

*Российская Академия Наук*

# ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

2/2016



- Науки о земле:  
геология и минералогия
- Горное дело
- Физика моря
- Экология
- Энергетика
- Информатика
- конференции, семинары
- новые книги
- юбиляры
- ad memoriam

2/2016(25)

издается с декабря 2009 года  
ISSN 2307-5228

*Российская Академия Наук*

**ВЕЕСТНИК**

**Кольского научного центра РАН**

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Кольский научный центр РАН

---

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

Редационный совет:  
академик, 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	Последствия климатических изменений четвертичного периода в Кольском регионе (на примере поздневалдайского оледенения и голоцена)	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 2.....	19
Н. Е. Козлов, Н. О. Сорохтин, Е. В. Мартынов и др.	Особенности вещественного состава Кейвского домена (Кольский полуостров).....	30

**ГОРНОЕ ДЕЛО**

А. В. Архипов С. П. Решетняк	Особенности рекультивации породных отвалов на территориях Севера и Заполярья.....	39
А. И. Калашник Д. А. Максимов	О подходах к оценке сейсмического риска и районированию Кольского полуострова применительно к поверхностным линейно-протяженным объектам	44
С. В. Лукичев, А. Н. Любин, С. В. Звонарёва	Моделирование склона и снежного покрова для оценки лавинной опасности.....	52

**ФИЗИКА МОРЯ**

С. И. Бардан, Б. М. Долгоносков	Формирование слоистой структуры двухрастворной системы по автоматическому решению задачи о распределении примесей на границе раздела: ветви перемешивания.....	60
------------------------------------	--	----

**ЭКОЛОГИЯ**

В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин	Закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер восточной части Мурманской области бассейна Белого моря.....	83
------------------------------------	---	----

**ЭНЕРГЕТИКА**

Н. М. Кузнецов, А. М. Ключин, С. Н. Трибуналов	Управление энергоэффективностью и энергосбережением.....	97
Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий	Проблема обеспечения электробезопасности сетей среднего напряжения в условиях Кольского полуострова.....	103
А. Ф. Усов, М. Хи	Арктические перспективы электроимпульсного способа разрушения материалов и задачи их научно-технического обеспечения.....	111

**ИНФОРМАТИКА**

Д. А. Петрашова, А. В. Бурцев	Разработка базы данных по микроядерному тесту на клетках человека.....	124
	<b>КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ</b> .....	137
	<b>НОВЫЕ КНИГИ</b> .....	140
	<b>ЮБИЛЯРЫ</b> .....	142
	<b>AD MEMORIAM</b> .....	152

Редколлегия:

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

2/2016 (25)

Published since December 2009

ISSN 2307-5228

*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 RAS, Prof. G. G. Matishov;  
Academician RAS, Prof. N. N. Mel'nikov;  
Corr. Member RAS, Prof. V. K. Zhironov;  
Corr. Member 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.) I. 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 Science Centre 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 Y. Evzerov	Effects of Quaternary Climatic Changes in the Kola Region (Exemplified with the Late Valdai Glaciation and Holocene).....	5
Dmitry V. Zhiron, 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 2...	19
Nikolay E. Kozlov, Nikolay O. Sorokhtin, Evgeny V. Martynov et al.	Features of Material Composition of the Keivy Domain (the Kola Peninsula).....	30

**MINING SCIENCE**

Alfred V. Arkhipov, Sergey P. Reshetnyak	Features of Rock Dumps Remediation for Northern and Polar Regions of Russia.....	39
Anatolii I. Kalashnik, Dmitry A. Maksimov	On Approaches to Seismic Risk Assessment and Zoning of the Kola Peninsula in Relation to the Surface Linearly Extended Objects.....	44
Sergey V. Lukichev, Alexander N. Lyubin, Svetlana V. Zvonareva	Modeling of Snow Slope And Snow Cover to Assess Avalanche Hazard.....	52

**PHYSICS OF THE SEA**

Sergey I. Bardan, Boris M. Dolgonosov	Lamellar Structure Formation in Double Solution System for Admixture Distribution Objective Solution Near Borderline: Branches of Interfusion.....	60
--	--	----

**ECOLOGY**

Vladimir A. Dauvalter, Nikolai A. Kashulin	Regularities of Heavy Metals Distribution in Sediments of Lakes of Eastern Part of the Murmansk Region of the White Sea Basin .....	83
---	---	----

**ENERGETICS**

Nikolay M. Kuznetsov, Alexander M. Klyukin, Sergey N. Tribunalov	Management of Power Efficiency and Saving.....	97
<u>Yuriy M. Nevretdinov</u> , Galina P. Fastiy	The Problem of Providing Electrical Safety for Medium-Voltage Systems on the Kola Peninsula.....	103
Anatoly F. Usov, Mengbing He	Arctic Prospects of Electric Pulse Method for Materials Destruction and Tasks of their Scientific and Technical Support.....	111

**INFORMATICS**

Dina A. Petrashova, Anton V. Burtsev	Development of a Database for the Micronucleus Test upon Human Cells.....	124
---	---	-----

**CONFERENCES, WORKSHOPS** ..... 137

**NEW BOOKS** ..... 140

**ANNIVERSARIES** ..... 142

**AD MEMORIAM**..... 152

Editorial Board:

Ya. Fridman, Dr. Sci. (Eng.) – Editor-in-Chief; N. K. Belisheva, Dr. Sci. (Bio); P. B. Gromov, PhD (Eng.); V. E. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.); N. A. Kashulin, Dr. Sci. (Bio); A. A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.); P. R. Makarevich, Dr. Sci. (Bio); A. G. Olejnik, Dr. Sci. (Eng.); I. A. Razumova, Dr. Sci. (History); T. V. Rundkvist, PhD (Geol.); V. S. Selin, Dr. Sci. (Econ.); A. F. Usov, PhD (Eng.) – Executive Secretary

УДК 551.794.9+613 (470.21)

## ПОСЛЕДСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПЕРИОДА В КОЛЬСКОМ РЕГИОНЕ (НА ПРИМЕРЕ ПОЗДНЕВАЛДАЙСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ И ГОЛОЦЕНА)

**В. Я. Евзеров**

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

### Аннотация

На примере образований поздневалдайского оледенения показано, что быстрое освобождение ото льда территорий, занятых покровными ледниками, достигалось посредством ареальной дегляциации, вызванной межстадиальными потеплениями. В голоцене чередовались потепления и похолодания. Материалы изучения голоценовых осадков свидетельствуют о господстве в межледниковых условиях физического и физико-химического выветривания, незначительном снижении поверхности региона под влиянием эрозии, появлении горных ледников при похолоданиях и увеличении скорости осадконакопления в небольших озерах при потеплениях. В засушливые периоды формировались дюны. С увеличением влажности они зарастали, при ее последующих уменьшениях растительные покровы дюн частично разрушались.

### Ключевые слова:

*четвертичный период, климат, поздневалдайское оледенение, голоцен, Кольский регион.*

## EFFECTS OF QUATERNARY CLIMATIC CHANGES IN THE KOLA REGION (EXEMPLIFIED WITH THE LATE VALDAI GLACIATION AND HOLOCENE)

**Vladimir Y. Evzerov**

Geological Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

The Quaternary climatic changes led to repeated alternations of glaciations and interglacials. For a few tens of thousands years, the glaciations occupied extensive areas within the Eurasia and melted. The study of the Late Valdai glaciation formations showed that rapid deglaciation of the territory was achieved due to the interstadial warming. The latter resulted in separation of extensive peripheral ice masses from the main body of the active ice and the subsequent rapid melting of dead ice. During the Late Valdai glaciation deglaciation of the territory from the Kanin Peninsula to the foot of the Scandinavian mountains took only about 11 thousand years. Obviously, the areal deglaciation was typical of all older Quaternary glaciations, considering their short duration.

In the Holocene, which many researchers fairly consider as an analogue of the Interglacial, warmings and coolings took place as well. During the coolings mountain glaciers appeared. Throughout the entire period, when and soil formed, mainly frosty and physical-chemical weathering of crystalline rocks occurred. A weak manifestation of chemical weathering entailed a slight change in the relief due to the erosion. During the Holocene tundra vegetation of the Young Dryas gave way to forest-tundra and then to forest vegetation. During the coolings in the north and east of the region there was the tundra, changing to the south-west into forest-tundra, which, in turn, was replaced by the vegetation of the northern taiga. During the warming all vegetation zones shifted to the north-east, and the northern part of the region was occupied by the forest-tundra. In small lakes mineragenetic sediments gave way to organogenic ones with the warming. The warming resulted in to an increase of the lake bioproductivity and, as a rule, in a rise of the sediment accumulation rate. In dry periods dunes were formed; they overgrew with vegetation as the humidity increased. In subsequent droughts the dune vegetation covers were partly destroyed.

**Keywords:**

*the Quaternary, climate, the Late Valdai glaciation, the Holocene, Kola region.*



**Введение**

Кольский регион включает в себя территорию Мурманской обл. и прилегающие к ней шельфы Баренцева и Белого морей. В четвертичный период в Евразии 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.

В настоящее время в четвертичной геологии все стратиграфические схемы привязываются к «морским изотопным стадиям» (МИС), выделенным по результатам изучения фораминифер и соотношения в них изотопов кислорода. Всего в четвертичном периоде выделено 103 стадии, их общая продолжительность составляет около 2.6 млн лет, некоторые подразделяются на подстадии. Наиболее достоверны сведения о продолжительности последних 21 стадии [1]. Согласно этим данным, на оледенения максимально приходится до 60 тыс. лет, а на межледниковые периоды – чуть более 60. Покровные ледники занимали обширные пространства на Евразийском континенте, причем их распространение и исчезновение происходило в течение небольших отрезков времени. Близкую длительность имели и межледниковые периоды, в течение которых местами могли сохраняться только горные ледники.

Четвертичные отложения Кольского региона можно отнести только к последним 7 стадиям, охватывающим примерно 244 тыс. лет. За этот период ледниковые климатические обстановки, включающие межстадиальные потепления и стадийные похолодания, чередовались с межледниковыми. Последние имели место в МИС 7 (190–244)\* и подстадии 5e (11). В качестве аналога межледниковья, на наш взгляд, вполне обоснованно многие исследователи рассматривают голоцен (МИС 1), события которого можно реконструировать более или менее полно.

Покровные оледенения, охватывающие всю или почти всю территорию региона, имели место в МИС 6 (130–190), вероятно, в подстадии 5b (85–93) и в МИС 2 (11–24 или 14–29). Детально исследованы только отложения, соотнесенные с МИС 2. Более древние ледниковые образования встречаются крайне редко. Это обстоятельство не позволяет составить даже приближенное представление об их эволюции. Что касается межледниковых отложений, то в абсолютном большинстве местонахождений обнаружены и хорошо палеонтологически изучены только морские осадки. В общих чертах намечены тенденции развития растительности и эволюции бассейна Белого моря [2–5 и др.].

В дальнейшем изложении внимание сконцентрировано на материалах по ледниковым отложениям поздневалдайского покровного оледенения и по аналогу межледниковий – голоцену.

**Краткие сведения о современном климате региона**

Поскольку все климатические реконструкции основываются на сравнении климатов прошлого с климатом современным, целесообразно дать его общую характеристику, содержащуюся в работе Б. А. Яковлева [6]. Почти весь рассматриваемый регион расположен за полярным кругом и относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Зима здесь продолжается 5 месяцев (XI–III), весна – 2 (IV–V), лето – 3 (VI–VIII) и осень – 2 месяца (IX–X). Средняя годовая температура воздуха в большей части территории региона составляет -1 °С.

\* Здесь и далее в скобках указаны примерные возрасты «морских изотопных стадий» и подстадий в тысячах лет.

В горных районах она опускается до  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и поднимается выше нуля лишь на крайнем северо-западе и на побережье Кандалакшского залива. Зимой температура воздуха, как правило, изменяется в пределах от 0 до  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сильные морозы и оттепели одинаково редки. Летом наиболее низкая средняя температура ( $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) отмечается на побережьях Баренцева и Белого (частично) морей, а самая высокая ( $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – во внутренних областях региона. Весной и осенью влияние обоих морей становится несущественным. Влажность воздуха высока на протяжении большей части года. Она наиболее велика в горах и в восточной части п-ова, где для омывающего его моря характерна самая низкая температура поверхности воды.

Глубина сезонного промерзания песчаных и сухих грунтов в самые холодные зимы достигает 3–3.5 м, а влажных и плотных – менее 2 м. Многолетняя мерзлота отличается неустойчивостью и распространена в виде островков, которые большей частью приурочены к торфяным буграм. Наиболее благоприятен для ее сохранности северо-восток полуострова с его тундровой растительностью и маломощным снежным покровом вследствие сильных зимних ветров [7]. Систематическое как сезонное, так и суточное замерзание и оттаивание воды в сравнительно крупных трещинах и порах пород ведет к разрушению последних. Сведения о количестве дней в году, в течение которых происходят переходы температуры через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для большей части Кольского п-ова отсутствуют. В Хибинских тундрах, по данным метеостанции «Юкспор», такие переходы имеют место в течение 46 суток в год [8]. На большей части Кольского п-ова выпадает в год 400–450 мм осадков. Лишь в горных районах Хибинских и Ловозерских тундр оно возрастает до 600 мм в год и более. От 52 до 60 % осадков приходится на долю снега. Устойчивый снежный покров образуется в ноябре, а сходит в мае.

Имея представление о современном климате, обратимся к рассмотрению позднего плейстоцена и голоцена, который, как отмечалось, рассматривается в качестве аналога межледниковых эпох. Зональная стратиграфическая схема верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Северной Европы приведена в обстоятельной статье А. Ю. Шараповой [9]. Согласно этой схеме, в позднем плейстоцене выделяются\* ранний дриас, бёллинг (12 тыс. лет), средний дриас (11.8–12), аллерёд (11–11.8) и поздний дриас (10.3–11.0), а в голоцене – пребореальный (9.0–10.0), бореальный (8.2–9.0), атлантический (5.2–8.2), суббореальный (2.3–5.2) и субатлантический периоды.

### **Поздневалдайское оледенение**

Поздневалдайское оледенение (МИС 2) достигло максимального распространения в Кольском регионе около 20 тыс. лет назад. Его границы выделены по геологическим и геоморфологическим материалам [11–13]. Достаточно подробно выяснена зависимость характера деградации ледникового покрова от климатических изменений. Дегляциация территории протекала в условиях циклических вариаций климата разного ранга. Изменения климата установлены посредством детальных исследований различными методами ледниково-морских, пресноводных и глубоководных морских осадков [14, 15]. Каждая из вариаций продолжительностью от 0.5 до 2 тыс. лет включала в себя сравнительно быстрое потепление и последующее постепенное или ступенчатое похолодание.

По причине низкоградиентного характера поверхности ледника в периоды межстадиальных потеплений в Кольском регионе происходило отчленение от основного массива льда обширных периферических областей ледникового покрова [16]. В течение этих же периодов край динамически активного льда при благоприятных геоморфологических условиях контактировал с возникавшими или уже существовавшими в это время приледниковыми водными бассейнами. Высокая теплоемкость воды приводила к быстрому совмещению ледяного берега с линией нулевого баланса масс ледника и длительному сохранению его довольно

\* В скобках указан примерный возраст периодов бёллинга, среднего дриаса, аллерёда и позднего дриаса по [10], возраст остальных периодов – по А. Ю. Шараповой [9].

стабильного положения. Вследствие этого создавались условия для накопления у крутого ледяного берега мощных толщ флювиогляциальных осадков. Впоследствии, при полном освобождении территории ото льда, эти толщи проявлялись в рельефе в виде гряд насыпных краевых образований, так называемых маргинальных озов.

