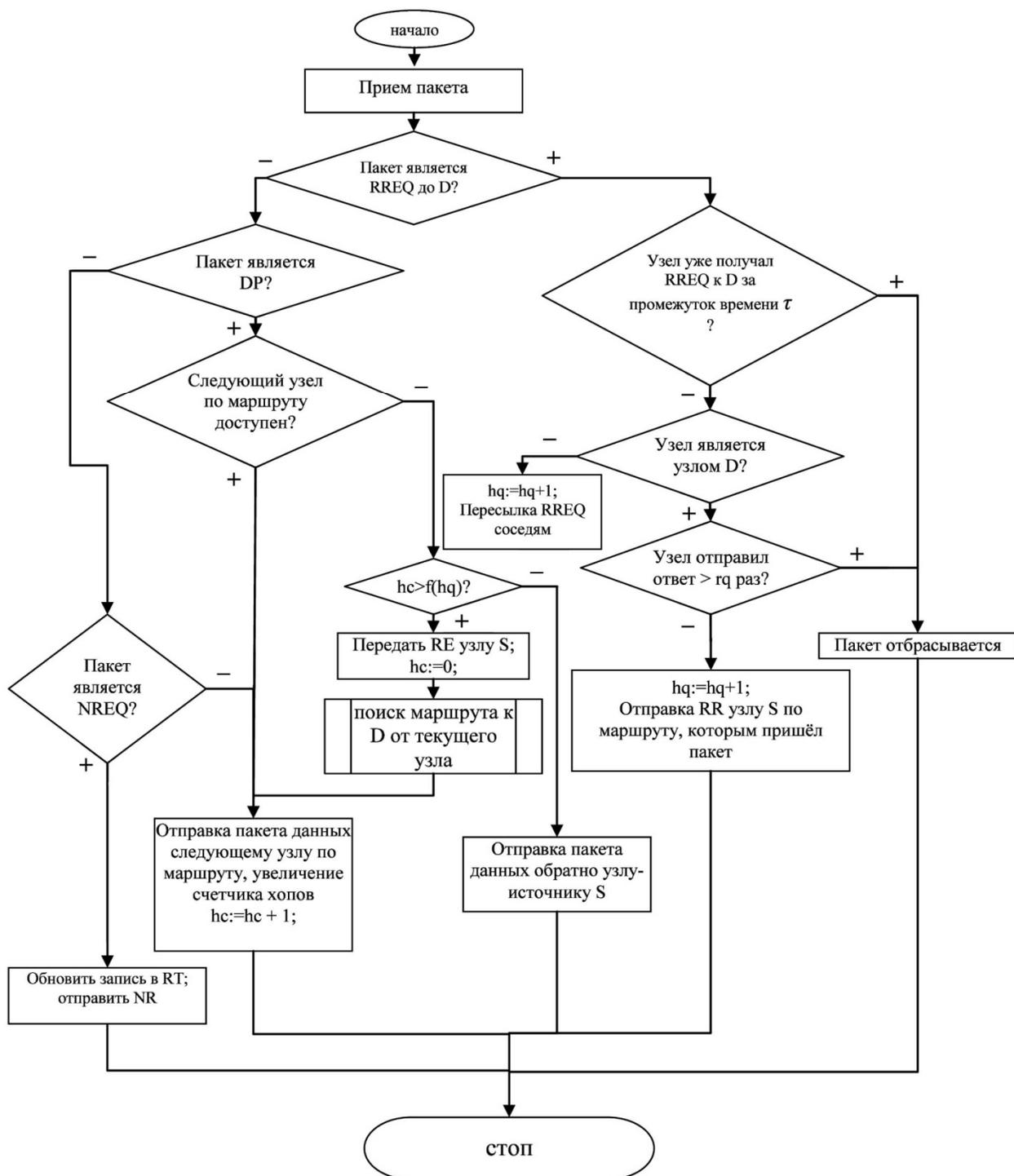


Рис. 1. Блок-схема процедуры обработки пакета узлом

Предлагаемый подход должен понизить вероятность разрыва маршрута и, соответственно, нагрузку на узлы сети, связанную с поддержанием маршрутов.

### **Оценка эффективности разработанных алгоритмов маршрутизации**

На основе анализа работ [6–14], посвященных проблеме моделирования процессов передачи данных в современных компьютерных сетях, можно выделить следующие подходы:

- 1) аналитические (в первую очередь модели теории массового обслуживания) [8–11];
- 2) программы-генераторы сетевого трафика (в том числе статистические подходы к моделированию сетевого трафика) [12, 13];
- 3) сетевые пакетные симуляторы – специализированные программные продукты, предназначенные для детального описания процесса передачи данных по сети (на уровне отдельных пакетов) и учитывающие механизмы регулирования скорости потоков трафика [14];
- 4) жидкостные модели [6], учитывающие механизмы управления скоростью потоков передачи, что позволяет существенно уменьшить число рассматриваемых событий при моделировании интернет-трафика за счет перехода от анализа процессов распространения в канале передачи данных отдельных пакетов к исследованию укрупненных групп пакетов (в большей степени подходят для моделирования магистральных каналов связи).

Относительно применимости перечисленных подходов к MANET необходимо отметить отсутствие аналитических моделей как таковых, ввиду сложности создания из-за высокой динамичности протекающих в таких сетях процессов. Источники трафика, применяемые в жидкостных моделях, оказываются весьма приближенными, поскольку в рамках известных моделей не удается учесть рассогласованный (дискретный) характер действий пользователей. При использовании программ-генераторов трафика невозможно учесть особенности передачи генерируемого трафика по каналу передачи данных, а также механизмы обратной связи при потере пакетов. Поэтому наиболее целесообразным представляется использование имитационных программных продуктов, предоставляющих возможность создания моделей передачи пакетов данных, что подходит для моделирования каналов с умеренной пропускной способностью (потоки порядка нескольких десятков Мбит/с).

В итоге на сегодняшний день тестирование созданных протоколов с целью получения оценок эффективности в различных условиях функционирования сети (количества узлов, плотности узлов и характера их перемещений) обычно проводится с помощью имитационного моделирования [15].

### **Модели перемещений узлов сети**

Одну из ключевых ролей при создании имитационных моделей самоорганизующихся сетей играет применяемая модель перемещения мобильных узлов. Исследователи отмечают существенные различия результатов экспериментов при использовании разных моделей перемещений мобильных устройств [16–22]. Модели перемещений, используемые для тестирования протоколов маршрутизации самоорганизующихся сетей, делятся на модели индивидуальных перемещений (модель случайных перемещений, модель перемещения в городских кварталах и т. д.) и модели групповых перемещений (экспоненциально коррелированная модель случайных перемещений, колонная модель, модель групповых перемещений с опорной точкой и т. п.). При тестировании мобильных самоорганизующихся сетей наиболее часто используются модель случайных перемещений мобильных устройств и модель перемещений мобильных устройств на основе случайных точек.

В модели случайных перемещений мобильный узел перемещается из текущего в новое местоположение, вероятностным образом выбирая направление и скорость перемещения. Новая скорость и направление берутся из предопределенных диапазонов – [мин. скорость, макс. скорость] и  $[0, 2 \cdot \pi]$  соответственно.

Каждое перемещение происходит либо через постоянные интервалы времени, либо узел перемещается на постоянное расстояние (рис. 2, по осям отложено расстояние в метрах, т. е. координаты на плоскости). В конце каждого перемещения вычисляются новая скорость перемещения и направление движения.

Отличительная особенность модели перемещений мобильных устройств на основе случайных точек заключается в паузах между изменениями направления и/или скорости. Перемещение мобильного узла начинается с остановки в одном месте в течение определенного периода времени (т. е. паузы). По истечении этого времени мобильный узел выбирает случайную точку в области моделирования и скорость, которая равномерно распределена в определенном диапазоне. Мобильный узел перемещается в направлении точки назначения с заданной скоростью. Достигнув точки назначения, мобильный узел останавливается на некоторое время, затем процесс повторяется (рис. 3).

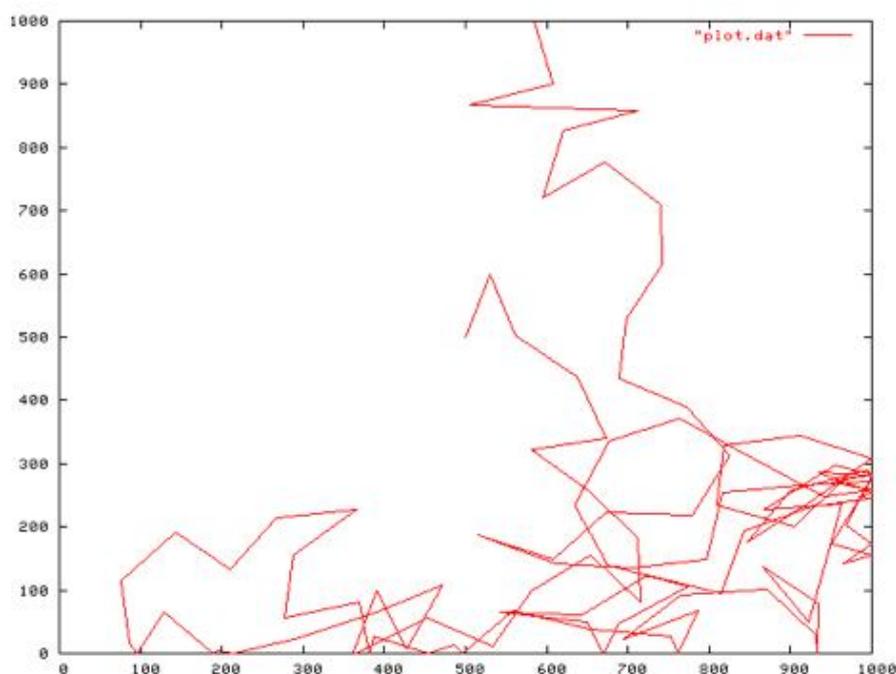


Рис. 2. Модель случайных перемещений мобильных устройств

Интересная модификация данной модели – модель перемещений со взвешенными точками, где учитывается вероятность перехода из одной точки в другую. В работе [18] авторов-создателей этой модификации в роли точек выступили различные корпуса студенческого городка университета Южной Калифорнии.