Край активного льда в Кольском регионе не удалялся сколько-нибудь значительно от области накопления предкраевых толщ флювиогляциальных осадков. Его отступление составляло менее 1 км [17, 18]. Незначительное проявление фронтальной дегляциации подтверждается отсутствием озерно-ледниковых осадков в основании всех изученных нами разрезов отложений озерных котловин центральной и восточной частей Кольского п-ова [18, 19]. Оно, несомненно, является следствием суровых климатических условий, в которых протекала дегляциация региона. В позднем валдае, на протяжении которого климат в окрестностях ледникового покрова повсеместно был холоднее современного [14, 20], на Кольском п-ове он, очевидно, отвечал наименее суровому арктическому. Во время стадийных похолоданий ледник, наступая, в той или иной степени деформировал гряды насыпных краевых образований, если таковые оказывались на пути перемещения льда. При максимальном распространении ледника в каждую из стадий он образовывал перед своим краем гряды напорных морен, если поверхность ледникового ложа была наклонена в направлении перемещения льда. Если же ложе было наклонено навстречу движению льда, то перед его краем возникало приледниковое озеро, и наряду с напорными грядами формировались флювиогляциальные дельты [18, 21].

В Кольском регионе в течение каждого межстадиально-стадиального климатического цикла у края активного льда создавался пояс маргинальных ледниковых образований, состоящий из двух полос краевых гряд – внутренней и внешней. Внешняя полоса, наиболее удаленная от центрально-ледниковой области, всегда возникала после внутренней [21, 22]. Расположение краевых поясов региона и некоторых других ледниковых образований, в основном отражающих направления движения льда в заключительные этапы эволюции Скандинавского ледникового щита, показано на рис. 1. Синей штриховкой на рис. 1 показана площадь периферического массива льда, отделившегося от активного ледника в бёллинге. В центральной части схемы\* замкнутые и полужамкнутые контуры, отражающие положение края льда в различные этапы эволюции ледника (условные обозначения 8 и 9), приурочены к Хибинскому (на западе) и Ловозерскому горным массивам.

За период деградации поздневалдайского ледникового покрова сформировалось три пояса краевых образований: I, II и III. Судя по результатам палеогеографических исследований, формирование пояса III происходило в связи с потеплением, имевшим место между 16.1 и 14.7 тыс. лет до настоящего времени (н. в.), и последующим похолоданием в интервале от ~14.7 до 13.4–12.9 тыс. лет до н. в. [14, 15, 22]. Образование маргинальных поясов II и I отвечает климатическим ритмам: бёллинг (около 13 тыс. лет до н. в.) – средний дриас (около 12.5 тыс. лет до н. в.) и аллерёд (примерно 11.8–11 тыс. лет до н. в.) – поздний дриас (~11–10 тыс. лет до н. в.) соответственно. Гряды внешней полосы пояса I есть непосредственное продолжение краевой зоны Тромсё – Линген Норвегии, имеющей возраст 10–11 тыс. лет до н. в. [26]. На образование гряд внешней полосы пояса II в период среднего дриаса указывают результаты датирования залежи озерно-ледниковых глин палеомагнитным методом [27, 28].

На заключительном этапе деградации поздневалдайского ледяного щита, охватывающем промежуток времени от позднего дриаса до начала бореала (около 9.5 тыс. лет назад), монолитное тело ледника было расчленено протяженными морскими заливами, и постепенно лед растаял. Его таяние продолжалось примерно 2 тыс. лет.

\* Схема составлена по материалам В. Рамзая [11], А. А. Полканова [23], М. А. Лавровой [2], А. А. Никонова [24], В. Я. Евзерова и Ю. Г. Самойловича [13], В. Я. Евзерова и С. Б. Николаевой [22], В. Я. Евзерова [25].

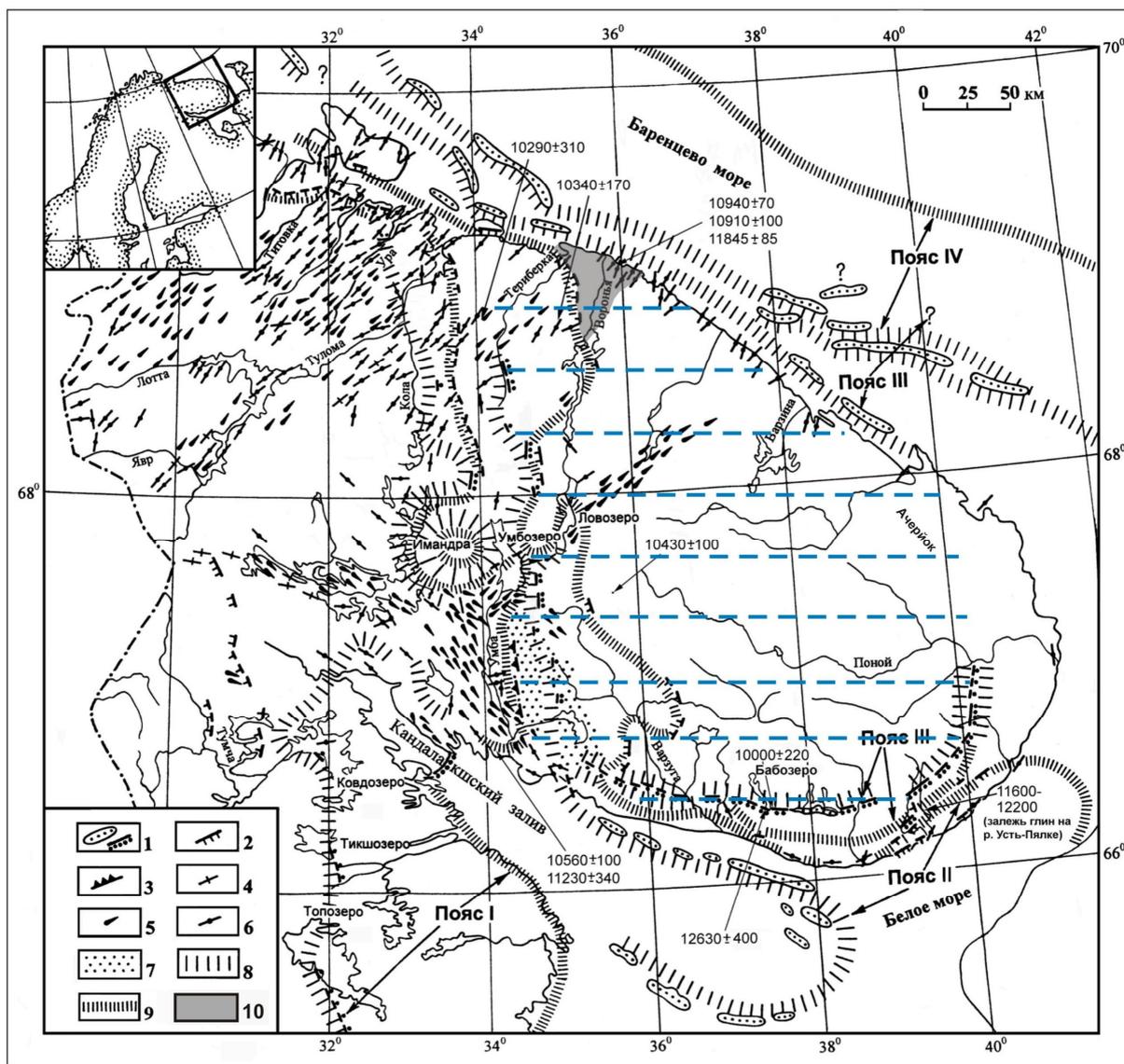


Рис. 1. Схема распространения ледниковых образований Кольского региона:  
 1 – гряда краевая и межлопастная напорно-насыпной морены; 2 – гряда напорной морены; 3 – маргинальный уступ; 4 – флюта; 5 – друмлины; 6 – ледниковый шрам; 7 – островная возвышенность; 8 – положение края ледника (или отдельной лопасти) при формировании насыпных конечно-моренных гряд внутренней полосы маргинального пояса в период межстадиального потепления; 9 – то же при образовании напорных конечно-моренных гряд внешней полосы маргинального пояса в период стадиального похолодания; 10 – территория распространения монолитного массива мертвого льда, сохранившегося ко времени ледниковой экспансии в среднем дриасе

Большой интерес представляет территория, в пределах которой располагался мертвый лед, отделившийся от основного массива льда в бёллинге (на рис. 1 она заштрихована). Основная масса мертвого льда в бёллинге же и стояла. В итоге освободились ото льда приустьевые участки рек, впадающих в Белое море, и котловины крупных озер, расположенных на юге. Накопление органики в оз. Бабозеро началось  $12630 \pm 400$  лет назад. Лесотундровая растительность с березой выросла здесь около 10 тыс. лет назад [29]. Что касается котловин малых озер, то они оставались заполненными льдом вплоть до следующего межстадиального потепления в аллерёде [19]. Ко времени реактивации покровного ледника в среднем дриасе небольшой монолитный массив

мертвого льда сохранился только в приустьевой части р. Вороньей (рис. 1). О дегляциации путем таяния мертвого льда свидетельствует отсутствие на всей упоминавшейся площади ленточных глин и кластогенных озерных алевритов, накапливающихся перед отложением органогенных образований. Эти осадки не были обнаружены ни в одной из большого количества разбуренных озерных котловин и ни в одном естественном обнажении. Отметим, что ранее Д. Шо, который детально изучил ледниковые отложения центральной Швеции, пришел к выводу о том, что дегляциация района, протекавшая в суровых климатических условиях, осуществлялась посредством таяния мертвого льда [30].

В 10 км к югу от основного ансамбля форм внешней полосы маргинального пояса II развита напорная моренная гряда, вытянутая вдоль берега Белого моря. Она сформировалась, вероятно, вследствие повторной, более слабой реактивации ледника. Следы этой реактивации установлены и в ряде других мест.

Во время оледенений огромные массы воды из океана аккумулировались на ограниченных пространствах материков. Под ледяной нагрузкой прогибалась земная кора и, несмотря на то, что уровень океана понижался, покрытые ледником территории континентов занимали более низкое положение по отношению к уровню Мирового океана, чем теперь. Поэтому при деградации ледников развивались гляциоэвстатические трансгрессии. Одна из таких трансгрессий началась в бёллинге и продолжалась в аллерёде при деградации рассмотренного выше поздневалдайского ледникового покрова. Еще одна трансгрессия проявилась в позднем дриасе в связи с возрастанием ледниковой нагрузки на ложе при похолодании. Подробные сведения об оледенениях и трансгрессиях в Кольском регионе приведены автором в [31, 32].

Изложенный материал позволяет составить достаточно полное представление о ходе дегляциации территории. Однако в нашем распоряжении нет данных, позволяющих расшифровать механизм активного этапа наступления ледникового покрова на территорию Евразийского континента и достаточно быстрого распространения льда на огромном пространстве. Уверенно можно говорить лишь о небольшой продолжительности этапа и быстром распространении ледника, поскольку и наступление ледника, и освобождение занятой им территории ото льда заняли максимально 15 тыс. лет [1].

### **Голоцен (аналог межледниковья)**

Климат региона в голоцене реконструировался различными методами. Его количественные характеристики восстанавливались по результатам изучения остатков хирономид, пыльцы и спор наземных растений [33, 34], а качественная оценка впервые дана по материалам исследования прибрежно-морских образований [35]. Мы сконцентрируем внимание на результатах, полученных на палеонтологической основе и приведенных на рис. 2. Анализ графиков показывает, что климат многократно изменялся: чередовались потепления и похолодания. Значительно больше изменений зафиксировано по палинологии, чем по материалам изучения хирономид [36]. Судя по графикам (рис. 2), наиболее значительное потепление имело место в атлантический период, несколько меньшее по амплитуде – в суббореале. Повышениям температур, как правило, сопутствовало и увеличение количества осадков.

Следствиями изменения климата в голоцене стало эпизодическое появление горных ледников, выветривание горных пород и почвообразование, частичное изменение рельефа региона, эволюция растительности и осадконакопления.

**Горные ледники.** На протяжении голоцена во время похолоданий в Хибинских тундрах неоднократно зарождались и исчезали горные ледники. На основе геолого-геоморфологических исследований К. М. Рябцева выделяет четыре стадии горного оледенения [37]. Первой из них отвечают, очевидно, конечные морены горных ледников в долинах рек Вудъяврйок и Поачвумйок. Последующая волна потепления, включающая климатический оптимум голоцена, привела к исчезновению горных ледников. В последние 4.5 тыс. лет ледники появлялись еще трижды: в суббореальный период – примерно 4.5–4 тыс. лет назад в субатлантике – около

2.5–2 тыс. лет назад и в малый ледниковый период, длившийся ориентировочно с середины XV до середины XIX вв. Все они практически не выходили за пределы цирков, и занимаемые ими площади сокращались во времени. Современное оледенение Хибин представлено четырьмя ледниками. Их площадь в 1960-е гг., по данным В. Ф. Перова, составляла от 15 до 30 тыс. м<sup>2</sup> при толщине льда до 30 м [38]. В настоящее время это оледенение эмбрионального типа, возникшее в малый ледниковый период, деградирует [39].

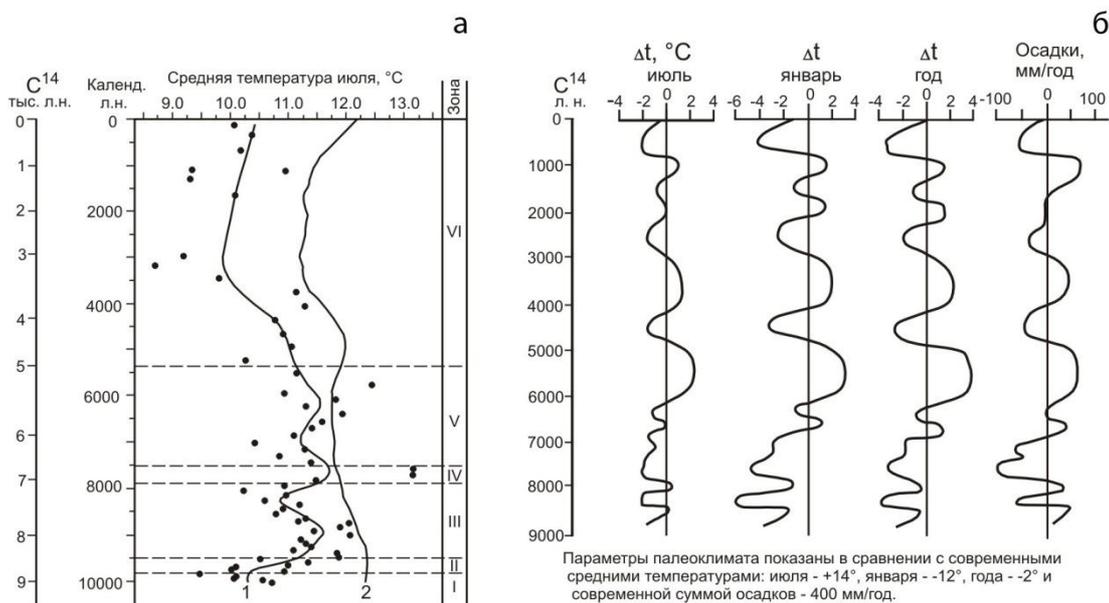


Рис. 2. Реконструкции климатических показателей голоцена по материалам изучения хирономид (А) и спорово-пыльцевых спектров (Б) [33, 34]: а – оз. Купальное в предгорьях Хибин (1) и оз. Беркут на Беломорском побережье Кольского п-ова (2); б – бугристое топяное болото севернее Ловозерских тундр (68° с. ш. и 35° в. д.)

В Ловозерском горном массиве выявлено три стадии развития горных ледников, отвечающие первым трем стадиям появления глетчеров в Хибинах. Вероятно, в малый ледниковый период глетчеры в Ловозерских тундрах не формировались вследствие меньшей высоты этих гор в сравнении с Хибинами [40].

**Выветривание и почвообразование.** При непосредственном воздействии агентов выветривания на горные породы в регионе формировались и продолжают формироваться элювий и почвы. Элювий залегает на платообразных вершинах гор и на широких и относительно ровных водораздельных пространствах. Он представлен щебнисто-дресвяно-мелкоземистым материалом мощностью обычно 1.5–2 м. В мелкоземе, содержание которого редко превышает 50 %, преобладают песчаные и алевритовые частицы. Учитывая суровые климатические условия, а также то, что около половины объема рыхлой массы элювия составляют грубые обломки, можно полагать, что дробление породы происходило главным образом под влиянием морозного выветривания. Имело место также физико-химическое выветривание минералов, на что указывает присутствие в мелкоземе алевритовых частиц. Содержание глинистой фракции составляет в среднем 3.15 %. Она представлена разнообразными смешанно-слоистыми образованиями, иллитом, хлоритом, вермикулитом, не разложенными алюмосиликатами и аморфным веществом, что свидетельствует о подчиненной роли химического выветривания при образовании даже мельчайших частиц. Происходило выщелачивание калия из слюд и магния из хлоритов [41].

Хороший показатель интенсивности процессов изменения – степень сохранности минералов, неустойчивых к агентам химического выветривания. В нефелиновых сиенитах это нефелин, арфведсонит и эгирин. Два последних минерала в голоцене разрушаются лишь частично. Что же касается нефелина, то он большей частью разлагается, давая начало опалу и гиббситу. Гиббсит и опал цементируют четвертичные отложения [42]. У южных склонов Ловозерского массива нефелиновых сиенитов, например, морена покровного оледенения настолько плотно сцементирована, что проходка шурфов без применения взрывчатых веществ оказалась невозможной. Сохранность в элювии таких минералов, как арфведсонит, эгирин и пироксены, свидетельствует о весьма незначительной роли химического выветривания в образовании элювия.

Минералы кристаллических пород наиболее энергично разрушаются при образовании широко распространенных в регионе подзолистых почв, благодаря низкому значению рН и высокому содержанию гуминовых кислот. В этих почвах полностью разлагаются темноцветные минералы, вследствие чего происходит обесцвечивание подзолистого горизонта, в котором в зависимости от состава пород сохраняются кварц и полевые шпаты. Как убедительно показал А. П. Афанасьев, каолинит в подзолистых почвах Кольского п-ова не синтезируется [41]. Во всех случаях находок этого минерала он унаследован от почвообразующих пород. В процессе формирования почвы в глинистой фракции увеличивается количество смектитового компонента [43]. Аналогичные данные получены для почв Норвегии [44]. Глинистые минералы почв представлены слоистыми силикатами: гидрослюдой, хлоритом, вермикулитом, монтмориллонитом и смешанно-слойными неупорядоченными образованиями, возникшими в результате трансформационных преобразований посредством выщелачивания слюд и хлоритов.

Таким образом, в целом процессы минералообразования при современном выветривании кристаллических пород на Балтийском щите заключаются в относительно слабых деградационных трансформациях слоистых силикатов с образованием минералов семейства монтмориллонитов (смектитов) и выпадением аморфных соединений железа, алюминия и кремния [45]. Этот процесс не претерпевал заметных изменений на протяжении четвертичного периода, о чем свидетельствуют данные табл. 1. Все имевшие место изменения в химическом и физико-химическом отношении не выходили за рамки деградационной трансформации слоистых силикатов и растворения наиболее неустойчивых минералов. Синтез каолинита в четвертичное время не происходил.

**Экзогенное рельефообразование.** К настоящему времени накопилось большое количество материалов, свидетельствующих о влиянии климата на экзогенное рельефообразование. Выявленные в последнее десятилетия зависимости относительно Кольского региона, систематизированные в работе А. П. Дедкова с соавторами [47], позволяют говорить о следующем. Непосредственно перед распространением льдов в пределы региона и в позднеледниковых условиях на больших площадях была распространена вечная мерзлота. В это время имело место избыточное увлажнение, вызванное низкой испаряемостью и слабым просачиванием воды в грунт, кроме того, был слабо развит растительный покров. Таким образом, в указанные периоды происходило выравнивание рельефа, господствовали склоновые процессы, подавлявшие деятельность рек. Ярко выраженная сезонность и кратковременность перемещения обломочного материала компенсировались высокой интенсивностью процессов.

По объему обломочного материала, транспортируемого реками, можно оценить интенсивность эрозии и масштаб преобразования рельефа за определенный промежуток времени. Модуль стока взвешенных наносов по семи бассейнам малых рек тундровой и лесотундровой зоны Балтийского щита составляет  $2.5 \text{ т/км}^2$  в год. Столь низкое значение модуля, по мнению А. П. Дедкова с соавторами [47], объясняется преобладанием в бассейнах скальных пород и большой озерностью региона. Если предположить, что эрозия с такой скоростью

протекала на протяжении всего четвертичного периода (около 2.5 млн лет), то поверхность региона понизилась бы в среднем примерно на 2.5 м. Эту показатель следует увеличить примерно в 10 раз. По оценкам многих исследователей (И. В. Старостина, Н. И. Маккавеева и др.), только около 10 % денудированного и переносимого с площади бассейна материала попадает в основные речные артерии. Кроме того, к полученному значению следует прибавить величину химической денудации. Модуль ионного стока для рек тундровой и лесотундровой зон составляет 7 т/км<sup>2</sup> в год [47], что отвечает понижению поверхности за весь четвертичный период приблизительно на 7.5 м. Таким образом, под влиянием механической и химической денудации поверхность снизилась бы максимум на 30 м. Это, конечно, слишком малая величина, чтобы можно было говорить о сколько-нибудь значительном изменении рельефа региона экзогенными процессами на протяжении каждого из межледниковий четвертичного периода. На наш взгляд, соотношение механической эрозии и химической денудации, а также малая величина модуля ионного стока являются следствием слабого проявления химического выветривания в регионе.

Таблица 1

Минеральный состав глинистой фракции четвертичных образований Кольского региона

Тип отложений, возраст	Глинистые минералы	Прочие минералы
Подзолистая почва	Неупорядоченные смешанно-слоистые образования, иллит, хлорит, вермикулит. Аморфные гидроокислы железа, алюминия (?)	Полевой шпат
Илы озерные и морские (голоцен)	Гидрослюда, хлорит, вермикулит, монтмориллонит, неупорядоченные смешанно-слоистые образования	Полевой шпат, амфибол
Элювий, делювий (голоцен, межледниковье)	Гидрослюда, хлорит, вермикулит, монтмориллонит, неупорядоченные смешанно-слоистые образования, аморфные вещества. В отдельных образцах каолинит	Полевой шпат, амфибол, кварц
Флювиогляциальные и ледниково-морские, озерно-ледниковые и озерные отложения (поздне- и послеледниковые)	Гидрослюда, хлорит, вермикулит, монтмориллонит, неупорядоченные смешанно-слоистые образования, редко примесь каолинита, аморфные вещества	Полевой шпат, амфибол
Морена поздневалдайского оледенения	Гидрослюда, хлорит, вермикулит, монтмориллонит	То же
Межледниковые прибрежно-морские отложения	Гидрослюда, хлорит, вермикулит, монтмориллонит, неупорядоченные смешанно-слоистые образования	Полевой шпат, амфибол, кварц
Морена московского (?) оледенения	Гидрослюда, хлорит, вермикулит, монтмориллонит. Часто примесь минералов коры выветривания	То же

*Примечание.* Составлено по [41] с добавлениями и корректурой автора [46].

**Развитие растительности.** Территории, освобождавшиеся ото льда, осваивались растительностью. В основу ее реконструкции положены результаты спорово-пыльцевого анализа материалов по Северной Фенноскандии [9]. Доминирующая пыльца и споры по этим данным показаны в табл. 2.

Таблица 2

Спорово-пыльцевые данные по позднеплейстоцен-голоценовым отложениям  
Северной Фенноскандии (по [9])

Периоды позднего плейстоцена-голоцена	Доминирующая пыльца и споры
Субатлантический	<i>Picea obovata</i> Ledeb (ель сибирская) и споры <i>Sphagnum sp.</i> (сфагнум или торфяной мох)
Суббореальный	<i>Pinus sylvestris</i> L. и <i>Betula spp</i>
Атлантический	<i>Pinus sylvestris</i> L. (сосна обыкновенная), <i>Alnus sp.</i> (ольха)
Бореальный	<i>Betula spp.</i> и споры рода <i>Lycopodium</i> (плаун)
Пребореальный	<i>Betula spp.</i> (береза), Ericales (верескоцветные)
Поздний дриас	<i>Oxyria sp.</i> (кисличник) и <i>Artemisia sp.</i> (полынь)

Из данных табл. 2 следует, что тундровая растительность позднего дриаса сменяется лесотундровой и затем лесной. В Кольском регионе раньше всего растительность появилась на юге полуострова.

Миграция растительных зон во времени охарактеризована в работе [48], в которой содержатся схемы палеорастительности всей площади региона по нескольким временным срезам в интервале от 10.5 до 1.2 тыс. лет назад. Наиболее интересные из них показаны на рис. 3. Как видим на схеме, отвечающей похолоданию (рис. 3А), на севере и северо-востоке региона значительную площадь занимала тундровая растительность, сменяющаяся в юго-западном направлении сначала лесотундрой, а затем северной тайгой. Во время потепления около 6 тыс. лет назад растительные зоны значительно сместились к северо-востоку (рис. 3Б). При этом исчезла полоса тундры, несколько сократилась площадь лесотундры, значительно увеличилась площадь распространения северной тайги. В суббореальное и субатлантическое время растительные зоны занимали примерно те же позиции, что и 8.5 тыс. лет назад.

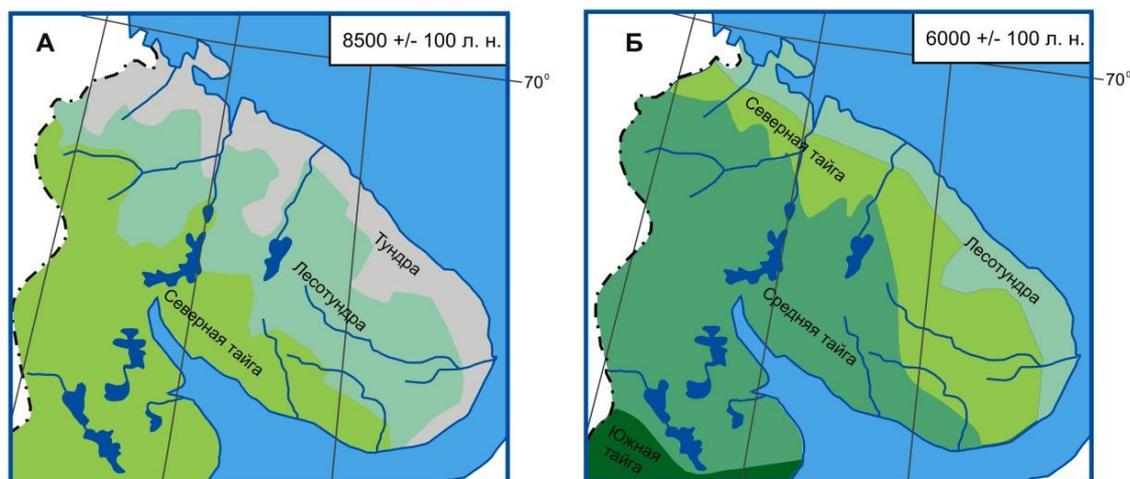


Рис. 3. Схемы распространения растительности в Кольском регионе в бореальный (А) и атлантический (Б) периоды. Приводится по [48]

**Осадконакопление.** В периоды дегляциации по мере освобождения от ледяного покрытия прибрежных районов континентов в их пределы проникали морские трансгрессии вследствие того, что поверхность континента, прогнувшаяся под нагрузкой ледникового покрова, оказалась

ниже уровня океана, несмотря на значительное понижение уровня океана в периоды, соответствующие по времени оледенениям [31].

Судя по карте четвертичных отложений Финляндии и Северо-Запада Российской Федерации [49], из голоценовых отложений наиболее распространен элювий. Он развит на различных типах кристаллических пород в пределах территорий, где отсутствует сплошной покров ледниковых образований. Особенно значительные площади элювий занимает в восточной части региона и на крупных горных сооружениях. Его формирование в связи с климатом голоцена рассмотрено в разделе «Выветривание и почвообразование».

Существенно меньшие площади занимают торфяники, причем на карте Кольского региона, в отличие от территории соседней Финляндии, показаны не все торфяники, а только наиболее крупные из них. В тундровой зоне региона на долю торфяных болот приходится всего 10–20 %, тогда как в таежной зоне – от 20 до 70 % площади [50]. Палеонтологическими исследованиями охвачены пока лишь торфяники западной части региона. Судя по имеющимся данным, в районе села Ловозеро торфяники начали накапливаться около 7.5 тыс. лет назад (датировка  $7490 \pm 120$  лет назад), несколько раньше они появились в нижнем течении р. Варзуги (датировка  $8560 \pm 100$  лет назад) [48]. Скорость нарастания торфа, как и начало торфообразования, зависит от климата и изменялась на протяжении голоцена. Средние скорости нарастания торфа рассчитаны автором настоящей статьи по данным работ [48, 50]. Они составили в тундре 0.2–0.3 мм/год, в лесотундре – от 0.15 до 0.4 мм/год и в тайге – от 0.1 до 0.76 мм/год.

Следующими по площадям распространения являются озерные осадки. Наиболее детально осадкообразование изучено в небольших озерах, в которых были обнаружены сапропели, в том числе диатомиты. Достаточно подробные сведения об упомянутых осадках приведены в монографии [51]. В регулировании развития водоемов высоких широт один из основных факторов – температура. Именно она определяет продолжительность периода открытой воды и динамику продукционных процессов. Обычно вследствие повышения температуры увеличивается скорость накопления осадков [52].

На очень ограниченных площадях развиты отложения горных склонов и рек. К этой же группе следует отнести и отложения, возникавшие в периоды похолоданий горных ледников, и эоловые осадки. Последние развиты в основном на морских побережьях и побережьях крупных озер. Они формировались в засушливые периоды при переотложении ветром песка из прибрежно-морских и флювиогляциальных отложений. По мере возрастания влажности дюны зарастали. Новое снижение влажности влекло за собой разрушение растительного покрова и образование котловин выдувания. В разрезах котловин часто наблюдается несколько горизонтов почв, разделенных песками. Это явное свидетельство чередования в голоцене периодов засушливого и влажного климата.

По завершении описания голоцена целесообразно упомянуть о более древних межледниковьях Кольского региона. Для микулинского времени характер изменения тепло- и влагообеспеченности был, очевидно, подобен таковому в течение голоцена. Это достаточно убедительно показано в [36]. Материалы по Кольскому п-ову [2, 53] и более южным районам [54–56 и др.] свидетельствуют о том, что климат микулинского межледниковья был несколько теплее и океаничнее голоценового. Средняя температура июля мелководий Белого моря у северо-восточного побережья Кольского п-ова, например, на протяжении регрессии межледникового моря практически не изменялась и была выше современной примерно на 10 °С [57]. Еще более теплым и океаничным был, вероятно, климат предшествующей межледниковой эпохи, соотносимой с МИС 7.

## **Заключение**

Для четвертичного периода продолжительностью около 6 млн лет характерны ритмичные колебания климата, следствием которых явилось чередование оледенений и межледниковий. Покровные оледенения, продолжавшиеся десятки тысяч лет, успевали за это время занять

большие площади на севере Евразийского континента и растаять. В нашем распоряжении нет достаточного количества материала для реконструкции механизма распространения этих ледников. Что же касается дегляциации территорий, то, судя по результатам изучения образований поздневалдайского ледникового покрова, она осуществлялась посредством отделения крупных периферических массивов мертвого льда от активного ледника в результате межстадиальных потеплений и достаточно быстрого стаивания мертвого льда. В целом, в период позднего валдая, например, дегляциация огромного пространства от п-ова Канина до подножий Скандинавских гор совершилась в течение всего лишь примерно 11 тыс. лет. Можно полагать, что деградация более древних ледников, имеется в виду кратковременность их существования, происходила подобным же образом.