Коллективом авторов ИИММ КНЦ РАН для тестирования разрабатываемого алгоритма маршрутизации для MANET был создан программный прототип модели автомобильного трафика улично-дорожной сети г. Апатиты. Перед разработчиками стояла цель получения «карты» расположения транспортных средств в определенные моменты времени. Основное предположение заключается в том, что в каждом транспортном средстве находится хотя бы одно мобильное устройство, коммуникационный и вычислительный ресурс которого можно использовать для организации информационно-коммуникационной сети без задействования базовых станций связи.

В общепринятых терминах разработанная модель представляет собой модель клеточных автоматов, дискретную по времени и пространству. В качестве основы модели использован алгоритм перемещения транспортных средств, предложенный коллективом авторов ИИММ КНЦ РАН [23]. Система координат представляет собой «решетку» в некотором роде, аналогичную решетке клеточного автомата. Дорожная сеть разбита на отрезки различных длин и направлений. Каждый отрезок характеризуется конечным количеством точек (соответствующих длине отрезка), шириной (количество полос) и информацией о занятости

каждой точки отрезка. Транспортное средство представлено следующими параметрами: текущие координаты, средняя скорость (за шаг моделирования), маршрут (набор отрезков дорожной сети), время начала маршрута (номер шага моделирования).

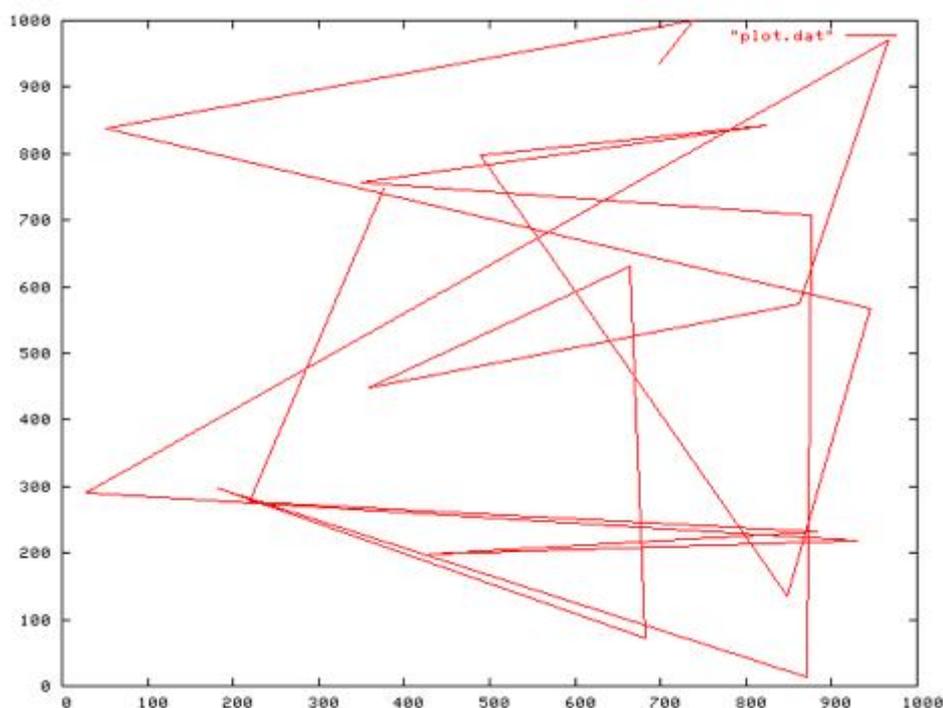


Рис. 3. Модель перемещений мобильных устройств на основе случайных точек

Отличительная особенность модели – так называемый квазислучайный выбор (из определенного заранее устоявшегося в данном населенном пункте набора маршрутов) маршрутов и времени появления транспортного средства на определенном участке дороги. Таким образом, в модели присутствует детерминированная составляющая – заранее определенные маршруты, общее количество транспортных средств и случайная компонента: вероятность выхода/невыхода на маршрут, вероятность изменения маршрута, обгона. Оконная форма, отражающая процесс имитации движения транспортных средств по улично-дорожной сети г. Апатиты, использована для получения «карты» расположения в двумерном пространстве координат мобильных узлов в определенные моменты времени (рис. 4). Плотность мобильных узлов и динамика перемещения – ключевые характеристики, влияющие на процессы передачи данных в одноранговых информационно-коммуникационных сетях и интересующие исследователей при создании модели. В дальнейшем модель планируется расширить территориально и функционально для увеличения уровня реалистичности.

### Модель MANET в NS-3

На сегодняшний день тестирование созданных протоколов с целью получения оценок эффективности в различных условиях функционирования сети (количества узлов, плотности узлов и характера их перемещений) обычно проводится с помощью имитационного моделирования [24]. Для получения сравнительной оценки предложенного протокола маршрутизации по отношению к существующим протоколам маршрутизации сетей MANET авторами создан программный прототип модели в сетевом симуляторе NS-3 [24]. На данный момент среда моделирования NS-3 – одна из основных сред для исследования различных сетей. NS-3 предоставляет разработчику гибкий и в то же время мощный инструментальный за счёт

использования встроенных объектно-ориентированных языков программирования (C++ и Python) и наличия большого количества файлов-библиотек, содержащих реализации классов-объектов стандартных протоколов и моделей перемещения узлов.

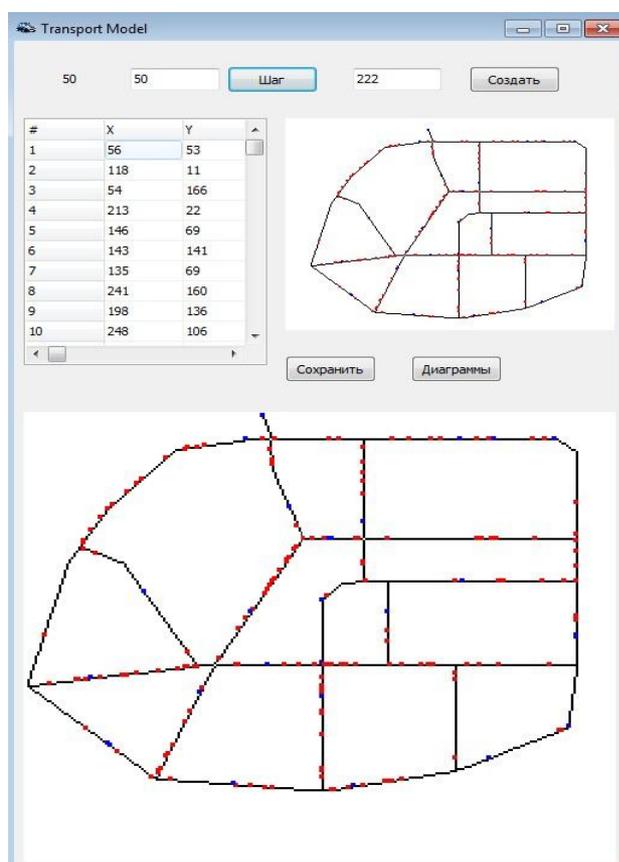


Рис. 4. Оконная форма имитации движения транспортных средств по УДС г. Апатиты

В качестве одной из сложностей разработки модели в NS-3 следует отметить отсутствие подробной документации по созданию моделей новых протоколов маршрутизации. К преимуществам использования NS-3 относятся наличие общих классов объектов и структуры сетевой модели, программно реализованных в виде различных библиотек, что ускоряет разработку и отчасти «унифицирует» созданные модели сетей. Основной набор библиотек NS-3 содержит классы и соответствующие методы, реализующие поведение существующих протоколов маршрутизации и передачи данных.

Модель сети представляет собой программное приложение, выполненное на языке программирования C++. Основными задачами, решаемыми в рамках авторской модели, являются поиск и поддержание маршрута. Описание этих процессов содержит класс `NS3::Routing`, который расширен от абстрактного существующего класса `NS3::Ipv4L4Protocol`. Здесь же реализован механизм широковещательной рассылки с целью поиска соседей в определенные моменты времени. Хранение маршрутов – это другой важный компонент моделей в NS-3. Для этого в модели объявлен класс `NS3::Prot::RouteCache`, в котором сохраняются обнаруженные в процессе поиска маршруты. Класс `NS3::Prot::NSendBuffer` разработан для хранения всех неотправленных пакетов данных. `NS3::Prot::RreqTble` нужен, чтобы избежать повторяющихся запросов маршрута. `NS3::Prot::BuffMaintain` используется для хранения пакетов данных при отправке из буфера передачи и ожидающих подтверждения от следующего узла сети. `ProtOptionsHeader` включает в себя все параметры, необходимые для работы протокола.

## Выводы

На сегодняшний день технологии MANET благодаря скорости организации информационно-коммуникационных сетей без использования базовых станций стратегически важны для отдельных малозаселенных арктических районов РФ, в том числе при разработке интеллектуальных систем информационно-аналитической поддержки развития арктических территорий РФ.

Авторами представленной статьи разработан протокол маршрутизации для мобильных самоорганизующихся сетей. В любом маршрутном протоколе (в том числе и для традиционных сетей) используются определенные механизмы, направленные на достижение наибольшей эффективности маршрутизации, такие как: уменьшение генерируемых протоколом служебных данных, поиск наикратчайших и относительно стабильных маршрутов, минимизация временных задержек при передаче пакетов и т. п.

Оценить эффективность предложенных решений можно с помощью имитационного моделирования. Поскольку каждый из протоколов маршрутизации показывает результаты в определенных условиях функционирования, необходимо разработать сценарии имитационных экспериментов. Одной из ключевых компонент таких сценариев является модель перемещения узлов. Наиболее распространена на сегодняшний день модель случайных перемещений. Однако эта модель скорее идеалистическая, нежели отражающая реальное перемещение узлов. Поскольку одно из предположений при разработке протокола маршрутизации состояло в наличии некоторых устойчивых шаблонов движения в небольшом населенном пункте, то и проверять эффективность предложенного протокола необходимо в условиях, приближенных к реальным. В качестве одного из вариантов решения проблемы авторы, предположив, что в каждом транспортном средстве находится хотя бы одно мобильное устройство, а сами транспортные средства движутся по квазислучайным маршрутам, предложили модель перемещения транспортных средств по г. Апатиты. Кроме того, создан прототип модели функционирования MANET на основе разработанного протокола маршрутизации в сетевом симуляторе NS-3. На сегодняшний день в модели реализовано случайное перемещение узлов. В дальнейшем планируется создать другие модели перемещения узлов (в том числе предложенную модель перемещения транспортных средств) и произвести сравнительный анализ характеристик разработанного протокола с существующими протоколами (AODV, OLSR и т. д.) в различных условиях функционирования с целью улучшения параметров разработанного протокола.

## ЛИТЕРАТУРА

1. MANET // Википедия. Свободная энциклопедия: сайт. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MANET>. 2. Прозоров Д. В. Протоколы геомаршрутизации самоорганизующихся мобильных сетей // T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт 2012. № 5. С. 16–19. 3. Farrel Adrian, Herberg Ulrich. An optimization for the mobile Ad hoc Network (MANET) neighborhood discovery protocol (NHDP). RFC7466 // IETF Datatracker: site. URL: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc7466/>. 4. Определение сенсорных сетей // Хабрахабр: сайт. URL: <http://habrahabr.ru/post/95011/>. 5. Кирьянов А. Г., Хоров Е. М., Островский Д. М. Аналитический метод исследования механизма управления соединениями в мобильных многошаговых беспроводных сетях на примере протокола NHDP // Труды конференции «Информационные технологии и системы». 2011. С. 258–264. 6. D-ITG, Distributed Internet Traffic Generator // Traffic: site. URL: <http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/>. 7. Ns-3: site. URL: <https://www.nsnam.org/>. 8. Fluid models and solutions for large-scale ip networks / Y. Liu [et al.] // Proceedings of ACM/SIGMETRICS 2003. P. 91–101. 9. Зацепин, Э. С. Обзор характеристик протоколов маршрутизации в mesh-сетях // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10. С. 342–345. 10. Метелёв А. П., Чистяков А. В., Жолобов А. Н. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 3(1). С. 75–78. 11. Шишаев М. Г., Елисеенко С. Ю. Имитационная модель пространственных перемещений объектов с квазислучайными параметрами маршрутов // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. 2012. № 11. С. 106–114. 12. Хинчин А. Я. Математические методы теории массового обслуживания // Тр. Матем. ин-та АН СССР. 1955. Т. 49. С. 3–12. 13. Ососков Г. А. Одна предельная теорема для потоков однородных событий // Теория вероятностей и ее применение. 1956. № 2. С. 274–282. 14. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / перевод с англ. И. И. Грушко; под ред. В. И. Нейман. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

15. Вишневецкий В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
16. Hernandez-Campos F., Smith F. D., Jeray K. Generating realistic TCP workloads // Proc. of Computer Measurement Group (CMG) Conf. 2004. P. 273–284.
17. Огородников В. А., Пригарин С. М., Родионов А. С. Квазигауссовская модель сетевого трафика // Автоматика и телемеханика. 2010. № 3. С. 117–130.
18. Гребенкин М. К., Поршнев С. В. Исследование сетевого трафика магистрального Интернет-канала // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика, Телекоммуникации, Управление». 2011. № 4. С. 107–113.
19. Wehrle K., Günes M., Gross J. Modeling and tools for network simulation. Springer, 2010.
20. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for Ad hoc Network research // Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special Issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications. 2002. Vol. 2, no. 5. P. 483–502.
21. A detailed study of mobility models in wireless sensor network / V. Vasanthi [et al.] // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2011. Vol. 33, No.1. P. 7–14.
22. Weighted waypoint mobility model and its impact on Ad hoc Networks / Wei-jen Hsu [et al.] // Mobile Computing and Communications Review. 2005. Vol. 9, № 1. P. 59.
23. Lu G., Manson G., Belis. D. Mobility modeling in mobile Ad hoc Networks with environment-aware // Journal of Networks. 2006. Vol.1, № 1. P. 54–63.
24. Датьев И. О., Шемякин А. С. Информационные системы для извлечения данных о перемещениях мобильных устройств // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. 2013. № 4. С. 46–63.

### Сведения об авторах

*Датьев Игорь Олегович* – кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН;

e-mail: datyev@iimm.ru

*Павлов Алексей Андреевич* – аспирант ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН;

e-mail: pavlov@iimm.ru

### Information about the authors

*Igor O. Datyev* – PhD (Eng.), researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS;

e-mail: datyev@iimm.ru

*Alexey A. Pavlov* – Postgraduate of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS;

e-mail: pavlov@iimm.ru

### Библиографическое описание статьи

*Датьев И. О.* Моделирование беспроводных многошаговых самоорганизующихся мобильных сетей / *И. О. Датьев, А. А. Павлов* // Вестник Кольского научного центра РАН. № 1 (24). – 2016. – № 1. – С. 116–126.

### Bibliographic Description

*Igor O. Datyev, Alexey A. Pavlov.* Modelling of Wireless Multihop Self-organizing Mobile Networks. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016, vol. 1 (24), pp. 116-126.

УДК 004.9

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ГОДА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОЕКТУ «РАЗРАБОТКА КОГНИТИВНЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УГРОЗ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ)»\***

**В. В. Быстров, А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник, В. А. Путилов, С. Ю. Яковлев**  
ФГБУН Институт информатики и математического моделирования  
технологических процессов КНЦ РАН

**Аннотация**

Выполнен анализ проблем информационного обеспечения комплексной безопасности региональных социально-экономических систем. Разработана интегрированная концептуальная модель жизненного цикла угроз региональной безопасности. Созданы рекуррентная иерархическая модель безопасности региональных социально-экономических систем и мультиагентная технология мониторинга угроз региональной безопасности. Спроектирован тренажерно-моделирующий комплекс для управления безопасностью в кризисных ситуациях.

**Ключевые слова:**

*региональная безопасность, информационная поддержка, компьютерное моделирование, мультиагентные технологии, Арктическая зона.*

**PROJECT "DEVELOPMENT OF COGNITIVE METHODS AND TECHNOLOGIES FOR INFORMATION MONITORING OF THE REGIONAL SECURITY THREATS LIFE-CYCLE (EXEMPLIFIED WITH THE ARCTIC ZONE OF RUSSIAN FEDERATION)":  
FIRST-YEAR RESEARCH RESULTS**

**Vitaliy V. Bystrov, Andrey V. Masloboev, Andrey G. Oleynik, Vladimir A. Putilov, Sergey Yu. Yakovlev**  
Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes  
of the KSC of the RAS

**Abstract**

The analysis of problems in informational support of complex safety for regional social and economic systems has been accomplished. An integrated conceptual model of the life-cycle of regional safety threats has been worked out. A recurrent hierarchical model of regional social and economic systems safety as well as a multiagent technology of regional safety threats monitoring have been created. Training simulator for safety management at crisis situations has been designed.

**Keywords:**

*regional safety, informational support, computer simulation, multiagent technologies, Arctic zone.*

**Введение**

В рамках фундаментальной научной проблемы разработки и развития научно-методических основ информационного обеспечения управления комплексной безопасностью социально-экономических систем регионального масштаба в проекте решается задача создания методологии математического и компьютерного моделирования многоуровневых иерархических систем управления безопасностью развития региональных социально-экономических систем Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ). С практической точки зрения результаты проекта ориентированы на разработку системы распределенных тренажерно-моделирующих комплексов на базе современных

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-07-04290.

информационных технологий – мультиагентного, онтологического и системно-динамического моделирования. В сочетании с поддержкой облачных и веб-сервисов разрабатываемые моделирующие комплексы обеспечат информационный мониторинг, индикаторное оценивание и управление жизненным циклом угроз региональной безопасности в АЗ РФ. В проекте осуществляется разработка когнитивных моделей, методов и технологий получения, анализа и обработки информации, ориентированных на формирование целостной информационной среды поддержки решения задач управления региональной безопасностью.

#### **Формализация задач информационного обеспечения комплексной безопасности региональных социально-экономических систем**

В результате системного анализа проблемы выявлены специфические особенности и основные недостатки современной системы организационного управления безопасностью региональных социально-экономических систем АЗ РФ.

Важной функцией управления региональным развитием и одной из основных для Арктических регионов является обеспечение промышленно-экологической безопасности. На фоне возрастающей динамики техногенно-природных изменений имеет место слабая изученность этой проблемы в условиях Российской Арктики. Специфика безопасности развития АЗ РФ состоит в том, что, с одной стороны, уровень безопасности региона существенно зависит от глобальных угроз, с другой стороны, возможные кризисы и чрезвычайные ситуации, обусловленные особенностями региона, способны привести к дестабилизации систем более высокого уровня – федерального, международного, мирового [1].

При моделировании процессов управления безопасностью представляется целесообразным применение принципа приемлемого риска, т. е. риска, достижимого и оправданного (допустимого) с точки зрения социально-экономических и экологических факторов обеспечения безопасности развития; риска, с которым общество готово мириться ради получения определенных положительных результатов своей деятельности в настоящем и будущем. Величина приемлемого риска определяется достигнутым уровнем знаний, социально-экономическими возможностями государства, общественным мнением, а также региональными особенностями. Обоснование уровня приемлемого риска регионального развития – самостоятельная научная задача.

К настоящему времени в АЗ РФ создана многопрофильная производственная и социальная инфраструктура преимущественно сырьевых отраслей экономики, а также военно-промышленного и транспортного комплексов.

В предшествующих исследованиях исполнителями проекта разработаны подходы к унифицированному математическому описанию предметных областей сложной структуры, информационным ресурсам поддержки управления сложными системами, а также разнородных опасностей [1–5]. В рамках данного проекта основное внимание уделяется информационно-аналитической поддержке управления безопасностью, вопросам координации действий сил и средств, построению единого информационного пространства для принятия решений.

В настоящее время отсутствует целостная, эффективно функционирующая структура информационного обеспечения управления региональной безопасностью. Специфика деятельности в АЗ РФ и обусловленные ею задачи и проблемы обеспечения безопасности указанных территорий позволили выбрать в качестве наиболее перспективной сетцентрическую модель организации системы поддержки управления.

Разработана интегрированная концептуальная модель жизненного цикла угроз региональной безопасности для повышения семантической интероперабельности информационных систем региональных ситуационно-кризисных центров [2, 4]. Модель объединяет формализованные описания предметной области «региональная безопасность» и исполнительной среды информационно-аналитической поддержки процессов управления региональной безопасностью в разнотипных кризисных ситуациях, реализована в виде

прикладной OWL-онтологии. Это обеспечивает, с одной стороны, семантическую интероперабельность информационных систем региональных ситуационно-кризисных центров, образующих целостную информационную инфраструктуру безопасности региона, а с другой – формальную основу для автоматизации и имитационного моделирования процессов принятия управленческих решений в условиях разнотипных кризисных ситуаций на всех этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности.