По мере стаивания льда в различных по размерам и форме понижениях рельефа возникали озера. В них сначала накапливались минеральные, а затем, после появления растительности, органогенные осадки, так называемые гиттии, включающие и диатомиты. Начиналось формирование элювия и почв в основном под влиянием физического и физико-химического выветривания. Химическое выветривание проявлялось слабо, ограничиваясь частичным разрушением минералов, наиболее неустойчивых к процессам выветривания. Синтез двухслойных силикатов типа каолинита не имел места. Аналогичным образом выветривались породы и в периоды более древних межледниковий, хотя некоторые из них характеризовались более благоприятным для химического выветривания климатом, чем голоцен. Следствием слабого развития химического выветривания стало незначительное изменение рельефа за счет эрозии. На территорию оледенения в процессе потепления проникала сначала тундровая, затем лесотундровая и, наконец, лесная растительность. Колебания климата вызывали миграцию растительных зон в северо-восточном направлении при потеплениях и в юго-западном – при похолоданиях. Во время похолоданий в голоцене неоднократно появлялись горные ледники, а во время потеплений, как правило, возрастала скорость накопления осадков в небольших озерах. В голоцене изменялась не только температура, но и влажность. О чередовании засушливых и влажных периодов свидетельствует прослой почв в толще эоловых песков, слагающих дюны на побережьях крупных озер и морей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Marine isotope stage. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Marine\\_isotope\\_stage](http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_isotope_stage)
2. Лаэрова М. А. Четвертичная геология Кольского полуострова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 233 с.
3. Микулинское межледниковье на юго-востоке Кольского полуострова / М. К. Граеве [и др.] // Основные проблемы геоморфологии и стратиграфии антропогена Кольского п-ова. Л.: Наука, 1969. С. 25–56.
4. Гудина В. И., Евзеров В. Я. Стратиграфия и фораминиферы верхнего плейстоцена Кольского полуострова. Новосибирск: Наука, 1973. 146 с.
5. Стратиграфия плейстоценовых отложений южной части Кольского полуострова / В. Я. Евзеров [и др.] // Геология плейстоцена северо-запада СССР. Апатиты: КФАН СССР, 1981. С. 97–107.
6. Яковлев Б. А. Климат Мурманской области. Мурманск: Кн. изд-во, 1961. 200 с.
7. Баранов И. Я. Особенности вечной мерзлоты Кольского полуострова // Труды Ин-та мерзлотоведения. 1953. Т. XIII. С. 5–107.
8. Арманд А. Д. Развитие рельефа Хибин и прихибинской равнины. Деп. № 32–64. Апатиты, 1964. 244 с.
9. Шаралова А. Ю. Зональная стратиграфическая схема верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Северной Европы // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2005. Вып. 1. С. 103–105.
10. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification / J. Mangerud [et al.] // Boreas. 1974. No. 3. P. 109–128.
11. Ramsay W. Über die Geologische Entwicklung der Halbinsel Kola in der Quartarzeit // Fennia. Helsingfors. 1898. Vol. 16, No. 1. 151 p.
12. Ramsay W. Beiträge zur Geologie der recenten und pleistocänen Bildungen der Halbinsel Kanin // Fennia. 1904. 21, No. 7. P. 1–67.
13. Евзеров В. Я. Самойлович Ю. Г. Реконструкция северо-восточной краевой области скандинавского ледникового покрова в поздневалдайское время // Геоморфология. 1998. No. 4. С. 65–70.
14. Alm T., Vorren K.-D. Climate and plants during the last ice age // Plant life / University of Tromsø; Tromsø Museum. Tromsø, 1993. P. 4–7.
15. Lehman S. J., Keigwin L. D. Sudden changes in North Atlantic circulation during the last deglaciation // Nature. 1992. Vol. 356. P. 757–762.
16. Yevzerov V. Ya. Deglaciation of the Kola Peninsula and the Belomorian depression // Abstract of Second Quaternary Environment of the Eurasian North (QUEEN): workshop (Saint Peterburg, Russia, 5–8 February, 1998). Saint Peterburg. 1998. P. 55.
17. Евзеров В. Я. Специфика формирования маргинальных гряд поздневалдайского ледникового покрова в условиях арктического климата // Геоморфология. 1996. № 2. С. 64–71.
18. Eastern Fennoscandian Younger Dryas end moraines and deglaciation // Excursion guide / ed. V. Ya. Yevzerov. Apatity, 1993. P. 1–66.
19. Евзеров В. Я. Хомутова В. И., Мёллер Я. Ё. Развитие последнего покровного оледенения в восточной части Кольского полуострова (по результатам изучения отложений озерных котловин) // История плейстоценовых

озер Восточно-Европейской равнины. СПб.: Наука, 1997. С. 60–69. **20.** Behre K.-E. Biostratigraphy of the last glacial period in Europe // *Quaternary Science Reviews*. 1989. Vol. 8. P. 25–44. **21.** Евзеров В. Я. Маргинальные образования одной из стадий поздневалдайского оледенения на Кольском полуострове и в северной части Беломорской котловины // Докл. РАН. 1996. Т. 348, № 5. С. 681–682. **22.** Евзеров В. Я., Николаева С. Б. Пояса краевых ледниковых образований Кольского региона // *Геоморфология*. 2000. № 1. С. 61–73. **23.** Полканов А. А. Очерк четвертичной геологии северо-западной части Кольского полуострова // Труды Советской секции Междунар. ассоциации по изучению четвертичного периода (INQUA). 1937. Вып. 3. С. 63–80. **24.** Никонов А. А. Развитие рельефа и палеогеография антропогена на западе Кольского полуострова. Л.: Наука, 1964. 181 с. **25.** Евзеров В. Я. Строение и формирование внешней полосы одного из поясов краевых образований поздневалдайского ледникового покрова в Кольском регионе // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2015. № 4. С. 5–12. **26.** Andersen B. G. The deglaciation of Norway 15000–10000 B.P. // *Boreas*. 1979. Vol. 8. P. 79–87. **27.** Бахмутов В. Г., Евзеров В. Я., Колька В. В. Литология и палеомагнетизм поздневалдайских отложений Усть-Пялковского приледникового озера // *Геофиз. журн.* 1992. Т. 14, № 6. С. 62–74. **28.** Bakmutov V. G., Yevzerov V. Ya., Kolka V. V. Paleomagnetism and lithology of Late Weichselian deposits in Ust-Pjalka's periglacial lake, south-east of the Kola Peninsula // *Geologica Carpathica*. 1993. Vol. 44, No. 5. P. 315–324. **29.** Kremenetski C. V., Patyk-Kara N. G. Holocene vegetation dynamics of the southeast Kola Peninsula, Russia // *The Holocene*. 1997. Vol. 7(4). P. 473–479. **30.** Shaw J. Genesis of the Sveg tills and Rogen moraines of the central Sweden // *Boreas*. 1979. Vol. 8, No. 4. P. 406–426. **31.** Евзеров В. Я. Позднеплейстоцен-голоценовые трансгрессии на побережьях Мурмана и Белого моря // *Геоморфология*. 2012. № 4. С. 53–64. **32.** Евзеров В. Я. Оледенения и морские трансгрессии на северо-западе России в последние 140 тысяч лет // *Геоморфология*. 2014. № 3. С. 51–62. **33.** Растительность и климатохронология голоцена Ловозерской равнины Кольского полуострова (по спорово-пыльцевым диаграммам бургристо-топяного болота) / Г. А. Елина [и др.] // *Ботанический журнал*. 1995. Т. 80, № 3. С. 1–16. **34.** Ильешук Б. П., Ильешук Е. А., Хаммарлунд Д. Изменения климата в предгорьях Хибин, Кольский полуостров, на протяжении голоцена // Бюлл. комм. по изуч. четвертич. периода. 2007. № 67. С. 85–96. **35.** Holocene raised-beach ridges and sea-ice-pushed boulders on the Kola Peninsula: indicators of climatic change / J. J. Møller [et al.] // *The Holocene*. 2002. Vol. 12, No. 2. P. 169–176. **36.** Хотинский Н. А. Голоцен северной Евразии. М.: Наука, 1977. 199 с. **37.** Рябцева К. М. Динамика оледенения Хибин в голоцене в связи с ритмами увлажнения Северного полушария // Ритмы и цикличность в природе // *Вопросы географии: сб.* 79. М.: Мысль, 1970. С. 105–120. **38.** Перов В. Ф. Снежники, ледники и мерзлотный рельеф Хибинских гор // *Гляциология*. М.: Наука, 1968. № 22. 119 с. **39.** Зюзин Ю. Л. Суровый лик Хибин. Мурманск, 2006. 235 с. **40.** Евзеров В. Я. Позднеплейстоценовые и голоценовые оледенения в районе Ловозерских тундр на Кольском полуострове // *Известия РГО*. 2010. Т. 142, вып. 4. С. 65–80. **41.** Афанасьев А. П. Фанерозойские коры выветривания Балтийского щита и связанные с ними полезные ископаемые. Л.: Наука, 1977. 244 с. **42.** Арманд А. Д., Евзеров В. Я. О некоторых континентальных отложениях Кольского полуострова и вторичных изменениях в их строении // *Рельеф и геологическое строение осадочного покрова Кольского полуострова*. М.;Л.: Наука, 1964. С. 87–110. **43.** Градусов Б. П. Размещение типов изменений смешанно-слоистых образований в почвообразующих породах и почвах СССР // *Литология и полезные ископаемые*. 1974, № 2. С. 78–87. **44.** Kappo V. S. Weathering of micaceous clays in some Norwegian podzols // *Clay Minerals*. 1972. Vol. 9. P. 383–394. **45.** Черняховский А. Г., Градусов Б. П., Чижикова Н. П. Типизация, генезис и география современных кор выветривания // *Литология и полезные ископаемые*. 1973. № 2. С. 47–63. **46.** Евзеров В. Я. О характере выветривания горных пород Кольского полуострова в антропогене // *Вопросы формирования рельефа и рыхлого покрова Кольского полуострова*. Л.: Наука, 1971. С. 121–130. **47.** Климатическая геоморфология денудационных равнин / А. П. Дедков [и др.]. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1977. 224 с. **48.** Елина Г. А., Лукашов А. Д., Юрковская Т. К. Позднеледниковье и голоцен восточной Фенноскандии (палеорастительность и палеогеография). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 242 с. **49.** Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. Quaternary deposits of Finland and Northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1:1 000 000. Espoo: Geological Survey of Finland. 1993. **50.** Болота Кольского полуострова / Елина Г. А. [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. 2005. Вып. 8. С. 94–111. **51.** Евзеров В. Я. Минералогия рыхлого покрова северо-восточной части Балтийского щита. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014. 255 с. **52.** Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. Герцена, 2009. 343 с. **53.** Евзеров В. Я., Лебедева Р. М., Каган Л. Я. Этап расчленения, абразии и аккумуляции (средневалдайское (?) межледниковье) // *История формирования рельефа и рыхлых отложений северо-восточной части Балтийского щита*. Л.: Наука, 1976. С. 51–76. **54.** Гричук В. П. Основные черты истории растительности Русской равнины в четвертичном периоде // *Современные проблемы географии. Научные сообщения советских географов по программе XX Междунар. геогр. конгресса*. М.: Наука, 1964. С. 201–207. **55.** Марков К. К., Лазуков Г. И., Николаев В. А. Четвертичный период. М.: Изд-во МГУ, 1965. Т. 1. 371 с.; Т. 2. 435 с. **56.** Марков К. К., Величко А. А. Четвертичный период. Т. 3: Материки и океаны. М.: Недра, 1967. 440 с. **57.** Евзеров В. Я. Опыт применения геохимических методов определения палеосолености и палеотемператур к изучению четвертичных отложений Кольского региона // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17, № 2. С. 279–285.

### Сведения об авторе

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

**Author Affiliation**

*Vladimir Y. Evzerov* – Dr. Sci. (Geol.), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS  
E-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Евзеров В. Я.* Последствия климатических изменений четвертичного периода в Кольском регионе (на примере поздневалдайского оледенения и голоцена) / *В. Я. Евзеров* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2. – С. 5–18.

**Reference**

*Evzerov V. Ya.* Effects of Quaternary Climatic Changes in the Kola Region (Exemplified with the Late Valdai Glaciation and Holocene) / *V. Ya. Evzerov* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2. – P. 5–18.

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 2**

**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**

Вторая часть статьи описывает основные черты напряженно-деформированного состояния Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд (карьера рудника «Железный») и методические аспекты инженерно-геологических и геомеханических исследований в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров. Выполненные междисциплинарные изыскания 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 2**

**Dmitry V. Zhiron, Galina S. Melikhova, Vadim V. Rybin, Victor A. Soharev, Sergey A. Klimov**

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

<sup>2</sup>"MGRE" Stock Company

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

<sup>4</sup>"Kovdorsky GOK" Stock Company

**Abstract**

The second part of the paper describes main features of the stress-strain state for the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit (Kovdor ultramafic-alkaline intrusion, NE of the Fennoscandian shield) and procedural aspects of geotechnical and geomechanical studies aimed at design and mining of deep open pits. The 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

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

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, deposit, faults, fissuring.*

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

Для моделирования и прогнозирования опасных геофизических явлений, а также проектирования и безопасной эксплуатации месторождений необходимо знать параметры НДС массива пород, включая его абсолютные величины, ориентацию в пространстве главных осей и иерархию локальных флуктуаций – возмущений. Необходимо отметить, что практически все методы определения современного состояния НДС имеют дело с геомеханическим пространством рудника – измененной геологической средой, в которой исходное поле напряжений преобразовано в результате техногенного воздействия [1]. Соответственно, НДС в этом пространстве не тождественно таковому в геологической среде до начала отработки или за пределами зоны техногенного влияния. В то же время для любого метода численного моделирования, проектирования и прогноза в качестве граничных условий необходимы максимально достоверные и точные параметры исходного (неизмененного) современного НДС (региональной компоненты). Таким образом, остро встает вопрос о получении адекватной информации о пространственном положении и абсолютных значениях главных компонент (осей) современного регионального поля напряжений геологической среды и его флуктуациях, обусловленных природными структурными неоднородностями. Помочь этому призваны реконструкции палео- и современных (последних этапов) стресс-состояний по результатам анализа катакластических разрушений – трещиноватости и разрывной тектонике, которые, по сути, являются фактографической летописью эволюции предельных состояний НДС [2]. Такая реконструкция была выполнена для КММА (рис. 1).

Для реконструкции упомянутых тектонических напряжений массива пород КММА применялись и сопоставлялись результаты, полученные по следующим методам: сопряженных сколовых систем трещин М. В. Гзовского с модификациями [3], поясов В. Н. Даниловича – С. И. Шермана [4, 5], кинематическому методу О. И. Гущенко – Л. А. Сим [2, 6] и катакластического анализа Ю. Л. Ребецкого [7]. Результат считался кондиционным при условии его непротиворечивости данным геологии и результатам, полученным другими основными методами исследований, в том числе замерам параметров (НДС) методом разгрузки [8, 9] и деформационных наблюдений посредством нивелирования и светодальномерных измерений [8–10]. Восстановленное с учетом всех исходных данных современное положение  $\delta_3$  – субгоризонтальное с простиранием по азимуту  $285\text{--}295^\circ/105\text{--}115^\circ$ , что согласуется с гипотезой генерации регионального поля за счет рифтогенеза в Северной Атлантике [11].

Согласно выполненной реконструкции, начало первого и наиболее интенсивного этапа (А) синхронно внедрению рудно-карбонатитового штока. Для него характерна очень интенсивная тектоническая проработка вмещающего массива пород с весьма изменчивыми во времени и пространстве полями напряжений. Помимо этого этапа тектогенеза с образованием парагенезиса прототектонической трещиноватости, было восстановлено минимум три стресс-состояния со следующей последовательной сменой (транспозицией) положения главных осей: 1)  $\delta_3$  (максимальное сжимающее) – субгоризонтальное со склонением в  $5\text{--}10^\circ$  на ЮЮЗ,  $\delta_1$  (минимальное) – субгоризонтальное с небольшим (в  $10\text{--}15^\circ$ ) склонением в направлении ВЮВ; 2)  $\delta_3$  – слабонаклонное со склонением в  $25\text{--}30^\circ$  на ЮВ,  $\delta_1$  – субвертикальное со склонением

под углом 65–70° на СЗ; 3)  $\delta_3$  – слабонаклонное со склонением в 30–25° на ВЮВ,  $\delta_1$  – субгоризонтальное с простиранием ЮЮЗ-ССВ [11]. Таким образом, в первом приближении получается последовательная смена следующих обстановок (по преобладающему характеру смещений): сдвиговое поле с осью сжатия СВ простирания → взбросовое поле с осью сжатия СЗ простирания → сдвиговое поле с осью сжатия СЗ простирания. Последнее стресс-состояние принимается близким по ориентации главных осей современного НДС неизменной геологической среды.