Практическая реализация концептуальной модели выполнялась средствами языка онтологического моделирования OWL (Web Ontology Language) в инструментальной среде разработки онтологий Protégé. Созданная прикладная онтология содержит 7 уровней таксономии и включает в себя более 500 классов, 150 атрибутов, 30 иерархических и 40 ассоциативных отношений, 30 функциональных ограничений. Онтология имеет высокую степень детализации, что обеспечивает целостное формализованное представление состава объектов и субъектов, участвующих в процессах обеспечения региональной безопасности на всех этапах жизненного цикла развития кризисных ситуаций и на всех уровнях управления (стратегическом, оперативном, тактическом) и отношений между ними.

Разработанная модель обладает когнитивными свойствами и обеспечивает основу для реализации процедур автоматизированного синтеза и анализа мультиагентных моделей организационных структур управления региональной безопасностью в разнотипных кризисных ситуациях.

### **Технология мониторинга угроз региональной безопасности**

Разработана мультиагентная технология информационного мониторинга угроз региональной безопасности для анализа и синтеза сценариев антикризисного управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем АЗ РФ. Построены формализованные модели жизненного цикла угроз региональной безопасности и интеллектуальные агенты для сбора и обработки информации о влиянии изменяющихся угроз на состояние региональных систем [6, 7].

Разработан комплекс проблемно-ориентированных имитационных моделей прогнозирования сценариев развития компонентов региональных систем АЗ РФ. В основе комплекса моделей лежит предложенная коллективом исполнителей проекта система индикаторов оценки комплексной безопасности региона, сформированная на основе ряда параметров, используемых в методиках оценивания социально-экономического развития региона ведущими научными коллективами РФ, и дополненная собственными индикаторами [8, 9]. Дополнительные индикаторы в основном представляют собой аддитивную свертку нескольких показателей и введены из практических соображений для упрощения генерации имитационных моделей. На данный момент система индикаторной оценки комплексной безопасности содержит более 20 основных показателей, часть которых получается за счет вычислений, а другая – берется из данных официальной статистики. На текущей стадии исследования рассматривается пять составляющих безопасности: экономическая, социальная, экологическая, кадровая и промышленная. Предложенная система показателей может расширяться путем добавления новых компонентов, необходимых для оценки комплексной безопасности региона. Разработана технология формального сравнения сценариев развития компонентов региональных систем с использованием предложенной системы показателей оценки безопасности. Технология основана на матричном представлении оценок показателей безопасности, где столбцы матрицы соответствуют учитываемым в оценке составляющим комплексной безопасности, а в строках представлены их параметры. На данный момент в качестве элементов матрицы оценки комплексной безопасности рассматриваются только скалярные величины. Ведутся работы по рассмотрению вариантов выхода за пределы классической теории матриц и применению векторных и лингвистических переменных в качестве элементов матрицы.

Для представления связей между предложенными показателями оценки состояния комплексной безопасности построены когнитивные модели в виде диаграмм причинно-следственных связей. В качестве вершин диаграммы взяты выделенные показатели комплексной безопасности и концепты формальной интегрированной концептуальной модели жизненного цикла угроз региональной безопасности. Разработанные когнитивные модели рассматривались как средство наглядного представления разнородной информации об объекте исследования и были положены в основу комплекса имитационных моделей.

Комплекс моделей прогнозирования сценариев развития компонентов региональных систем АЗ РФ разработан с применением таких видов моделирования, как системная динамика, дискретно-событийное и агентное моделирование. В качестве средств разработки моделей использовались инструментальная среда Anylogic и программные приложения распределенного синтеза имитационных моделей, разработанные с участием исполнителей проекта в рамках предыдущих научно-исследовательских работ [5, 10–12]. Синтез проблемно-ориентированной имитационной модели из априорно определенного набора шаблонов осуществляется на основе концептуального описания решаемой задачи, представленной в OWL-онтологии, с использованием специально разработанных формальных процедур.

Мультиагентная технология информационного мониторинга угроз региональной безопасности обеспечивает автоматизированное формирование матрицы показателей региональной безопасности и прогнозирование динамики показателей в режиме реального времени. В результате многократной имитации можно исследовать и оценить динамику показателей безопасности как для задач оценки комплексной безопасности в целом, так и для конкретной ее составляющей.

### **Модель комплексной безопасности региональных социально-экономических систем**

Разработана агентная многоуровневая рекуррентная иерархическая модель комплексной безопасности региональных социально-экономических систем для поддержки сетецентрического управления безопасностью. Специфика модели заключается в использовании функционально-целевой технологии [13] и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем [14] для реализации процедур согласования локальных решений сетецентрического управления. Сетецентричность предполагает сетевую структуру организационного управления с выделенными управляющими центрами. Модель обеспечивает координацию показателей региональной безопасности, оптимизируемых различными элементами многоуровневых систем управления, в условиях децентрализованного принятия решений.

Предметная область задачи обеспечения комплексной безопасности региона имеет иерархическую структуру, образуемую различными по характеру согласованными составляющими региональной безопасности. Каждая из составляющих, в свою очередь, образуется набором объектов, субъектов, процессов и методов обеспечения безопасности, потенциальных угроз и опасностей. Таким образом, структура многоуровневой системы управления безопасностью, построенная изоморфно декомпозиции основной целевой задачи обеспечения комплексной региональной безопасности, представляется в виде дерева. Корню дерева ставится в соответствие собственно система, вершинам дерева, отстоящим от корня на одно ребро, – подсистемы, реализующие классы безопасности, далее – подсистемы, реализующие методы и средства обеспечения безопасности, и т. д.

Отображение структуры задач предметной области на структуру программно-аппаратных средств позволяет определить набор элементарных компонентов для структурно-алгоритмического синтеза системы информационно-аналитической поддержки управления комплексной безопасностью. С этой целью в рамках модели определен алфавит функциональных операций (множество атомарных действий системы) и разработаны процедуры вывода последовательно-параллельных комбинаций этих действий, обеспечивающих решение задач вышележащих уровней, вплоть до корня дерева [3].

Иерархическая модель формируется путем рекуррентной декомпозиции задач предметной области, начиная с основной целевой задачи. Каждая задача представляется в виде двухуровневой структуры, имеющей один элемент верхнего уровня и определяемое свойствами предметной области число элементов нижнего уровня. Терминальный уровень иерархической структуры образуют задачи, дальнейшая декомпозиция которых в рамках предметной области невозможна либо нецелесообразна. Регулярные правила построения модели обеспечивают возможность получения для рекуррентной модели достаточно простых решений вопросов координации и создания конкретных алгоритмов структурно-алгоритмического синтеза. Под координацией в настоящей работе понимается свойство системы находить оптимальные решения общей задачи управления при оптимизации подзадач управления, решаемых подсистемами. Для обеспечения координации требуется реализовать определенные ограничения на взаимосвязи между подсистемами. Вариант организации управления зависит от степени распределенности общей задачи системы между уровнями. Наиболее простое решение состоит в том, что элемент верхнего уровня (координатор) имеет точное описание поведения элементов нижнего уровня. Такая постановка приводит к обычным задачам дискретной оптимизации. Второй подход состоит в том, что задача координации решается с учетом взаимодействия семейства взаимосвязанных подсистем (элементов) нижнего уровня. При этом полагается, что каждая из подсистем решает свою задачу и преследует свои цели, а формализация задачи координатора основывается на информации о том, каким образом элементы нижнего уровня при выборе своих решений учитывают эти взаимодействия. Этот вариант позволяет для решения задачи, стоящей перед всей системой в целом, использовать совокупность решающих элементов, расположенных на различных уровнях организации системы, даже если каждый элемент в отдельности (включая и координатора) не в состоянии решить общую задачу.

Разработанная рекуррентная модель обеспечивает основу для автоматизированного синтеза программной исполнительской среды информационно-аналитической поддержки принятия управленческих решений в сфере региональной безопасности, а также для решения задач координации в многоуровневых распределенных системах [15].

### **Тренажерно-моделирующий комплекс решения задач управления безопасностью в кризисных ситуациях**

На основе полученных в ходе проекта теоретических результатов спроектирован и разрабатывается тренажерно-моделирующий комплекс для решения задач управления безопасностью в кризисных ситуациях в виде облачного сервиса на базе модели обслуживания IaaS [16, 17]. Выбор гибридного облачного решения обеспечит доступ к создаваемому инструментарию для субъектов управления различного уровня и экспертов. Выполнена программная реализации управляющего ядра и ряда активных компонентов тренажерно-моделирующего комплекса на базе облачных технологий. Отличительной особенностью создаваемого тренажерно-моделирующего комплекса является реализация процедур автоматизированного формирования по данным мониторинга матрицы показателей региональной безопасности, характеризующих состояние развития компонентов социально-экономической системы региона, и их параметризации на основе собранной информации. Это дает возможность оценки данных показателей на основе набора измеряемых параметров и прогнозирования их динамики средствами имитационного моделирования для анализа и синтеза сценариев антикризисного управления безопасностью развития и функционирования компонентов региональных систем.

### **Заключение**

Системные исследования по созданию комплексных автоматизированных систем для информационной поддержки и координации сетецентрического управления региональной безопасностью арктических регионов до настоящего времени не проводились ни в Российской

Федерации, ни за рубежом. Актуальность таких исследований обусловлена принятием государственных стратегических решений по активизации деятельности РФ в Арктической зоне и необходимостью создания современной информационной инфраструктуры обеспечения безопасности этой деятельности как на региональном, так и на международном уровне.

В настоящее время для решения проблемы повышения эффективности сетецентрического управления региональной безопасностью используются разнообразные средства информационно-аналитической поддержки, каждое из которых представляет собой обособленный комплекс методов автоматизации и управления. Эти средства применяются изолированно друг от друга для решения частных задач информационного обеспечения отдельных аспектов региональной безопасности. Полученные в ходе исследований по проекту результаты ориентированы на комплексное решение проблемы формирования системы целостной информационной поддержки управления безопасностью. Предлагаемые разработки обеспечивают возможность совместного использования существующих и вновь создаваемых методов и средств информационной поддержки управления региональной безопасностью на основе их интеграции в рамках единой информационной среды региональной безопасности. При этом сами разработки предусматривают формальную основу для реализации процедур динамического формирования такой среды с учетом специфики задач информационной поддержки и наличия исполнительных ресурсов. Отечественных и зарубежных аналогов, комплексно решающих задачи проекта, в ходе исследований не выявлено.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню с точки зрения используемых и разрабатываемых методов и информационных технологий. Интеграция технологий концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования, а также методов теории многоуровневых иерархических систем, сетецентрического управления, технологий одноранговых распределенных информационных систем и Семантического Веба, обеспечивают создание адаптивной интеллектуальной среды информационно-аналитической поддержки задач управления и принятия решений на всех этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности.

Предложенная методология решения исследуемой в рамках проекта научной проблемы и использованный инструментарий для решения поставленных задач обеспечили получение результатов, адекватных современным требованиям и мировым стандартам в области разработки методов и программных средств информационного обеспечения и мониторинга комплексной безопасности сложных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев С. Ю. Основы создания системы комплексной безопасности для защиты Арктической зоны Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 3. С. 84–91.
2. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. 2011. Т. 14, № 4. С. 842–853.
3. Маслобоев А. В., Путилов В. А., Сютин А. В. Многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6(94). С. 163–170.
4. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Специфика и структура задачи информационной поддержки управления безопасностью региональных социально-экономических систем // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18, №3. С. 476–485.
5. Олейник А. Г. Концептуальное моделирование региональных систем. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 204 с.
6. Маслобоев А. В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12, № 1. С. 113–125.
7. Горохов А. В., Маслобоев А. В., Олейник А. Г. Технология формирования спецификаций среды имитационного моделирования задач управления // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3(19). С. 55–70.
8. Маслобоев А. В. Метод комплексной оценки и анализа глобальной безопасности региональных социально-экономических систем на основе когнитивного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 5(87). С. 154–164.
9. Маслобоев А. В. Состав и структура системно-динамической модели глобальной безопасности арктического региона // Вестник высших учебных заведений Черноземья. 2013. № 4(34). С. 43–53.
10. Путилов В. А., Горохов А. В. Системная динамика регионального развития. Мурманск:

НИЦ «Пазори», 2002. 306 с. **11.** Информационные технологии регионального управления / С. В. Емельянов [и др.] М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с. **12.** Маслобоев А. В., Олейник А. Г., Шишаев М. Г. Информационная технология дистанционного формирования и управления моделями системной динамики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 4. С. 748–755. **13.** Кузьмин И. А., Путилов В. А., Фильчаков В. В. Распределенная обработка информации в научных исследованиях. Л., 1991. 304 с. **14.** Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 343 с. **15.** Маслобоев А. В., Путилов В. А., Сютин А. В. Координация в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 1. С. 130–138. **16.** Маслобоев А. В. Виртуальные когнитивные центры как интеллектуальные системы для информационной поддержки управления региональной безопасностью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2(90). С. 167–170. **17.** Яковлев С. Ю. Информационно-аналитическое обеспечение функционирования регионального центра управления безопасностью в чрезвычайных и кризисных ситуациях // Проблемы управления безопасностью сложных систем: труды XXIII Международной конференции (Москва, декабрь 2015 г.) / под ред. Н. И. Архиповой, В. В. Кульбы. М.: РГГУ, 2015. С. 84–87.

### Сведения об авторах

*Быстров Виталий Викторович* – кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН; e-mail: bystrov@iimm.ru

*Маслобоев Андрей Владимирович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН; e-mail: masloboev@iimm.ru

*Олейник Андрей Григорьевич* – доктор технических наук, зам. директора по научной работе ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН; e-mail: oleynik@iimm.ru

*Путилов Владимир Александрович* – доктор технических наук, директор ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН; e-mail: putilov@iimm.ru

*Яковлев Сергей Юрьевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН; e-mail: yakovlev@iimm.ru

### Information about the authors

*Vitaliy V. Bystrov* – PhD (Eng.) researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS; e-mail: bystrov@iimm.ru

*Andrey V. Masloboev* – PhD (Eng.) senior researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS; e-mail: masloboev@iimm.ru

*Andrey G. Oleynik* – Dr. Sci. (Eng.), deputy director of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS; e-mail: oleynik@iimm.ru

*Vladimir A. Putilov* – Dr. Sci. (Eng.), director of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS; e-mail: putilov@iimm.ru

*Sergey Yu. Yakovlev* – PhD (Eng.), senior researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the KSC of the RAS; e-mail: yakovlev@iimm.ru

### Библиографическое описание статьи

Результаты первого года исследований по проекту «Разработка когнитивных методов и технологий информационного мониторинга жизненного цикла угроз региональной безопасности (на примере Арктической зоны Российской Федерации)» / В. В. Быстров [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1 (24). – С. 127–133.

### Bibliographic Description

Project «Development of Cognitive Methods and Technologies for Information Monitoring of the Regional Security Threats Life-Cycle (Exemplified with the Arctic Zone of Russian Federation)»: First-Year Research Results / Vitaliy V. Bystrov, Andrey V. Masloboev, Andrey G. Oleynik, Vladimir A. Putilov, Sergey Yu. Yakovlev. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. 2016, vol. 1 (24), pp. 127-133.

**НАУЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ, ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ ИНСТИТУТАМИ  
КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН на 2016 г.**

- Научная сессия Геологического института КНЦ РАН, посвященная Дню науки  
*Апатиты, Геологический институт, 8 февраля.*
- IV Конференция научных обществ, посвященная Дню науки  
*Апатиты, Геологический институт, 12 февраля.*
- 39-й ежегодный семинар «Физика авроральных явлений»  
*Апатиты, Полярный геофизический институт, 29 февраля – 04 марта.*
- XI Всероссийская конференция «Прикладные проблемы управления макросистемами»  
*Апатиты, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов, 26 марта – 3 апреля 2016 г.*
- Конференция «Полярные процессы в атмосферах Земли и планет»  
*Апатиты, Полярный геофизический институт, 28 марта – 1 апреля.*
- XIII Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия  
*Апатиты, Геологический институт, 4–5 апреля.*
- Международная научно-техническая конференция «Наука и образование – 2016»  
*Мурманск, Мурманский государственный технический университет, апрель, 2 дня.*
- X Международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород»  
*Апатиты, Горный институт, 07–11 июня.*
- Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Уникальные геологические объекты Кольского полуострова»  
*Апатиты, Геологический институт, июль, 3 дня.*
- Конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике»  
*Апатиты, Полярный геофизический институт, 19–23 сентября.*
- VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения»  
*Апатиты, Институт проблем промышленной экологии Севера, 10–14 октября.*
- XXVII Молодежная научная конференция, посвященная памяти чл.-корр. АН СССР К. О. Кратца  
*Апатиты, Геологический институт, октябрь, 1 день.*
- XIII Всероссийская научная школа «Математические исследования в естественных науках»  
*Апатиты, Геологический институт, октябрь, 1 день.*
- V школа молодых ученых «Высокоширотные геофизические исследования»  
*Апатиты, Полярный геофизический институт, 26–27 октября.*
- VIII конференция-школа молодых ученых с международным участием "Геотехнология и обогащение полезных ископаемых"  
*Апатиты, Горный институт, 16–17 ноября.*

**39-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений»  
Полярный геофизический институт, 29 февраля – 4 марта 2016 г.**

В семинаре приняли участие около 90 человек (в том числе 35 – из других городов России, из них 21 – молодые ученые) из 22 научно-исследовательских институтов и университетов. Среди участников – два представителя из-за рубежа: М. В. Успенский из Finnish Meteorological Institute, Helsinki и Ивана Колмасова (Ivana Kolmašová) из Institute of Atmospheric Physics, Prague, Czech Republic. В числе активных участников семинара – сотрудники Полярного геофизического

института и Отдела медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН. Было представлено 47 устных и 62 стендовых докладов.

Семинар посвящен обсуждению новейших результатов, полученных российскими учеными в области исследования геофизических процессов, наиболее интенсивно проявляющихся на широтах авроральной и субавроральной зон.

Работа семинара проходила по следующим направлениям:

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

На семинаре состоялось подведение итогов конкурса на соискание диплома имени Юрия Павловича Мальцева "За лучшую работу молодого российского ученого". В конкурсе участвовали 11 молодых ученых из 8 исследовательских институтов и университетов. Рассматривались работы, опубликованные в 2014–2015 гг. Победителем конкурса стал Максим Владимирович Клименко (Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград).

В рамках культурной программы состоялся концерт, проведены экскурсии в Ботанический сад ПАБСИ и Снежную деревню.

### **Круглый стол «Социально-экономическое развитие Арктической зоны России в период мировой экономической неопределенности»**

***Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН***

***Общественная палата Мурманской области, 26 февраля 2016 г.***

Организаторами мероприятия совместно выступили ученые Института и члены Общественной палаты Мурманской области. Модератор круглого стола – Федор Дмитриевич Ларичкин – олицетворял этот союз, являясь одновременно ведущим ученым ИЭП и заместителем председателя Общественной палаты.

Формат круглого стола определил переход от знакомства с информацией о современной ситуации в регионах Арктической зоны к квалифицированной и объективной оценке наиболее актуальных проблем социально-экономического возрождения и развития Арктической зоны России посредством диалога, обмена мнениями и дискуссии.

Все темы докладов, включенные в программу мероприятия, вызвали живой интерес участников. Наиболее острая дискуссия развернулась по проблеме разработки федерального закона «О развитии Арктической зоны Российской Федерации» (докладчик В. С. Селин, ИЭП КНЦ РАН), по теме «Социальная устойчивость регионов Севера и Арктики РФ и приоритеты социальной политики» (докладчик Л. А. Рябова, ИЭП КНЦ РАН) и по докладу «Наука и высшая школа» (докладчик М. В. Иванова, КФ ПетрГУ).

Инновационную идею о разработке Национального общественного стандарта «Экологическая безопасность Арктики» представил руководитель НП «Технопарк» г. Апатиты В. А. Котельников. Активное обсуждение вызвал доклад Л. В. Ивановой «Арктика – сфера международного сотрудничества и взаимодействия», что обусловлено развитыми международными связями Мурманской обл. в Баренцевом Евро-Арктическом регионе.

Задачи и возможности общественных организаций по устойчивому развитию Арктики изложила в своем докладе представитель Кольского экологического центра Е. Н. Кругликова,

она убедительно показала, что особенностью деятельности экологических организаций является ориентация на практические мероприятия.

Для разработки рекомендаций и предложений в исполнительные органы власти региона участникам было предложено заполнить опросные листы и ответить в них на ряд вопросов.

Основные предложения также сформулировали в своих интервью ГТРК «Мурман» Ю. Л. Войтеховский, В. С. Селин, Л. А. Рябова и П. П. Кузьмин.