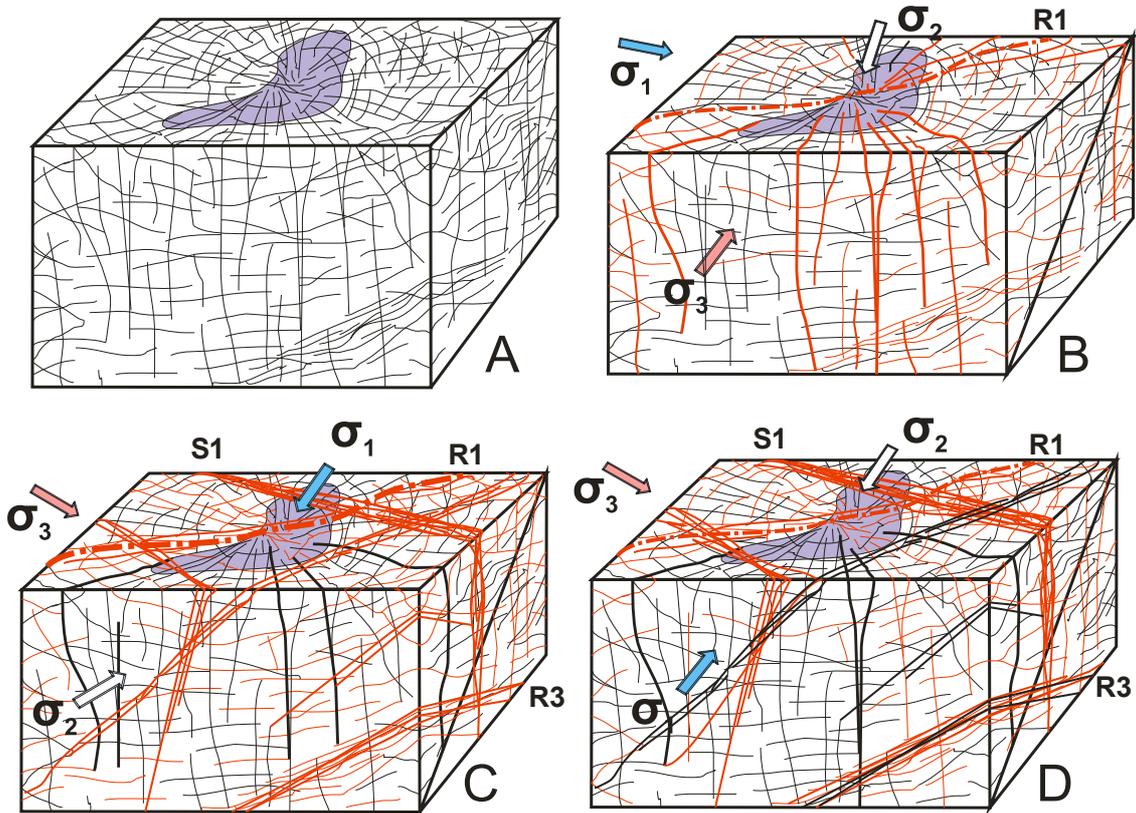


Рис. 1. Основные этапы эволюции трещинообразования массива пород Ковдорского бадделейт-апатит-магнетитового месторождения и реактивации мультикинематических дизъюнктивов. А → В → С → D – последовательность этапов/стадий разрывной тектоники с переиндексацией (транспозицией) осей главных напряжений, по [2]: А – стадия формирования парагенезиса прототектонической трещиноватости; В – стадия образования разлома R1 в сдвиговом (СВ простирания) с подчиненной взбросовой составляющей поле, формирование первых систем тектонических трещин и реактивация, внедрение даек поздних карбонатитов; С – постмагматическая стадия, соответствующая установленному тектонофизическими методами 1-му (взбросовому) полю напряжений; D – завершающий этап, соответствующая 2-му сдвиговому (СЗ простирания) полю напряжений  $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \delta_3$  ( $\delta_3$  – тах сжимающее)

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

Следует особо подчеркнуть, что в условиях отсутствия или недостатка исходной информации любой проект карьера будет составлен с большим запасом прочности конструкции, в том числе с заниженными общими углами бортов. При этом, как показывает практика, такая перестраховка не гарантирует 100 %-го отсутствия проявлений опасных геологических процессов с развитием деформаций, обрушений и оползней. Поэтому следует акцентировать внимание на вопросах определения пространственных границ исследований и параметров разведочной сети, а также на методических аспектах инженерно-геологических изысканий.

В отношении границ исследований действующие инструкции рекомендуют проводить инженерно-геологическое изучение месторождения «на площади, в пределах которой возможно сдвижение бортов карьеров» [12, 13]. По опыту наших исследований это требование можно конкретизировать в соответствии со схемой на рис. 2. Главный акцент схемы – нижняя граница (глубина) проведения инженерно-геологического изучения, которая должна выходить за контур призмы возможного обрушения проектируемого карьера на 20–50 м.

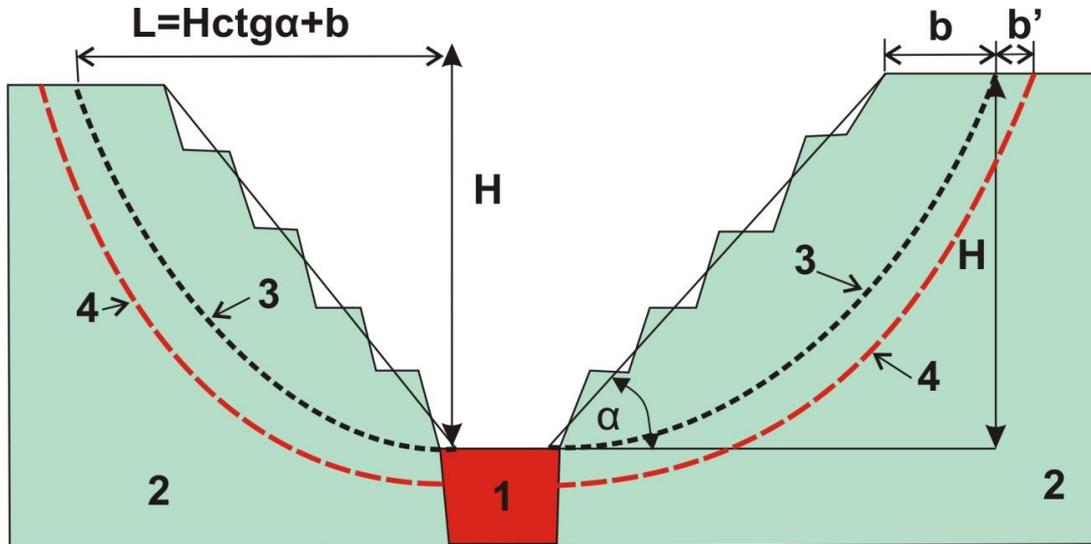


Рис. 2. Пространственные границы инженерно-геологического изучения:

1 – рудное тело; 2 – вмещающие породы; 3 – граница призмы возможного обрушения = граница инженерно-геологического изучения по [14]; 4 – скорректированная граница необходимого инженерно-геологического изучения с учетом возможности принятия оперативных решений/изменений проекта

Согласно схеме, расчет границ проведения инженерно-геологических работ осуществляется по формуле

$$L' = H \cdot ctg \alpha + b + b'$$

где  $L'$  – рекомендуемая граница проведения инженерно-геологических исследований,  $\alpha$  – общий угол наклона борта,  $H$  – планируемая глубина отработки,  $b$  – ширина призмы возможного обрушения по поверхности = граница изучения по [14],  $b'$  – дополнительное приращение границ изучения для возможности принятия оперативных решений (в пределах 20–50 м).

Для определения детальности и параметров разведочной сети по опыту выполнения аналогичных работ необходимо придерживаться следующих правил:

- каждый расчетный разрез должен опираться на 2–4 инженерно-геологические скважины;
- количество расчетных разрезов, исходя из сложности геологического строения, определяет ответственный проектировщик;
- в случае обнаружения опасных структурных неоднородностей и областей развития опасных геологических (геофизических) процессов разведочная сеть сгущается до параметров 50×50 м и реже – до 25×25 м с целью надежного прослеживания и геометризации выявленных структур.

Рациональный комплекс и последовательность выполнения инженерно-геологических и геомеханических исследований, разработанный с учетом проведенного ранжирования (см. табл. 1), представлен в виде компонентно-организационной диаграммы на рис. 3. Главные акценты расставлены на структурных, инженерно-геологических, геомеханических исследованиях, а также на мониторинге сейсмомодинимических явлений и деформационных процессов.



Рис. 3. Компонентно-организационная диаграмма комплекса инженерно-геологических и геомеханических исследований и наблюдений для обоснования проектирования глубокого карьера

Структурные и инженерно-геологические исследования района работ и массива пород месторождения проводятся стадийно, с последовательным уточнением и детализированием ключевых элементов и факторов на каждом из последующих этапов. На подготовительном этапе осуществляется выделение и анализ крупнейших (надранговых по отношению к месторождению/руднику) геолого-структурных элементов посредством дешифрирования аэро- и космодотоснимков (АФС и КФС), а также их сопоставление с геологическими картами разных масштабов и результатами геолого-геофизического изучения объекта исследований. Каждый из выделенных линеаментов и геоморфологических маркеров верифицируется на соответствие прямым (геологические границы и соотношения, результаты буровых и геофизических работ) и косвенным (особенности орогидрографии) признакам. Это позволяет осуществить разбраковку элементов тектоники по надежности и достоверности выделения.

Следующий шаг – документация и анализ геологического строения месторождения и его составных частей (рудных тел, зональности, выявленных разрывных нарушений и т. д.). В ходе выполнения полевых работ непосредственно в уступах карьера детально документируется трещиноватость, границы пород и инженерно-геологических литотипов, а также другие структурные неоднородности массива пород с пространственной привязкой (по трем координатам). Точная координатная привязка замеров позволяет использовать геоинформационные (ГИС) технологии для их визуализации, трассировки, анализа и прослеживания/увязки. С целью обеспечения максимальной информативности также используется методика многопараметрической документации и анализа [8, 15]. Для каждого структурного элемента с нарушением первичной сплошности массива пород (в том числе разлом,

дизъюнктивное нарушение, трещина, дайка и жильное образование, а также линзо-, дайко- или пластообразное геологическое тело постмагматической и/или пострудной стадии внедрения) документируются (включая моду, среднее и размах): азимутальные характеристики и их изменчивость по простиранию и падению, линейные параметры в горизонтальной и вертикальной составляющих, нормальная мощность трещин и жил, характер их выполнения и минерализации, расстояние по нормали до смежных трещин в одной системе, а также кинематические признаки смещений и/или деформаций. По результатам полевого этапа исследований в первом приближении проводится районирование массива пород. Анализ материалов по геологии и тектонике региона и месторождения с учетом данных по региональной сейсмичности и геоморфологии позволяет получить первые представления о региональном поле напряжений (палеонапряжений) и тенденции его развития. Все эти данные в совокупности ложатся в основу тектонической карты (карты-схемы) района и позволяют четко спланировать объемы и виды инженерно-геологических работ, а также параметры сети наблюдений (мониторинга, станций разгрузки и т. д.).

Основным методом получения фактографической информации по законтурному массиву пород служит бурение инженерно-геологических скважин с отбором ориентированного керна, опытно-фильтрационные работы и геофизические исследования в скважинах (ГИС). Комплекс исследований включает собственно проходку скважин, документацию керна в цифровом виде (фото, графика и электронные таблицы), координатную и азимутальную привязку всех структурных элементов, типовой комплекс ГИС для данного вида полезных ископаемых, опытно-фильтрационные работы, акустическое сейсмопрофилирование между отдельными стволами скважин, опробование и проведение специальных физико-механических и геомеханических лабораторных исследований и 3D-моделирование. 3D-модель предоставляет возможность увязки всех координатно привязанных данных, а также их интерпретации и анализа на принципиально новом качественном уровне.

В лабораторных условиях проводятся испытания ориентированных образцов с получением специальных характеристик пород (пределы прочности на сжатие, растяжение и срез, сцепление по плоскости ослабления, модули упругости Юнга и Пуассона и др.), используемых в моделировании НДС и расчетах устойчивости уступов и бортов карьера.

Важным блоком технологического комплекса работ по получению исходных данных для проектирования глубоких карьеров являются геомеханические исследования. Они подразделяются на проводимые *in situ*, лабораторные испытания и расчетно-аналитические (моделирование). Непосредственно в карьере проводятся инструментальные измерения действующих в массиве пород напряжений методом разгрузки в варианте торцевых измерений (рис. 4). Накопленная статистика таких измерений по Кольскому региону свидетельствует о том, что тектоническая компонента напряжений в подавляющем большинстве случаев превышает максимальные расчетные значения по гравитационной составляющей за счет вышележащих пород [8, 9].

Результаты обобщения и анализа замеров НДС массива пород карьера на руднике «Железный», эксплуатирующего КММА, представлены на рис. 5. Рисунок подтверждает тезис о значительной изменчивости и флуктуациях НДС на локальном уровне. Для ряда участков есть возможность оценить динамику изменения параметров НДС в зависимости от времени (срок экспозиции/выветривания). Наилучшим образом это иллюстрирует участок деформации (обрушения) юго-восточного борта карьера, где последовательно в разное время, по мере постановки уступов в конечное положение, были выполнены замеры на четырех станциях наблюдения (НС), заложенных в горизонтальных скважинах. Графики замеров параметров объединены на рис. 6 в одном линейном масштабе. Три верхних НС имеют последовательное понижение на одинарный уступ (12–15 м) и, соответственно, характеризуются различной глубиной и временем экспозиции/выветривания тектонической зоны (разница в постановке уступов от нескольких месяцев до нескольких лет). При этом специфика заложения скважин предусматривает для наблюдательных станций НС-45, НС-7 и НС-7а соизмеримые условия

(бурение от поверхности разрывного нарушения вглубь массива, т. е. вглубь за тектоническую зону), а для НС-18 – иные условия (ствол скважины находится выше рассматриваемой поверхности основного разрывного нарушения).