Все участники круглого стола высоко оценили проведенное мероприятие и были едины в желании продолжить совместные встречи представителей власти, науки и общественных организаций в таком же формате и на площадке ИЭП КНЦ РАН.

### **Научная сессия ГИ КНЦ РАН, посвященная Дню российской науки**

#### ***Геологический институт КНЦ РАН, 8 февраля 2016 г.***

Уже девять лет в ГИ КНЦ РАН проходит научная сессия, на которой представляются как традиционные, так и неординарные доклады, высказываются спорные суждения и гипотезы. Большое внимание уделяется историческим памятным датам, связанным с именами выдающихся ученых-геологов. Сессия проводится под эгидой Российского минералогического общества.

На утреннем заседании были заслушаны: сообщение по истории – д.г.-м.н. Ю. Л. Войтеховский рассказал об исторических датах 2016 г.; доклад «60 лет КО РМО», подготовленный творческим коллективом – к.г.-м.н. А. К. Шпаченко, д.г.-м.н. Ю. Л. Войтеховский и к.и.н. Е. И. Макарова.

Живой интерес вызвали доклады д.г.-м.н. А. А. Жамалетдинова «Крупнейшие аномалии электропроводности мира», д.г.-м.н. В. В. Балаганского, И. А. Горбунова и к.г.-м.н. С. В. Мудрука «Палеопротерозойский Лапландско-Кольский коллизионный ороген, Балтийский (Фенноскандинавский) щит», к.ф.-м.н. А. Б. Раевского, к.г.-м.н. С. В. Мудрука и д.г.-м.н. В. В. Балаганского «Интерпретация данных детальной наземной магнитной съемки складок сложной морфологии (на примере Серповидной колчановидной складки, Кейвский террейн)». Еще один доклад в рамках тематики структурных исследований сделал И. А. Горбунов от авторского коллектива (И. А. Горбунов, д.г.-м.н. В. В. Балаганский, к.г.-м.н. С. В. Мудрук, М. Ю. Сидоров, Т. В. Картушинская) на тему «Структурные исследования в Беломорском и Кейвском террейнах и их вклад в понимание тектоники раннего докембрия».

На вечернем заседании сессии было представлено семь докладов, посвященных минералогии и геологии рудных месторождений, а также математическим методам в геологии. Аспирантка Алёна Компанченко от творческого коллектива (д.г.-м.н. А. В. Волошин, М. Ю. Сидоров, А. А. Компанченко, А. В. Чернявский) сделала доклад «Новые данные о минералах. Первые находки в России и в Кольском регионе». К.г.-м.н. А. А. Калинин и Е. Э. Савченко выступили с сообщением «Новые данные о минералах благородных металлов в Оленинском рудопроявлении золота, пояс Колмозеро-Воронья». Тематика технологической минералогии была освещена в докладе к.г.-м.н. Ю. Н. Нерадовского в соавторстве с сотрудниками ИХТРЭМС КНЦ РАН к.т.н. Т. П. Белогуровой, к.т.н. А. А. Паком, Р. Н. Сухоруковой «Использование методов технологической минералогии при изучении каменных углей, золоотходов и бетонов на минеральных вяжущих». К.х.н. В. К. Каржавин выступил с кратким сообщением «Рутил-углеродная ассоциация».

К.г.-м.н. Е. В. Мартынов, д.г.-м.н. Н. Е. Козлов и д.г.-м.н. Н. О. Сорохтин представили доклад «Математические методы изучения вещественного состава комплексов раннего докембрия (новые подходы и ограничения)». К. г.-м.н. Н. Ю. Грошев от коллектива авторов (к.г.-м.н. Ю. Н. Нерадовский, д.г.-м.н. Ю. Л. Войтеховский, С. В. Бороздина, к.г.-м.н. Н. Ю. Грошев, к.г.-м.н. А.В. Мокрушин, А.В. Малыгина) сделал доклад на тему «Комплексные титаномagnetитовые руды Колвицкого месторождения (Кольский п-ов)». В завершение научной

сессии А. Н. Иванов, Н. Ю. Грошев и А. У. Корчагин представили сообщение «Петрогенные, редкие и рудные элементы в разрезе месторождения Каменник (Кольский п-ов)».

**II Всероссийская научная конференция с международным участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов», посвященная памяти академика В. Т. Калининкова.**

***ИХТРЭМС КНЦ РАН, 25–27 ноября 2015 г.***

Конференция организована при участии ФАНО РФ, Отделения химии и наук о материалах РАН, Научных советов РАН по химической технологии, металлургии и металловедению, Российского фонда фундаментальных исследований, ИХТРЭМС КНЦ РАН и поддержке Правительства Мурманской обл., ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», АО «Апатит», ИХТЦ ООО «Русредмет: Технологии и оборудование» и компании ООО «Брукер».

В работе конференции приняли участие 165 специалистов, представляющих государственные органы Российской Федерации, промышленные холдинги и предприятия, научно-исследовательские и образовательные организации, в том числе вице-президент РАН и председатель Дальневосточного отделения РАН академик В. И. Сергиенко, председатель Научного совета РАН по металлургии и металловедению академик Л. И. Леонтьев, председатель Научного совета РАН по химической технологии академик А. И. Холькин, два иностранных участника – С. А. Ефремов, академик Казахской национальной академии естественных наук (г. Алматы, Республика Казахстан) и Е. В. Ребров, д.т.н., (Университет Уорвик, Великобритания). Свои доклады представили 22 зарубежных участника из 7 стран: Армении, Беларуси, Великобритании, Казахстана, Нидерландов, Португалии, Словакии. В конференции приняли участие 6 членов РАН, 36 докторов наук, 66 кандидатов наук, 38 инженерно-технических работников, 25 аспирантов и студентов. География участников конференции из России очень обширна: от Дальнего Востока до Северо-Запада.

Значительное число докладов, представленных на конференции, посвящено рациональному использованию минерально-сырьевой базы, научному обоснованию технологических схем переработки сырья, синтезу, изучению свойств и применения новых материалов. Большое внимание уделено использованию методов сорбции и экстракции для выделения, очистки и разделения соединений редких и цветных металлов, а также вопросам синтеза и изучения свойств сорбентов и экстрагентов. Обсуждены вопросы экологической безопасности и экономические проблемы комплексной переработки сырья.

Среди работ по переработке сырья рассмотрены варианты технологий, обоснованные не только на стадиях физико-химических исследований и лабораторных испытаний, но и прошедшие проверку до промышленного масштаба и рекомендуемые для внедрения.

Проблемы рационального использования природных ресурсов, синтеза новых функциональных материалов и их применения являются чрезвычайно сложными и объединяют усилия творческих коллективов различных институтов, университетов и предприятий России и других стран. Материалы конференции позволяют отметить наличие координации и интеграции исследований при решении приоритетных задач фундаментальных и прикладных отраслей наук. Организаторы конференции выражают надежду, что это послужит стимулом для дальнейшего развития комплексных междисциплинарных исследований от сырья и малоотходных технологий до высокотехнологичных продуктов, определяющих уровень развития промышленности.

Для иногородних участников конференции были организованы экскурсии в Музейно-выставочный центр АО «Апатит», в котором они ознакомились с уникальными природными богатствами Кольского п-ова, историей урбанизации края, а также с горнодобывающими и обогащающими производствами АО «Апатит» – крупнейшего в мире производителя апатитового концентрата. В Музее истории изучения и освоения Европейского Севера России

Международного культурного центра КНЦ РАН состоялось знакомство с экспозицией, рассказывающей об истории заселения Кольского полуострова, изучении жизни и быта коренных жителей Кольского края – саамов, становления науки на Кольском п-ове. Участники конференции посетили лаборатории ИХТРЭМС КНЦ РАН, в которых не только познакомились с научно-производственной базой, но и обсудили возможность проведения совместных интеграционных работ. Руководство Кольской горно-металлургической компании (г. Мончегорск) ознакомило гостей с новым производством высокочистого кобальта, реализованном по технологии, разработанной в ИХТРЭМС КНЦ РАН.

Вместе с тем в решении конференции была отмечена малая востребованность прикладных исследований и трудности практической реализации результатов, в том числе в связи с утратой ряда отраслевых институтов. Задачи восстановления и развития наукоемких отраслей с использованием результатов новейших работ ученых требуют государственных решений. Действующая в России система налогообложения не стимулирует собственников на внедрение новейших технологий, рациональное использование недр, вовлечение в эксплуатацию месторождений комплексного сырья.

#### **VII Конференция-школа молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых»**

*Горный институт КНЦ РАН, 18 ноября 2015 г.*

В рамках V Международной конференции «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее» Горный институт КНЦ РАН провел VII Конференцию-школу молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых».

Участники конференции – молодые ученые, аспиранты и специалисты Горного института КНЦ РАН, а также ОАО «Апатит» и ОАО «Ковдорский ГОК».

Заслушано три лекции ведущих научных сотрудников Горного института КНЦ РАН и 14 докладов молодых специалистов. Участники конференции-школы отметили, что в заслушанных докладах содержатся современные теоретические подходы и практические решения проблем.

Новый формат конференции вызвал большой интерес к ней со стороны как молодых сотрудников Горного института КНЦ РАН, так и специалистов горнодобывающих предприятий Мурманской обл.

**Годнева М. М. Химия подгруппы титана: фториды, фосфаты, фторофосфаты из водных сред** / М. М. Годнева; [отв. ред. А. И. Николаев]; Ин-т химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 222 с.

В монографии рассмотрено фазообразование во фторидно-фосфатных водных системах соединений подгруппы титана с разграничением полей их существования, установлением химического состава, строения и характеристик: кристаллооптических, рентгенометрических, термических, химических связей, морфологии кристаллов и рентгенолюминесцентных свойств. Проведено сопоставление всех выделенных к настоящему времени соединений, относящихся к фторофосфатометаллатам элементов подгруппы титана со щелочными катионами, что позволило произвести их систематику и прогнозировать возможность образования новых соединений.

Монография состоит из 5 глав, в которых рассмотрены фазообразование в 14 системах (по 2-3 разрезам в каждой), характеристика соединений, а также проведено их сопоставление и прогнозирование. Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

**Кузьбожев Э. Н. Прогнозирование и индикативное планирование структурной трансформации регионального экономического пространства: монография** / Э. Н. Кузьбожев, Е. А. Вербиненко, И. Ф. Мальцева. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 214 с.

Рассмотрены теоретические аспекты взаимодействия элементов экономических (производственных) систем в процессе индикативного планирования изменений в экономическом пространстве.

Издание адресовано научным работникам, аспирантам и специалистам в сфере государственного и муниципального управления.

**Литвинова Т. И. Органическое вещество почв побережий фьордов острова Западный Шпицберген** / Т. И. Литвинова, Г. М. Кашулина; под ред. чл.-корр. РАН В. К. Жирова. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 122 с.

В монографии представлены результаты исследования органического вещества почв побережий фьордов острова Западный Шпицберген, проведенного в 2004, 2007–2011 гг. Данная работа основана на обследовании около 30 разрезов, сформированных в различных ландшафтных условиях под сплошным растительным покровом. Для каждого разреза было сделано подробное морфологическое описание профиля, а также определен элементный и фракционный составы органического вещества в основных генетических горизонтах. Данные по составу гумуса были дополнены результатами определения гранулометрического и валового химического составов почвенных образцов, а также проективного покрытия основных групп растений в составе напочвенного покрова.

На основе полученных данных обследованные почвы были диагностированы как арктотундровые серогумусовые грубогумусные, которые характеризуются следующей системой горизонтов: O(AO)-AYao-AYaoC. Основными характерными чертами органического вещества обследованных почв являются: слабая дифференциация профиля по цвету; преобладающий аккумулятивный тип распределения гумуса; глубокая гумусированность профиля; относительно высокие для такой широты содержания органического вещества в горизонте AYao; значительное варьирование фракционного состава гумуса между разрезами.

**Повышение энергетической эффективности в региональной энергетике Мурманской области: сборник статей по материалам «ENES-2014».** М.: Изд-во «Перо», 2015. 40 с.

Сборник составлен по материалам регионального тура I Всероссийского конкурса реализованных проектов в области энергосбережения, повышения энергетической

эффективности и развития энергетики в Мурманской области III Международного форума «ENES-2014».

**Разработка технологий извлечения редкоземельных элементов при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения / Э. П. Локшин, О. А. Тареева; под ред. П. Б. Громова. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 268с.**

В монографии обобщены результаты выполненных во ФГБУН ИХТРЭМС КНЦ РАН исследований по извлечению редкоземельных элементов из промежуточных и отвальных продуктов сернокислотной переработки хибинского апатитового концентрата.

Научно обоснованы новые практически безотходные технологии получения нерадиоактивных карбонатных или гидроксидных концентратов редкоземельных элементов из фосфогипсов, получающихся при различных вариантах сернокислотной технологии (фосфополугидрата, фосфодигидрата), а также экстракционной фосфорной кислоты дигидратного процесса (продукционной и оборотной). Разработанные технические решения исключают образование требующих специальных методов обращения радиоактивных отходов.

Показано, что освоение производства редкоземельных элементов при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата обеспечит полное удовлетворение текущих и перспективных потребностей России в редкоземельной продукции, создаст потенциал для её экспорта, повысит комплексность и экономическую эффективность переработки апатитового концентрата, улучшит экологическую обстановку в районах деятельности предприятий, перерабатывающих апатитовый концентрат сернокислотным методом.

Издание предназначено для работников химической и металлургической промышленности, научных работников, предпринимателей, интересующихся проблемами получения редкоземельной продукции из минерального сырья, и будет полезно студентам высших учебных заведений, работающих и обучающихся по соответствующим направлениям.

**Север и рынок: формирование экономического порядка:** научно-информационный журнал. 2015. № 2 (45). Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 168 с.

**Север и рынок: формирование экономического порядка:** научно-информационный журнал. 2015. № 3 (46). Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 129 с.

**Север и рынок: формирование экономического порядка:** научно-информационный журнал. 2015. № 4 (47). Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 169 с.

**Труды КНЦ РАН.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. Вып. 6 (29). 211 с. (Информационные технологии).

**Труды КНЦ РАН.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. Вып. 1 (32). 169 с. (Гелиогеофизика).

**Труды КНЦ РАН.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. Вып. 8 (33). 202 с. (Гуманитарные исследования).

**Труды КНЦ РАН.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. Вып. 11 (34). 97 с. (Энергетика).

**Фокин В. А. Методические аспекты анализа технологической информации при производстве буровзрывных работ в условиях карьеров / В. А. Фокин; отв. ред. акад. Н. Н. Мельников; Горн. ин-т Кол. науч. центра РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 133 с.**

В монографии изложены методические аспекты анализа технологической информации при производстве буровзрывных работ в условиях карьеров: рассмотрены вопросы, связанные

с районированием карьера по взрываемости руд и пород месторождения, показаны особенности обработки и анализа результатов внутрискважинных и полигонных замеров скорости детонации взрывчатых веществ и последующей оценки уровня их фактического энерговыделения, особенности оценки и анализа гранулометрического состава взорванной горной массы и выявления зон нерегулируемого дробления, отражены различные аспекты использования результатов регулярных сейсмонаблюдений за массовыми взрывами в карьере не только для введения технологических ограничений на объёмы взрывания, но и для выявления неблагоприятных участков борта карьера с точки зрения долговременной устойчивости уступов, поставленных в конечное положение.

Цель книги – изложить основные методические положения, многократно проверенные на практике, и показать возможность (а главное, технологическую значимость) решения с их помощью различных вопросов в рамках буровзрывного комплекса.

Книга в основном предназначена для специалистов горнорудных предприятий, может представлять интерес и для специалистов научных институтов горного профиля.

**Physics of Auroral Phenomena: Proceedinds of the 38<sup>th</sup> Annual Seminar** (Apatity, 2–6 March 2015). Apatity: KSC of the RAS, 2015. 189 p.

**Physics of Auroral Phenomena of the 39<sup>th</sup> Annual Seminar: Abstracts** (Apatity, 26 February – 04 March 2016). Apatity: KSC of the RAS, 2016. 59 p.



### **ТКАЧЕНКО Вера Григорьевна**

ведущий технолог лаборатории № 32 Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН.

Жизнь у Веры Григорьевны не была простой: в послевоенные годы воспитывалась в детском доме, но всегда была трудолюбива и смогла получить высшее образование в

престижном университете. В 1964 г. окончила химический факультет (кафедра аналитической химии) Ленинградского университета и была направлена по распределению в Институт химии КФ АН СССР, где начала работу в аналитической лаборатории в должности старшего лаборанта, затем младшего научного сотрудника, ведущего технолога.

Вера Григорьевна – высококвалифицированный специалист в области химического анализа. Она принимала участие в аналитическом сопровождении испытаний сернокислотной технологии лопарита на Ловозерском ГОКе и в г. Силламяэ, Эстония. Занималась разработкой методов анализа и других минералов и продуктов их переработки, технологии которых создавались в ИХТРЭМС: апатита, перовскита, эвдиалита, титаномагнетита, сфена и т. д.

В коллективе института В. Г. Ткаченко пользуется заслуженным авторитетом благодаря многолетней высококвалифицированной, добросовестной работе и сохранению при этом исключительной скромности.

Поздравляем Веру Григорьевну с юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческих успехов, удачи во всех начинаниях.



### **ЖУРАВЛЕВА Нона Георгиевна**

д.б.н. (1997), профессор (2013), ведущий научный сотрудник лаборатории ихтиологии и физиологии Мурманского морского биологического института (1997). В Кольском научном центре с 1972 г.

Специалист в области эмбриологии рыб.

Наряду с разработкой фундаментальных вопросов морской биологии и экспериментальной эмбриологии развивает важные в народно-хозяйственном отношении работы по искусственному воспроизводству морских рыб. В течение длительного периода времени была руководителем темы «Биотехника воспроизводства морских рыб в полярных районах». Разработала концепцию развития марикультуры в условиях Заполярья и обосновала ее собственными широкомасштабными исследованиями. Принимала непосредственное участие в разработке биологического



*Юбилеи*



*Юбилеи*

обоснования по товарному выращиванию атлантического лосося в Печенгской губе Баренцева моря для совместного российско-норвежского предприятия. Имеет патенты на изобретения в области морской аквакультуры. Награждена бронзовыми медалями ВДНХ за разработку биологических основ разведения морской камбалы (1983) и трески (1987), а также почетными грамотами за работы, посвященные освоению природных ресурсов Севера. В настоящее время активно работает в совместных российско-норвежских проектах по совершенствованию условий выращивания перспективных объектов марикультуры. Участвовала в создании базовой кафедры биоэкологии в МГТУ в 1998 г. и до настоящего времени является ее руководителем. Награждена Почетной грамотой Роснауки (2010), Почетной грамотой РАН (1999), Почетной грамотой губернатора Мурманской обл. (2010), Почетной грамотой главы муниципального образования города Мурманска (2015).

Поздравляем Нону Георгиевну со славным юбилеем и желаем здоровья, бодрости, счастья и новых творческих успехов.



**БУСЫПРЕВ Владислав Михайлович**

д.т.н., ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН.

Трудовая деятельность началась после окончания Ленинградского горного института в качестве горного мастера на рудниках Дальстроя в 1951 г. В Горном институте КНЦ РАН работает со дня его основания, прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией, а с 1988 г. трудится в должности ведущего научного сотрудника. В 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1984 г. – докторскую.

Владислав Михайлович – известный специалист в области горного дела. За время работы в институте решил ряд фундаментальных и прикладных задач, направленных на повышение эффективности освоения месторождений.

Исследовал трудоемкость процессов добычи при разработке апатитовых месторождений, установил основные зависимости, определяющие её величину. Теоретическими и экспериментальными работами выявил и обосновал перспективные направления совершенствования систем разработки на слюдяных месторождениях, руководил широкомасштабными опытно-промышленными работами по их реализации на рудниках Мурманской обл., Карелии и Восточной Сибири, что привело к качественному улучшению технологии горных работ.

На основе предложенной им концепции учета стоимости запасов полезных ископаемых при экономической оценке результатов эксплуатации рудных месторождений разработал метод решения инженерных и нормативных задач недропользования, обеспечивающий соблюдение сбалансированности экономических интересов государства – владельца недр – и горнодобывающих предприятий.

Опубликовано 12 монографий, более 180 статей и методических рекомендаций.

Член ученого и диссертационного советов института. Ветеран Великой Отечественной войны. Награжден орденом «Знак Почета», 11 медалями, знаком «Шахтерская слава» II и III степеней, знаком «Горняцкая слава» I степени, многими грамотами.

Поздравляем Владислава Михайловича со славным юбилеем, желаем здоровья, счастья, новых творческих свершений на благо российской науки.