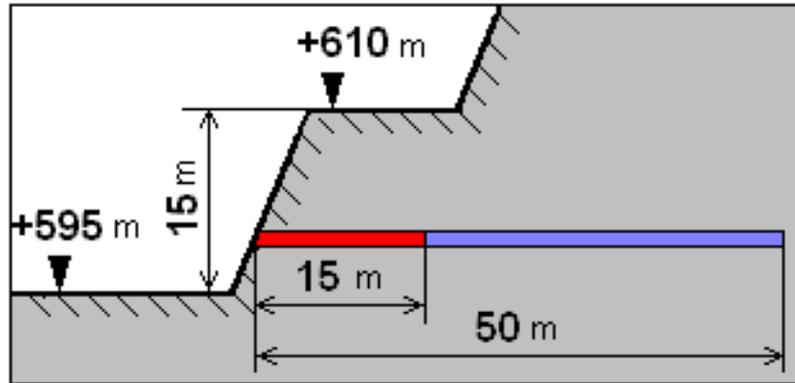


Рис. 4. Типовая конструкция станции по измерению параметров НДС породного массива методом разгрузки; общая длина скважины – 50 м, участок измерений методом разгрузки – 15 м

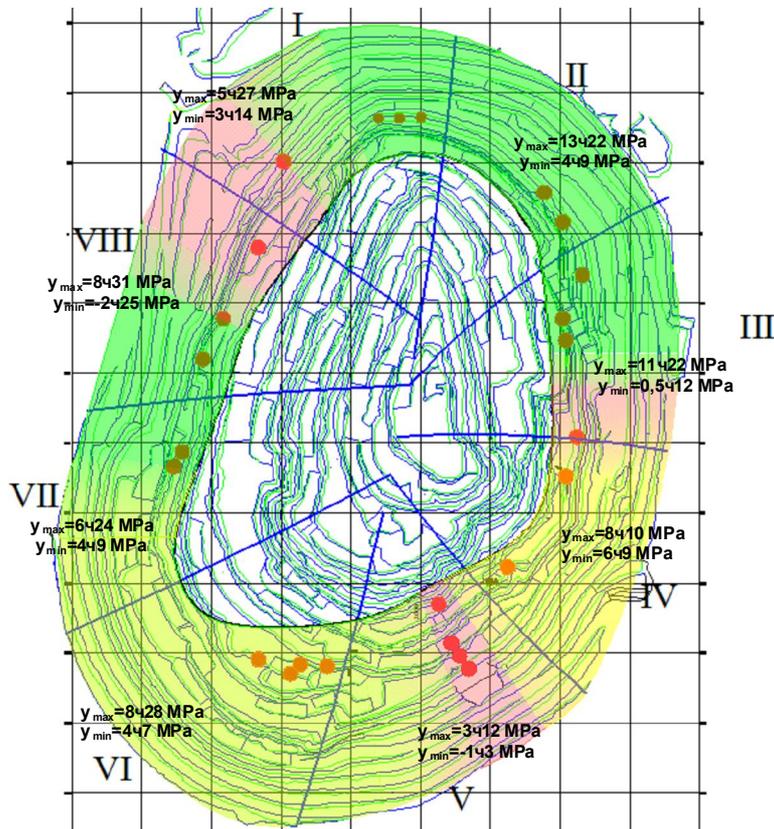


Рис. 5. Районирование карьера рудника «Железный» по величинам действующих напряжений с учетом геолого-структурных особенностей строения массива горных пород, по [9]:

I–VIII – инженерно-геологические секторы; красные точки – места заложения наблюдательных станций; зеленый цвет – наиболее благоприятные зоны, с точки зрения действующих в массиве пород напряжений; желтый – менее благоприятные зоны; красный – наименее благоприятные зоны

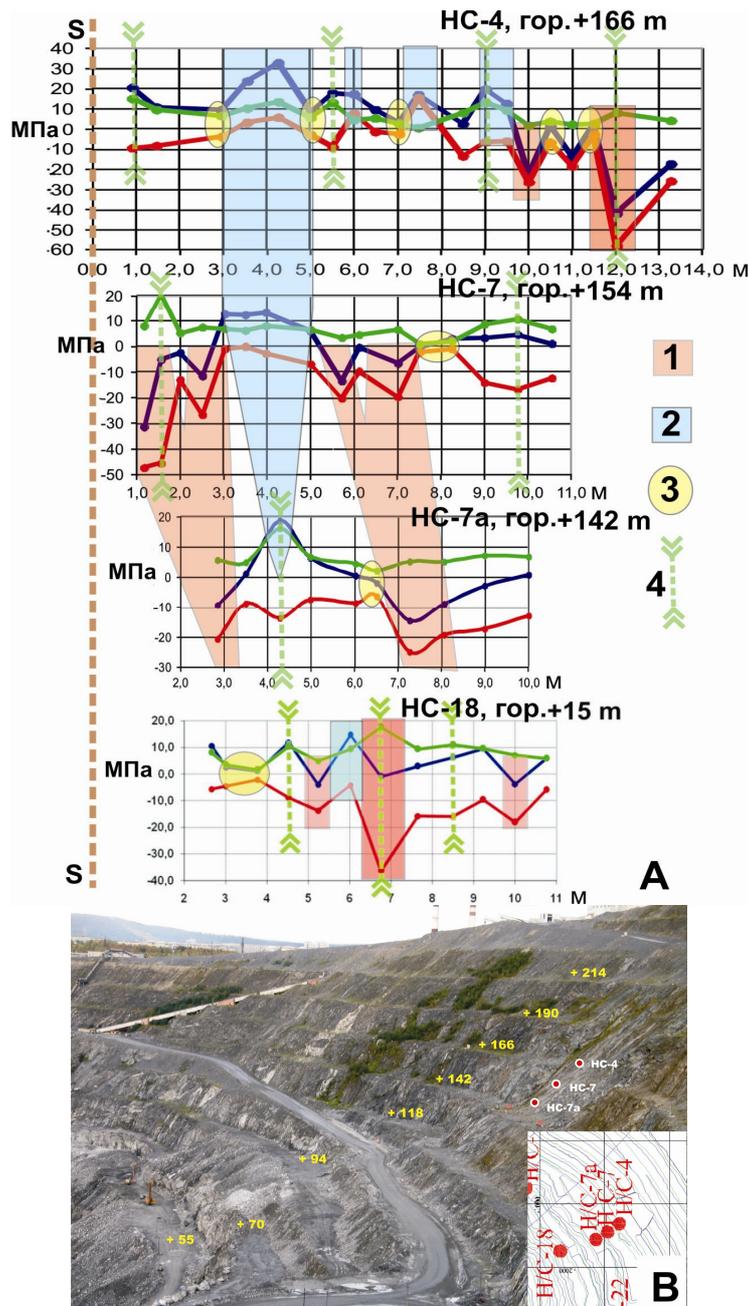


Рис. 6. Сопоставление параметров НДС по разным НС на юго-восточном борте карьера (А): красная линия – максимальная компонента главных напряжений (отриц. знач.); синяя линия – минимальная компонента главных напряжений (положит. знач.); зеленая – касательные напряжения; линия S-S – поверхность карьера; 1 – зона сжатия (значения НДС превышают расчетные); 2 – зона растяжения (значения растягивающего напряжения превышают сжимающее); 3 – зона разгрузки (значения максимального и минимального напряжений и разница между ними стремятся к нулю); 4 – точки замеров максимальных касательных напряжений (от 10 до 20 МПа). Места заложения НС (В)

По результатам анализа результатов измерения мы видим (рис. 6) следующие отличительные особенности структуры поля напряжений в прибортовом массиве:

- верхняя наблюдательная станция (НС-4) – скважина на гор. +166 м показывает самое контрастное поле напряжений с преобладанием состояния «обстановка трехосного растяжения».

Имеются многочисленные пики (4 шт.) растягивающего напряжения до 30 и более МПа, а также многочисленные (6 шт.) пики максимальных касательных напряжений ( $\geq 10$  МПа), а на расстоянии более 11 м от поверхности – мощная зона сжатия (40–60 МПа). Также весьма многочисленны замеры (5 шт.), показывающие условно разгруженное состояние массива пород, когда максимальное и минимальное напряжения и соответственно разница между ними стремятся к нулю. Мы интерпретируем такую картину более длительным по отношению к другим станциям временем экспозиции/разгрузки и более близким расположением станции наблюдения к приповерхностной зоне дезинтеграции/выветривания;

- станции наблюдения НС-7 и НС-7а показывают более однородное поле с преобладанием обстановки умеренного трехосного сжатия, а также меньшее количество пиков максимальных касательных напряжений ( $\geq 10$  МПа). При этом максимальная зона растяжения (в интервале 3–5 м от поверхности) коррелируется/увязывается по всем трем скважинам, а зоны сжатия – только в более «свежих» и удаленных от дневной поверхности станциях НС-7 и НС-7а. В этих же скважинах мы видим всего по одному замеру, соответствующему условно разгруженному состоянию массива пород, и от одного до трех состояний с максимальными касательными напряжениями выше 10 МПа. На станции НС-7а – единственной из рассматриваемых – отмечен замер, характеризующийся одновременным увеличением и растягивающего (преобладающее по значению), и сжимающего напряжения (замер на интервале 4.2 м);

- станция наблюдения НС-18 – самая «свежая» и глубокая от поверхности – пробурена на горизонте +15 м. Она имеет преобладающее состояние трехосного сжатия, однако при этом отмечается более контрастная структура поля напряжений по сравнению со станциями НС-7 и НС-7а. Авторы настоящей статьи объясняют это нахождением измеряемой зоны над поверхностью основного разрывного нарушения.

Таким образом, общее представление о структуре поля напряжений в прибортовом массиве пород должно базироваться на следующих положениях:

- изменчивость НДС в пространстве и во времени (с постепенным развитием негативной тенденции);
- увеличивающаяся со временем под воздействием агентов выветривания и в ходе разгрузки массива пород контрастность (неоднородность) структуры поля напряжений;
- наличие контрастных, разнознаковых состояний поля напряжений вблизи структурно нарушенных зон.

Полученные структурные и инженерно-геологические данные, результаты экспериментального определения параметров НДС массива пород методом разгрузки в варианте торцевых измерений, сейсмомониторинга карьерного поля и мониторинга деформаций и нарушений устойчивости уступов обобщаются и интегрируются в геоинформационную систему, чтобы стать основой для геомеханических расчетов и построения численных моделей различной детальности и наполнения. Математическое моделирование осуществляется методом конечных элементов в упругой постановке в среде программного комплекса Sigma3D, разработанного в Горном институте КНЦ РАН [1]. Программа позволяет задать адекватные исследуемому объекту граничные условия по напряженному состоянию, учесть структурные неоднородности различного иерархического уровня и подробно смоделировать конфигурацию рельефа и геометрию очистных пространств.

## Заключение

При помощи рассмотренного комплекса инженерно-геологических и геомеханических исследований методом последовательных приближений создается универсальная геомеханическая и инженерно-геологическая модель массива пород месторождения и рудника. Для нее определяются важнейшие параметры для проектирования/перепроектирования глубоких карьеров:

- локализованные и геометризованные в 3D-модели разломы, разрывные нарушения с опасным для устойчивости уступа и борта в целом залеганием, зоны ослабления, выветривания, дезинтеграции и другие структурные неоднородности;
- напряженно-деформационное состояние пород, включая ориентацию главных осей напряжения и их абсолютные значения;
- физико-механические и геомеханические свойства пород, включая плотность, объемный вес, угол внутреннего трения, прочность сцепления, коэффициент структурного ослабления,  $V_p$ ,  $V_s$ , модуль  $E$ , коэффициент Пуассона и др.;
- гидрогеологические характеристики – обводненность пород, положение уровня подземных вод и фильтрационные свойства.

Все эти данные в совокупности с результатами других исследований формируют необходимую и достаточную базу для обоснованного повариантного моделирования и проектирования конструкции карьера в целом, в особенности – потенциально опасных участков с учетом всех их индивидуальных особенностей. Адекватность полученных моделей реальному объекту, а также динамика изменения исходных параметров в процессе разработки месторождения контролируется результатами постоянного комплексного интегрированного мониторинга региональной и локальной сейсмичности, деформаций уступов и гидрогеологического режима. Таким образом, заблаговременное выполнение предложенного комплекса инженерно-геологических и геомеханических исследований создает информационную базу для системы поддержки управленческих решений, позволяющую обосновать:

- проектные и оперативные решения при эксплуатации глубоких горизонтов крупнейших месторождений стратегических полезных ископаемых;
- безопасность ведения горных работ, надежный прогноз мест возможных обрушений и деформаций бортов и уступов карьеров, а также своевременную разработку мер противодействия опасным геолого-геофизическим явлениям и процессам за счет изменения конструктивных параметров (контура, геометрии уступов и горизонтов и т. п.) и/или реализации мероприятий по укреплению уступов;
- рациональное использование недр, т. е. повышение степени извлечения стратегических полезных ископаемых за счет строительства глубоких и сверхглубоких карьеров для эксплуатации глубоких горизонтов.

## Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь и организационно-техническую поддержку руководству АО «Ковдорский ГОК», сотрудникам геологического отдела комбината и службы мониторинга устойчивости уступов. Замеры параметров и анализ НДС природно-технической системы КММА выполнены в рамках гранта РНФ 14-17-00751 (научный руководитель – проф., д. т. н. А. А. Козырев).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Закономерности перераспределения полей напряжений при формировании глубокой карьерной выемки // Материалы докладов Третьей тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», Москва, 8–12 октября 2012 г. / И. Э. Семенова [и др.]; ИФЗ РАН. М., 2012. Т. 2. С. 326–330. 2. 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. 3. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М., 1975. 536 с. 4. Данилович В. Н. Метод поясов в исследованиях трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск: Изд-во Иркут. политехн. ин-та, 1961. 47 с. 5. Шерман С. И. О потенциальной способности глубинных разломов к магмоконтролирующей деятельности // Вестник научной информации Забайкал. отд-ния Геогр. о-ва СССР. Чита, 1966. № 5. С. 16–24. 6. Гущенко О. И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений в литосфере. М., 1979. С. 7–25. 7. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИКЦ Академкнига, 2007. 406 с. 8. 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. 9. Рыбин В. В., Губинский Н. О., Данилов И. В. Опыт определения напряженного состояния прибортового массива пород на карьерах Кольского полуострова // Современная тектонофизика.

Методы и результаты: материалы совещания. М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 34–37. **10.** Козырев А. А., Рыбин В. В., Каспарьян Э. В. Особенности развития геомеханических процессов в массивах пород глубоких карьеров // ГИАБ, 2015. № 4. С. 32–39. **11.** 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 // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. Т. 1. С. 92–103. **12.** Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 172 с. **13.** Инженерно-геологические, гидрогеологические и геоэкологические исследования при разведке и эксплуатации рудных месторождений / сост. В. И. Кузькин [и др.]. М.: РИЦ ВИМС, 2002. **14.** Фисенко Г. Л., Пустовойтова Т. К., Кагермазова С. В. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом. Л.: Недра, 1986. 113 с. **15.** Комплексная методика инженерно-структурных исследований и мониторинга геомеханического состояния массива пород в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров / Д. В. Жиров [и др.] // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы совещания. М.: ИФЗ РАН, 2011. Т. 1. С. 100–109.

### Сведения об авторах

*Жиров Дмитрий Владимирович* – начальник отдела инноваций Геологического института КНЦ РАН  
E-mail: zhirov@geoksc.apatity.ru

*Мелихова Галина Сергеевна* – главный гидрогеолог ОАО «МГРЭ»  
E-mail: melihovags@mgre.ru

*Рыбин Вадим Вячеславович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН  
E-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru

*Сохарев Виктор Александрович* – главный геолог АО «Ковдорский ГОК»  
E-mail: Viktor.Sokharev@eurochem.ru

*Климов Сергей Андреевич* – ведущий инженер Геологического института КНЦ РАН  
E-mail: klim-sa@yandex.ru

### Author Affiliation

*Dmitry V. Zhirov* – Head of the Innovation Department of the Geological Institute of the KSC of the RAS  
E-mail: zhirov@geoksc.apatity.ru

*Galina S. Melikhova* – Chief Hydrogeologist of the "MGRE" Stock Company  
E-mail: melihovags@mgre.ru

*Vadim V. Rybin* – PhD (Eng.), Leading Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS  
E-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru

*Victor A. Sokharev* – Chief Geologist of the "Kovdorsky GOK" Stock Company  
E-mail: 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

### Библиографическое описание статьи

*Жиров Д. В.* Особенности инженерно-геологического изучения массивов скальных пород в целях проектирования глубоких карьеров на примере Ковдорского месторождения магнетитовых и апатитовых руд. Часть 2 / Д. В. Жиров [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 1. – С. 19–29.

### Reference

*Zhirov D. V.* 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 2 / D. V. Zhirov [et al.] // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 1. – P. 19–29.