#### **КУРАНОВ Юрий Федорович**

к.э.н., ведущий научный сотрудник отдела экономики морской деятельности в Арктике ИЭП КНЦ РАН. В Институте экономических проблем КНЦ РАН с 1990 г.

Научная тематическая деятельность связана с исследованием структурных преобразований и воспроизводственных процессов в рыбопромышленном комплексе Северного бассейна, формированием конкурентоспособного производственного потенциала и структуры флота, развитием рыбообрабатывающей базы на основе адаптации к условиям состояния сырьевой базы и реализации региональных преимуществ как факторов устойчивого развития.

Юрий Федорович – ответственный исполнитель разделов темы: «Экономическое обоснование стратегии морской деятельности России в Арктике», «Концептуальные направления инновационного развития морехозяйственного комплекса Европейского Севера России». С 2013 г. разрабатывает отдельные направления комплексной научной темы «Научные и прикладные основы государственной политики функционирования ресурсно-сырьевой экономики на шельфе и в прибрежной зоне российской Арктики в условиях глобализации».

Участвовал в выполнении многих научных исследований по заказу организаций рыбного хозяйства Мурманской обл. Из последних работ можно назвать: «Значение институциональных нововведений в развитии рыболовства на



*Юбилей*



Юбилеи

Северном бассейне», 2013 г. (отв. исполнитель), «Разработка программных предложений по интеграционному развитию береговой рыбопереработки и промысловой деятельности на Северном бассейне», 2014 г. (научн. руководитель, отв. исполнитель), «Общее море, общие задачи. Сравнительный анализ рамочных условий рыбной отрасли России и Норвегии», 2015 г. (отв. исполнитель).

Результаты исследований опубликованы более чем в 120 научных статьях, в том числе в 3 монографиях.

В качестве консультанта и специалиста совместно с сотрудниками Администрации Мурманской обл., 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 участие в разработке итоговых и нормативно-законодательных документов.

Ведет преподавательскую деятельность (чтение лекций и руководство дипломными работами), член и председатель государственных аттестационных комиссий в институтах (филиалах) г. Мурманска, в том числе Мурманского государственного технического университета и Мурманского государственного педагогического института.

Поздравляем Юрия Федоровича со славным юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческих успехов, удачи во всех начинаниях.



#### **ПОЖИЛЕНКО Владимир Иванович**

к.г.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории региональной геологии и геофизики Геологического института КНЦ РАН, где работает с 1968 г.

Владимир Иванович окончил Осинниковский горный техникум и воронежский государственный университет, после окончания вуза работал в производственных геологических организациях Западной и Восточной Сибири. Прошел трудовой путь от препаратора до заведующего лабораторией. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Ранний докембрий Нотозерского района Кольского полуострова: особенности развития и структурной эволюции».

Научные интересы лежат в области региональной геологии, глубинного строения, тектоники и геодинамики Балтийского щита и Баренцевоморской плиты. Проводил научно-исследовательские работы в рамках тем ГИ КНЦ РАН по стратиграфии, тектонике, метаморфизму, геодинамике и т. д. на территории Мурманской области (Печенга, Центрально-Кольский блок, Нотозерский блок, Енский сегмент Северо-Западного Беломорья, Лапландский и Кандалакшский фрагменты Лапландского гранулитового пояса, структура Пана – Куоляярви и другие районы). Владимир Иванович – соавтор заявок на рудопроявления графита, марганца, на «кусты» керамических пегматитов и кварциты.

Итоги научной деятельности изложены в коллективных отчетах, в более чем 120 научных публикациях, в т.ч. в 10 коллективных монографиях. С 1997 г. Владимир Иванович вел большую преподавательскую работу, читал курс «Геологическое картирование и структурная геология» в АФ МГТУ и КФ ПетрГУ, был научным руководителем бакалавров и магистров, проводил учебные и производственные практики, разработал несколько учебных пособий. В настоящее время В. И. Пожиленко работает над проблемами региональной геологии Балтийского шита.

Поздравляем Владимира Ивановича со славным юбилеем и желаем здоровья, радости, бодрости и новых творческих успехов.



*Юбилеи*



### **ИВАНОВ Владимир Евгеньевич**

д.ф.-м.н. (1997), профессор, главный научный сотрудник Полярного геофизического института (2016), где работает с 1970 г. после окончания Ленинградского государственного университета. Прошел путь от старшего лаборанта до заместителя директора по научной работе (1990).

Свою работу в ПГИ Владимир Евгеньевич начал еще в студенческие годы в 1969 г. с первых поездок на полярные станции, со сбора материала и обработки данных съемки полярных сияний.

На сегодняшний день он – видный специалист в области взаимодействия электронных и протонно-водородных пучков с высокоширотной атмосферой Земли, опубликовал более 50 научных работ, в том числе 3 монографии. Разработанная им численная модель взаимодействия энергичных частиц с атмосферными газами является наиболее эффективной и, безусловно, признана как в России, так и за рубежом. Постоянный член ученого совета института, Владимир Евгеньевич много сил отдает развитию экспериментальной базы научных исследований.

По его инициативе и при непосредственном участии в институте создано новое поколение аппаратуры для регулярных геофизических наблюдений, соответствующих международному уровню, проводится модернизация геофизических обсерваторий, ведутся и развиваются геофизические наблюдения на арх. Шпицберген. Владимир Евгеньевич сам неоднократно участвовал в работе высокоширотных геофизических экспедиций.



Юбилеи

Свою энергию, знания и опыт Владимир Евгеньевич передает молодежи. Под его руководством и при его поддержке выросли три кандидата и один доктор физико-математических наук, подготовлены десятки молодых специалистов на руководимой им кафедре радиофизики и физики Земли Кольского филиала Петрозаводского государственного университета.

Поздравляем Владимира Евгеньевича со славным юбилеем, желаем крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов.

50



### **ИВАНЮК Григорий Юрьевич**

д.г.-м.н., заведующий лабораторией ГИ КНЦ РАН. В Геологическом институте КНЦ РАН с 1988 г.

Окончил Геологический факультет Ленинградского государственного университета в 1988 г., аспирантуру в 1991 г., а в 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Магнетит железистых кварцитов Кольского полуострова». Григорий Юрьевич – автор пионерных работ по самоорганизации минеральных систем, фрактальным геологическим средам, рудообразованию в метаморфических комплексах, щелочных и щелочно-ультраосновных массивах, их петрологии и минералогии. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Минералогия и петрология месторождений полосчатой железорудной формации Кольского полуострова». В настоящее время активно изучает закономерности образования нанопористых титаносиликатов в щелочных комплексах Кольского полуострова», совмещая работу в ГИ КНЦ РАН и Отделе исследований природных и синтетических нано- и микропористых веществ (Центр наноматериаловедения – ЦНМ) КНЦ РАН, проводит исследования для технолого-экономической оценки извлечения редкоземельных элементов на первоочередных объектах Кольского региона. Г. Ю. Иванюк – автор 7 книг и более 150 научных статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Он участвовал в открытии более 10 новых минеральных видов. За вклад в минералогию и петрологию метаморфических комплексов, щелочных и щелочно-ультраосновных массивов Международной минералогической ассоциацией в 2007 г. утверждены названия 4 новых минералов группы иванюкита. В феврале 2016 г. за многолетнюю плодотворную деятельность, большой вклад в укрепление научного и образовательного потенциала Мурманской обл. и в связи с 50-летием со дня рождения Г. Ю. Иванюк награжден Благодарностью губернатора Мурманской обл. М. В. Ковтун. Поздравляем Григория Юрьевича с юбилеем, желаем здоровья, счастья, новых творческих свершений на благо российской науки.



**Александр Шлемович Гершенкоп**

27.12.1940 – 27.01.2016

Горный институт Кольского научного центра РАН понес тяжелую утрату. 27 января скоропостижно скончался Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор Александр Шлемович Гершенкоп.

После окончания в 1963 г. Ленинградского горного института он до последних дней работал в Горном институте КНЦ РАН. Прошел путь от старшего лаборанта до заместителя директора по научной работе.

Александр Шлемович был известным специалистом в области обогащения полезных ископаемых. Под его руководством созданы новые технологии обогащения вермикулитовых, мусковитовых и флогопитовых руд. При его участии разработан проект фабрики по обогащению мелкоразмерных слюд.

На основании исследований, проведенных А. Ш. Гершенкопом в области физико-химических свойств минералов, разработана эффективная технология комплексного обогащения апатитонефелиновых руд. Им предложен ряд оригинальных технологических решений, внедренных в производство. Он внес значительный вклад в исследования, посвященные подготовке оборотных вод действующих горно-обогатительных предприятий, выдвинул новое научное положение об образовании открытых стационарных систем в технологиях переработки различных руд.

А. Ш. Гершенкоп являлся Лауреатом Премии Совета Министров СССР (1987), Заслуженным деятелем науки РФ (2007 г.). В 1994–2003 гг. отмечался государственной стипендией для выдающихся ученых России. Имеет ряд наград ВДНХ СССР. Автор более 400 публикаций, в том числе 6 монографий и 40 авторских свидетельств и патентов.

Действительный член АГН (1994 г.); член бюро Научного совета РАН по обогащению полезных ископаемых; член секции Наук о Земле экспертного совета ВАК; член ученого и диссертационного советов; председатель обогатительной секции ученого совета Горного института. Под его руководством подготовлены и защищены 5 кандидатских диссертаций и две докторские диссертации.

А. Ш. Гершенкоп награжден знаками «Отличник химической промышленности СССР», «Шахтерская слава» II и III степеней, «Горняцкая слава» I степени, грамотами РАН, губернатора Мурманской области.

А. Ш. Гершенкоп внес большой вклад в достижения института, оставив яркий след в истории Горного института и Кольского научного центра РАН.

Светлая память об Александре Шлемовиче Гершенкопе, талантливом ученом, доброй души Человеке, останется в сердцах всех, кто работал и общался с ним.

Выражаем глубокие соболезнования родным и близким покойного.



Научное издание

**ВЕСТНИК КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН**

**1/2016(24)**

**Требования к оформлению статей см.:**

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

Редактор А. С. Менделева  
Редактор Е. Н. Еремеева  
Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 21.03.2016.

Формат бумаги 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times/Cyrillic

Усл. печ. л. 17,43. Заказ № 10. Тираж 500 экз.

---

*Российская Академия Наук*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Кольский научный центр Российской академии наук  
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14