УДК 551+552.4

**ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА КЕЙВСКОГО ДОМЕНА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)\*****Н. Е. Козлов<sup>1,2</sup>, Н. О. Сорохтин<sup>1,2,3</sup>, Е. В. Мартынов<sup>1,2</sup>, Е. Н. Фомина<sup>1</sup>**<sup>1</sup>ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН<sup>2</sup>АФ ФБГОУ ВПО МГТУ<sup>3</sup>ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН**Аннотация**

Показано, что по особенностям вещественного состава кейвские образования отличны от прочих архейских структур Кольского региона. Данная структура действительно может рассматриваться как особый домен, расположенный внутри Кольского раннедокембрийского глубинного коллизииона. Сопоставление вещественного состава породных ассоциаций Кейвской структуры с метаморфитами других архейских комплексов северо-востока Балтийского щита, а также Канады и Гренландии не позволяет установить их близость гранит-зеленокаменным или гранулит-гнейсовым типам структур.

**Ключевые слова:**

*региональная геология, геохимия, докембрийские комплексы, протолиты, реконструкция, метаморфизм, геодинамика, вулканизм, седиментогенез.*

**FEATURES OF MATERIAL COMPOSITION OF THE KEIVY DOMAIN (THE KOLA PENINSULA)****Nikolay E. Kozlov<sup>1,2</sup>, Nikolay O. Sorokhtin<sup>1,2,3</sup>, Evgeny V. Martynov<sup>1,2</sup>, Ekaterina N. Fomina<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Geological Institute of the KSC of the RAS<sup>2</sup>Apatity Branch of of the MSTU<sup>3</sup>P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS**Abstract**

It has been shown that formations of Keivy differ from other Archean structures of the Kola region by the specifics of their material composition. This structure can actually be considered as a distinctive domain that is located within the Kola Early Precambrian deep collision structure. Comparison of the material compositions of rock associations in the Keivy structure with metamorphic formations of other Archean complexes in the North-East of the Baltic Shield, as well as with Canadian and Greenlandic complexes, does not allow revealing their preferable proximity to granite-greenstone or granulite-gneiss types of structures.

**Keywords:**

*regional geology, geochemistry, Precambrian complexes, protoliths, reconstruction, metamorphism, geodynamics, volcanism, sedimentogenesis.*

**Введение**

Кейвский домен выделяется среди раннедокембрийских структур Кольского региона своеобразием породных ассоциаций, особенностями их вещественного состава, наличием в его пределах древнейших для региона щелочных гранитов и ассоциирующих с ними габбро-анортозитов. Он занимает особое место в архитектуре региона [1], а аналоги кейвских породных комплексов и связанных с ними уникальных месторождений полезных ископаемых на Балтийском щите не известны [2]. В связи с этим данная структура рассматривается как особый домен, расположенный внутри Кольского раннедокембрийского глубинного коллизииона [3]. Тем не менее, количество детальных исследований, иллюстрирующих эту уникальность

\* Работа выполнена в Геологическом институте КНЦ РАН по государственному заказу № 0231-2015-0007.

на вещественном уровне и включающих результаты сравнительного анализа кейвских образований с породными ассоциациями других структур региона, невелико. Авторы настоящей статьи на протяжении ряда лет занимаются изучением означенной проблемы [4–7] и полагают: прежде чем перейти к собственно объяснению своеобразия Кейвской структуры, необходимо систематизировать данные, его подчеркивающие, чему и посвящена представленная работа.

### Обсуждение результатов

Кейвский домен расположен в центральной части Кольского п-ова. На востоке он граничит с Восточно-Кольским, на западе – с Кольско-Норвежским, на севере – с Мурманским доменами континентальной коры, а с юга ограничен раннепротерозойскими образованиями Печенго-Имандра-Варзугского зеленокаменного пояса (рис. 1). В пределах Кейвского домена выделяют Ефимозерский, Верхне-Понойский и Пурначский блоки (или выступы), структурные зоны Больших и Малых Кейв, а также Понойскую [8, 9]. Породы архейского комплекса древнейшего фундамента, подстилающие супракрустальные образования Кейвской зоны, обнажены на территории наиболее поднятых и глубоко эродированных блоков. Наиболее широко они проявлены в пределах Верхне-Понойского блока и слагают значительную часть Ефимозерского и Пурначского выступов [10]. Петрографический состав архейского комплекса представлен лейко- и мезократовыми гнейсами и гранитогнейсами: биотитовыми, биотит-амфиболовыми, гранат-биотитовыми [11]. В гальках конгломератов нижних толщ присутствуют породы формации гранодиоритов-тоналитов-плагиигранитов [12].

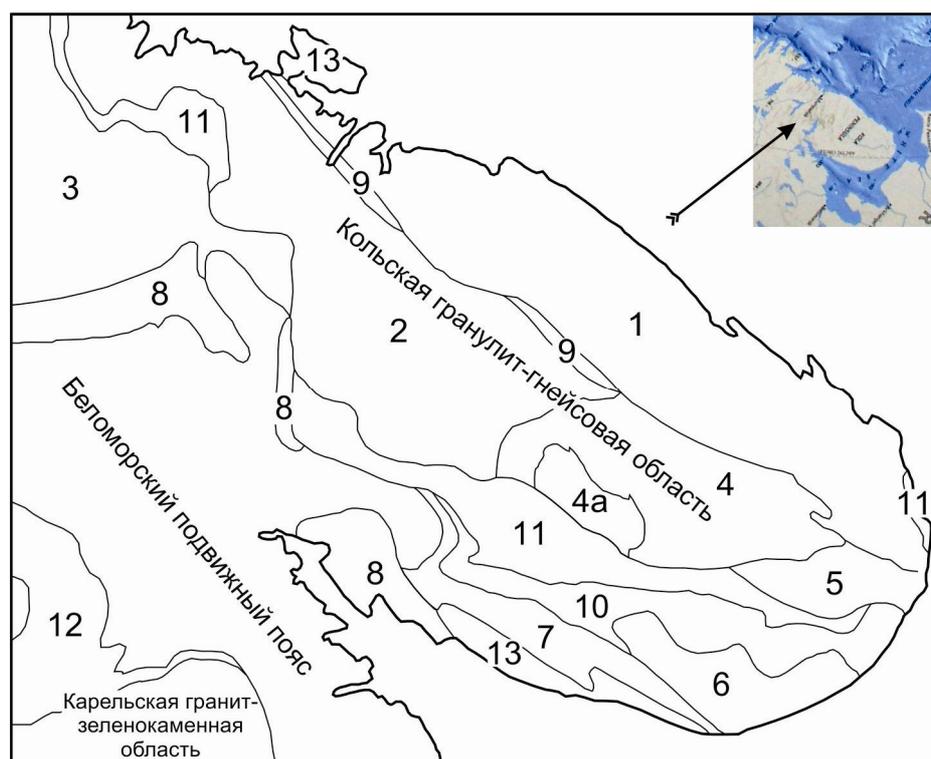


Рис. 1. Схема районирования раннедокембрийских геоструктурных элементов земной коры северо-восточной части Балтийского щита [по: 7, 13, 14]. Домены коры: 1 – Мурманский, 2 – Кольско-Норвежский, 3 – Лоттинский, 4 – Кейвский, 4а – Верхне-Понойский, 5 – Восточно-Кольский, 6 – Чапомский, 7 – Терский. Зеленокаменные и гранулитовые пояса: 8–10 – архейские: 8 – Лапландско-Колвицкий; 9 – Титовско-Колмозерский (Колмозеро-Воронья); 10 – Сергозерско-Стрельнинский; 11, 12 – неопротерозойские: 11 – Печенга-Имандра-Варзуга-Устьпонойский; 12 – Северо-Карельский; 13 – рифтогенные и окраинно-континентальные отложения рифейского возраста

Возраст и происхождение супракрустальных образований Кейв до сих пор остаются предметом оживленной дискуссии, поэтому в дальнейшем характеристика разреза будет приведена в соответствии с доминирующими стратиграфическими схемами Кейв [8, 12]. Супракрустальные верхнеархейские комплексы занимают центральную часть домена. К нижнему уровню относят коловайскую (развитую по периферии Ефимозерского и Пурначского выступов) и кинемурскую (в обрамлении Верхне-Понойского выступа) свиты, залегающие на комплексе основания с тектоническим несогласием и сложенные амфиболовыми и биотитовыми гнейсами и плагиосланцами с конгломератами в основании. Данные породы трансгрессивно перекрывают патчервтундровская (приуроченная к областям распространения коловайской) и коррелируемая с ней устьюгоньская (пространственно совмещенная с кинемурской) свиты амфиболитов, слюдяных плагиосланцев и гнейсов. Стратиграфически выше располагается лебяжинская свита тонкозернистых биотитовых (обычно с гранатом и мусковитом) гнейсов и плагиогнейсов с реликтовыми признаками вулканитов и, в подчиненном количестве, осадочных образований, занимающая в целом до 30 % общей площади выхода супракрустальных образований на поверхность.

Собственно кейвская серия, залегающая на породах лебяжинской свиты со стратиграфическим и угловым несогласием [15, 16], разными исследователями относится то к верхнему архею [17, 18], то к протерозою [8, 19, 20]. Серия представлена червуртской, выхчуртской и песцовотундровской свитами, сложенными преимущественно слюдяными, кианитовыми, силлиманитовыми, ставролит-гранатовыми и углеродистыми сланцами и кварцитами. Незначительным распространением в центральной части Кейвского домена (хр. Серповидный) пользуется толща карбонатных, флогопит-мусковит-кварц-полевошпатовых и диопсид-тремолитовых пород, метапесчаников и метабазитов, плагиосланцев и кварцито-песчаников, относимая в разных интерпретациях либо к варзугской серии [8], либо к песцовотундровской свите [18].

Метаморфические преобразования верхнеархейских и нижнепротерозойских супракрустальных комплексов протекали в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций. Считается, что в архее они либо не испытывали метаморфизма, либо он происходил в существенно более низкотемпературных условиях, чем впоследствии [21]. Регионально-метаморфическая переработка пород лебяжинской серии и подстилающих ее толщ изучена недостаточно. Обычно отмечается, что они обладают чертами полиметаморфических преобразований, общий или последний уровень которых в целом соответствует амфиболитовой фации [11]. Многие исследователи полагают, что породы лебяжинской и устьюгоньской толщ претерпели также и интенсивный щелочной метасоматоз, связанный со щелочными гранитами [8, 22]. Метаосадочные комплексы кейвской серии регионально метаморфизованы в условиях кианит-ставролит-двуслюдяной субфации амфиболитовой фации [21], которая в Западных Кейвах сменяется силлиманит-мусковитовой и силлиманит-микроклиновой субфациями. Ряд исследователей [11, 23] объясняет данный переход термальным воздействием щелочных гранитов.

Щелочные граниты и граносиениты (в некоторых интерпретациях – гнейсограниты) на территории Кейвского домена распространены широко. Они занимают общую площадь более 2.5 тыс. км<sup>2</sup> и представлены шестью массивами: Западно-Кейвским, Понойским, Лаврентьевским, Белые Тундры, Пачинским и Нижне-Понойским [22]. Все массивы считаются пластовыми интрузиями, в подошве которых залегают породы архейского фундамента, а в кровле – супракрустальные образования комплекса Кейв [10]. Пространственно зоны их выхода на современном эрозионном срезе тяготеют к периферии домена и маркируют границы сочленения с другими континентально-коровыми образованиями. С гранитами ассоциируют в пространстве близкие по возрасту массивы габбро-анортозитов – Цагинский, Ачинский, Медвежье-Щучьеозерский и др. В пределах массива Западных Кейв расположены небольшие щелочные и нефелинсиенитовые интрузии (Кульйок, Сахарйок).

Единого взгляда на природу щелочных гранитов к настоящему времени не сформировалось. Доминирующей является точка зрения об их первично магматическом источнике [22, 24, 25], аргументированная в первую очередь приуроченностью щелочногранитных массивов к глубинным и оперяющим их разломам, их нахождением среди пород разных структурных этажей, формой и внутренним строением, дифференцированностью интрузий и наличием в них ксенолитов вмещающих пород. Наряду с этим, были предложены модели метасоматического генезиса щелочных гранитов путем «гранитизации» гнейсов лебяжинской свиты в Западных Кейвах [20] и первично-осадочного субстрата [26], основанные главным образом на сопряженности структурных элементов гранитов, гнейсов и сланцев. Существует также версия, согласно которой щелочные граниты (называемые в данной интерпретации гнейсогранитами) образовались в результате реоморфизма и ремобилизации осадочно-вулканогенного комплекса лебяжинской свиты [19, 27]. При этом в данных работах вся ассоциация щелочных гранитов, известково-щелочных и амфиболовых гнейсов и амфиболитов рассматривается в качестве зеленокаменного пояса.

Авторами настоящей статьи ранее было проведено исследование вещественного состава всего спектра метаморфических комплексов Кейвского домена с использованием базы данных, включающей более тысячи полных силикатных анализов из литературных источников. На данной площади нами выявлено максимальное для всего архея Кольского региона разнообразие пород [4, 5]. Выделено 18 породных разновидностей, первичная природа которых соответствует следующим группам петрогеохимической систематики А. А. Предовского [28]: пикробазальты (0.3 %), глиноземистые, железистые и магнезиальные базиты (соответственно 10.8, 3.4 и 4.5 %), андезитобазальты (9,8 %), андезиты (3.9 %), дациты (0.7 %), риодациты (1.1 %), риолиты (1.0 %), а также кластогенные образования – туффиты (5.8 %), плагиокварциты (0.1 %), аркозы (15.7 %), субграувакки (8.3 %), граувакки (5.0 %), мелановакки (2.1 %) и пелиты (9.1 %). Протолиты 18.3 % проб пород не были распознаны: точки составов этих пород равномерно разбросаны как в поле перекрытия туффитов и магматитов (9.3 %), так и в поле перекрытия последних с осадочными образованиями (9.0 %). Количество нераспознанных метаморфитов сопоставимо с данными по другим архейским образованиям региона [4].

Среди распознанных протолитов, как и в соседнем Кольско-Норвежском домене [4], преобладают осадочные и вулканогенно-осадочные разновидности, составляющие в сумме 56.5 %. В ряду метамагматитов распространены преимущественно основные по составу разновидности, которые составляют 23.3 из 43.5 %, приходящихся на общую долю пород первично-магматического генезиса. В отличие от других архейских комплексов региона, среди зернистых метаосадочных и вулканогенно-осадочных пород доминируют не метаграувакки и метатуффиты, а метааркозы, метапелиты и метасубграувакки, то есть образования, более свойственные платформенным областям (табл. 1).

Кислые разновидности метаморфитов (зернистые метаосадочные породы) были нанесены на диаграммы Дж. Мейнарда с соавторами [29] и М. Бхатиа [30] (рис. 1 и 2), на которых они попадают в поле пассивных окраин и интракратонных рифтов, что отражает их явное отличие от сходных по первичной природе образований прочих архейских структур Кольского региона [4]. Наряду с этим прослеживается и тенденция к смещению составов пород в направлении полей внутриплитных структур. Стоит упомянуть, что ранее была показана возможность формирования анортозитов Кейв во внутриплитной обстановке [31].

Важным представляется тот факт, что среди метаосадочных пород Кейв резко выделяются две группы пород, одна из которых аномально обогащена  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ . Вероятнее всего, это свидетельствует либо о вариациях степени исходного выветривания в ходе накопления первично-осадочных толщ, либо о различной степени их постседиментационных дометаморфических изменений в результате регионально проявленных на территории Кейвского

домена метасоматических воздействий. Последнее представляется более вероятным в связи с тем, что подобное содержание титана, а также соотношение глино- и кремнезема, судя по данным эталонных диаграмм (рис. 2, 3), нехарактерно в целом для осадочных пород. Кроме того, метаосадочных образований с подобными содержаниями и соотношениями этих элементов в пределах архейских комплексов Кольского региона не наблюдается [4]. В связи с изложенным, в настоящей работе для приведенных выше реконструкций были использованы разновидности с наиболее низким содержанием таких элементов.

Таблица 1

Сопоставление состава протолитов архейских комплексов Кольского региона

Объекты	Содержание метаматитов, %	Преобладающие типы осадочных протолитов
Мурманский домен	75.7	Граувакки, субграувакки
Ингозерская структура	73.4	Граувакки, субграувакки
Кольско-Норвежский домен	47.2	Граувакки, туффиты
Кейвский домен	43.5	Аркозы, субграувакки, глины
Беломорский домен	68.8	Туффиты, граувакки

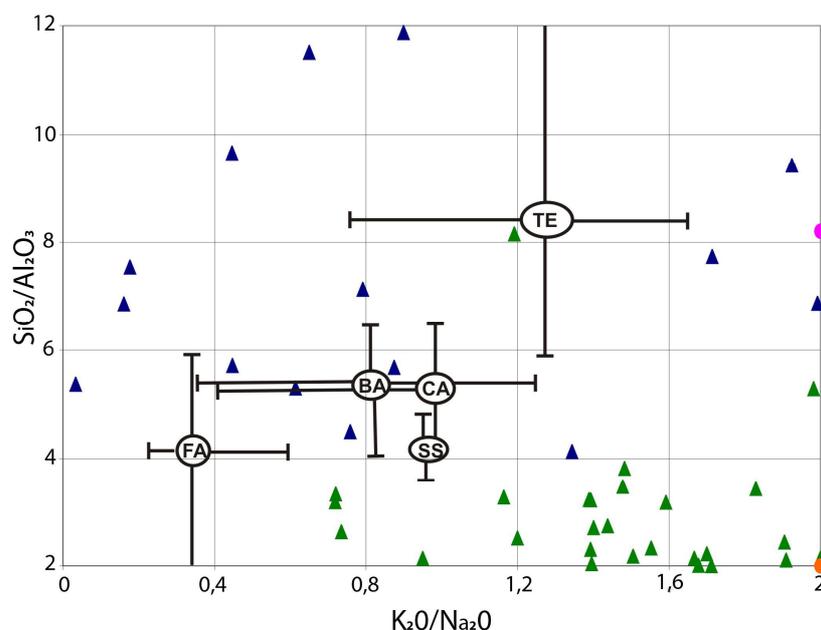


Рис. 2. Положение точек состава наиболее распространенного типа разновидностей песчано-алевритовых метаосадочных пород Кейвского домена на диаграмме Дж. Б. Мейнарда с соавторами [29]. Бассейны магматических дуг: FA – преддуговые, BA – задуговые. Внутриокеанические активные обстановки: SS – сопряженные со сдвиговыми дислокациями, CA – окраинно-континентальные дуги. Пассивные обстановки: TE – интраконтинентальные, интракратонные рифты и авлакогены. Синими треугольниками обозначены низкотитанистые породы, зелеными – высокотитанистые

Своеобразие Кейвского домена выявляется также в ходе реконструкции обстановок формирования протолитов метавулканитов (табл. 2), проведенной с использованием оригинальных методик [14]. Для оценки подобия сравниваемых объектов нами была рассчитана мера сходства/отличия параметров химического состава протолитов [4], называемая коэффициентом отличия ( $K_{отл}$ ). Чем меньше значение коэффициента отличия, тем больше сходство сравниваемых объектов. В результате расчетов породные ассоциации Кейвского домена по своим петрогеохимическим характеристикам оказались наиболее близки островодужным

образованиям. О некотором сходстве образований Кейвского домена с породными сериями островных дуг свидетельствуют также и результаты реконструкции возможного геодинамического режима формирования гранитоидов, проведенной М. В. Минцем с использованием диаграмм Дж. Пирса [19].

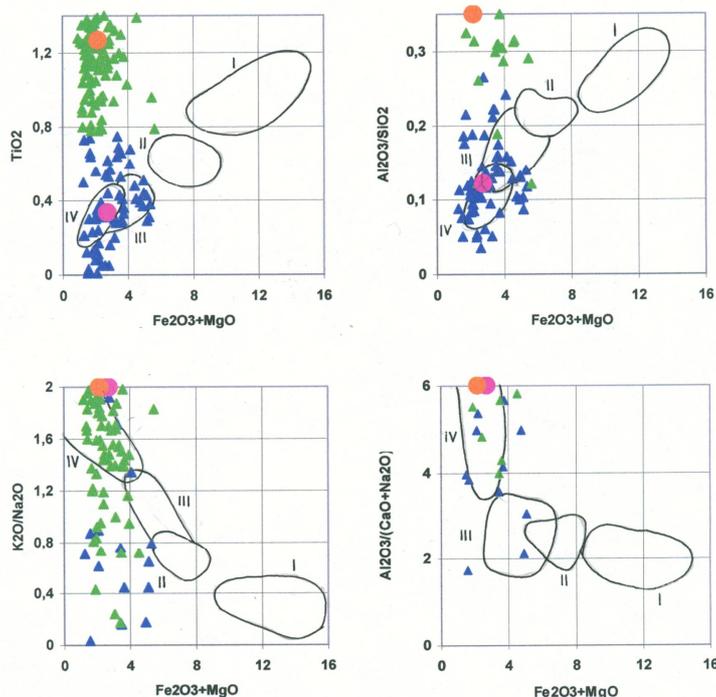


Рис. 3. Положение точек составов наиболее распространенного типа песчано-алевритовых метаосадочных пород Кейвского домена на диаграммах М. Бхатии [30]. Точки разного цвета – медианные значения для соответствующих групп. Поля I–IV соответствуют тектоническим обстановкам: I – океанической островной дуги; II – континентальной островной дуги; III – активной континентальной окраины; IV – пассивной окраины

Таблица 2

Результаты реконструкции обстановок формирования протолитов архейских комплексов Кольского региона с учетом возможной эволюции химического состава мантии

Объекты сопоставления	Юные дуги	Развитые дуги	Зрелые дуги	COX	Континентальные рифты	Граппы
Мурманский домен	2.26	1.99	1.86	2.17	<b>1.82</b>	1.88
Центрально-Кольский сегмент Кольско-Норвежского домена	2.56	2.97	2.58	1.98	<b>1.95</b>	2.07
Кейвский домен	3.31	<b>2.96</b>	3.03	3.55	3.02	3.27
Беломорский подвижный пояс	2.12	2.43	2.51	<b>1.84</b>	2.12	2.02

*Примечание.* Полужирным выделены минимальные значения  $K_{отл}$ .

Сопоставление вещественного состава породных ассоциаций Кейвского домена и других архейских комплексов северо-востока Балтийского щита, а также Канады и Гренландии, проведенное на основе 4.8 тыс. полных силикатных анализов, позволяет говорить об их близости

«промежуточным» типам областей, а не гранит-зеленокаменным или гранулит-гнейсовым. При этом в целом просматривается связь с породами Кольского региона (табл. 3). Ранее было установлено, что метабазиты Кейвского домена и по содержанию отдельных элементов занимают особое положение среди прочих архейских образований региона, и в целом более близки к древнейшим комплексам Карелии, Канады и Гренландии [6].

Таблица 3

Степень сходства метаморфитов Кейвского домена и архейских комплексов Балтийского щита и Северо-Атлантического кратона

Объекты	Гранит-зеленокаменные области *						Области промежуточного типа				Гранулит-гнейсовые области *			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$K_{отл}$	<b>3.9</b>	5.2	5.5	9.7	6.4	7.4	5.4	6.2	<u>3.4</u>	<b>4.4</b>	<b>4.8</b>	<b>5.7</b>	<b>6.0</b>	<b>4.1</b>

**Примечания.** Блоковые структуры: 1 – Мурманский домен; 2 – западная Гренландия и восточный Лабрадор; 3–7 – блоковые структуры Карельского кратона: 3 – Вокнаволоцкая; 4 – Тулосская; 5 – Водлозерская; 6 – северная Финляндия; 7 – Таваярвинская; 8 – Центральное Беломорье; 9 – Терский домен; 10 – Западное Беломорье; 11 – Аллареченская структура; 12 – Нотозерский блок; 13 – Приимандровская структура; 14 – Центрально-Кольский сегмент Кольско-Норвежского домена. Полуужирным шрифтом выделены структуры Кольского региона. Подчеркнуто минимальное значение  $K_{отл}$ .

\* Типичные.

Поскольку подавляющее количество метабазитов в Кейвском домене сосредоточено в пределах патчервтундровской свиты и – в меньшей степени – в низах лебяжинской свиты [10], дополнительно были проведены исследования состава метаосадочных пород этих свит, в результате которых также выявлены черты сходства с древнейшими образованиями указанных регионов [7]. Это позволило предположить, что супракрустальные комплексы патчервтундровской и лебяжинской свит могли формироваться на завершающем этапе более древнего, в сравнении с другими архейскими комплексами региона, цикла.

Однако последние, еще не завершённые исследования авторов не исключают, что петрогеохимические характеристики пород в пределах Кейвского домена могут отражать не состав протолитов супракрустальных ассоциаций, а состав продуктов их метасоматического преобразования.

Приграничное взаимодействие Кейвского домена с окружающими его со всех сторон другими континентально-коровыми образованиями изучено весьма ограниченно. Не выявлен, к примеру, позднеархейский метаморфизм в пределах домена, хотя его коллизионные взаимоотношения с другими доменами коры непременно должны были вызвать низкоградиентный контактовый метаморфизм в периферических областях. По мнению авторов, коллизионные процессы позднеархейского возраста привели к формированию в центральной части Кольского п-ова структуры, сравнимой со срединными массивами современных коллизионных областей, например, с Южно-Китайской или Китайско-Корейской плитой.

## Выводы

1. В пределах Кейвского домена установлено максимальное для архея Кольского региона породное разнообразие. Петрогеохимическая реконструкция геодинамического режима формирования протолитов пород Кейвской структуры позволяет говорить о сходстве как с комплексами внутриплитных структур и интракратонных рифтов, так и с островодужными образованиями, что не только отличает их от других комплексов архея, но и свидетельствует о своеобразии процессов их формирования, причины которого необходимо выяснить в ходе специальных исследований.

2. Сопоставление вещественного состава породных ассоциаций Кейвской структуры с метаморфитами других архейских комплексов северо-востока Балтийского щита, а также Канады и Гренландии, проведенное на основе представительного фактического материала, не позволяет установить их предпочтительную близость к гранит-зеленокаменным или гранулит-гнейсовым типам структур. Несмотря на общую обособленность по петрогеохимическим характеристикам метаморфитов Кейвского домена, отчетливо проявлена генетическая связь их состава с породами архейских структур Кольского региона.

3. Особенности вещественного состава супракрустальных комплексов позволяют предполагать, что их протолиты могли быть древнейшими в пределах Кольского региона образованиями. Однако нельзя исключать, что особенности состава метаморфических пород Кейвского домена могут отражать не состав протолитов супракрустальных ассоциаций, а состав продуктов их метасоматического преобразования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Митрофанов Ф. П., Баянова Т. Б. Кейвский террейн в Кольском раннедокембрийском коллизиионе // Общие вопросы тектоники. М.: Недра, 2000. С. 332–334.
2. Митрофанов Ф. П. Раннедокембрийская геодинамика, магматизм и металлогения Кольской провинции // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 567–570.
3. Митрофанов Ф. П., Баянова Т. Б. Геохронология корообразующих и коропреобразующих процессов при формировании Кольского глубинного раннедокембрийского коллизииона // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты: материалы совещ. М.: ГЕОС, 1996. С. 33–37.
4. Геология архея Балтийского щита / Е. Н. Козлов [и др.]. СПб.: Наука, 2006. 354 с.
5. Геолого-петрогеохимическое своеобразие метаморфитов Кейвского домена / Е. Н. Козлов [и др.] // Наука и образование – 2006: материалы междунар. науч.-техн. конф. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2006. С. 314–317.
6. Эволюция вещественного состава метабазитов раннего докембрия Кольского региона / Н. Е. Козлов [и др.] // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 304–313.
7. Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Мартынов Е. В. Эволюция вещественного состава супракрустальных комплексов архея // Вестник ИГ Коми НЦ СО РАН. 2015. № 1. С. 3–6.
8. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова / А. П. Белолипецкий. Л.: Наука, 1980. 240 с.
9. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:500 000) / А. Т. Радченко [и др.]. СПб.: Наука, 1992. 110 с.
10. Геология рудных районов Мурманской области / В. И. Пожиленко [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 359 с.
11. Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова / О. А. Беляев [и др.]. Л.: Наука, 1977. 88 с.
12. Объяснительная записка к геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1:500 000 / отв. ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты: КНЦ РАН, 1994. 95 с.
13. Балаганский В. В., Глазнев В. Н., Осипенко Л. Г. Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // Геотектоника. 1998. № 2. С. 16–28.
14. Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Сорохтин Н. О. Реконструкция обстановок формирования протолитов раннедокембрийских комплексов (новые подходы) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 2. С. 9–14.
15. Загородный В. Г., Радченко А. Т. Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова. Л.: Наука, 1983. 96 с.
16. Мирская Д. Д. К вопросу о стратиграфии центральной части Кольского полуострова // Материалы по геологии и металлогении Кольского полуострова. Апатиты, 1972. Вып. 3. С. 3–10.
17. Бельков И. В. Кварцитовые сланцы Кейв. М.; Л.: 1963. 321 с.
18. Объяснительная записка к геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1:500000: препринт / А. Т. Радченко [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1994. 95 с.
19. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры / М. В. Минц [и др.] // Тр. ГИН. 1996. Вып. 503. 287 с.
20. Харитонов Л. Я. Структура и стратиграфия карелид восточной части Балтийского щита. Л., 1966. 359 с.
21. Метаморфизм супракрустальных комплексов раннего докембрия: (северо-восточная часть Балтийского щита) / В. П. Петров [и др.]. Л.: Наука, 1986. 272 с.
22. Батиева И. Д. Петрология щелочных гранитоидов Кольского полуострова. Л.: Наука, 1976. 224 с.
23. Суслова С. Н. Полиметаморфизм кристаллических сланцев Западных Кейв // Вестн. ЛГУ. Сер. геол. и геогр. 1957. Вып. 2, № 12. С. 35–43.
24. Щелочные граниты Кольского полуострова / отв. ред. О. А. Воробьева. М.; Л., 1958. 375 с.
25. Zozulya D. R., Bayanova T. B., Nelson Eby G. Geology and age of the late Archean Keivy Alkaline Province, Northeastern Baltic Shield // J. Geol. 2005. Vol. 113. P. 601–608.
26. Сидоренко А. В., Ожогин В. А. Применение аэрофотоснимков для определения первичного генезиса глубокометаморфических щелочных пород Кольского полуострова // ДАН СССР. 1968. Т. 180, № 3. С. 78–85.
27. Минц М. В. История и главные закономерности формирования раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона // Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС: в 2 т. Т. 2. М.: Геокарт-Геос, 2010. С. 309–334.
28. Предовский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л.: Наука. 1980. 152 с.
29. Maynard J. B., Valloni R., Yu H.-S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. Trench-Forearc Geology // Sedimentation and tectonics of modern and ancient plate margins. Oxford. L. Edinburgh. Melbourne. 1982. P. 551–561.
30. Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // J. Geol. 1983. Vol. 91, № 6. P. 611–627.
31. Кудряшов Н. М., Зозуля Д. Р.

Редкоземельные элементы и изотопы неодима в архейских автономных анортозитах Балтийского щита // XVII Симпозиум по геохимии изотопов им. А. П. Виноградова. М., 2004. С. 134.

### **Сведения об авторах**

*Козлов Николай Евгеньевич* – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией Геологического института КНЦ РАН, директор АФ ФГБОУ МГТУ

E-mail: kozlovne@afmgtu.apatity.ru

*Мартынов Евгений Васильевич* – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: mart@afmgtu.apatity.ru

*Сорокhtин Николай Олегович* – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН, профессор кафедры геологии и полезных ископаемых АФ ФГБОУ МГТУ

E-mail: nsorokhtin@mail.ru

*Фомина Екатерина Николаевна* – младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: efom-10@ya.ru

### **Author Affiliation**

*Nikolay E. Kozlov* – Dr. Sci. (Geol.), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Director of the Apatity Branch of the MSTU

E-mail: kozlovne@afmgtu.apatity.ru

*Evgeny V. Martynov* – PhD (Geol.), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: mart@afmgtu.apatity.ru

*Nikolay O. Sorokhtin* – Dr. Sci. (Geol.), Major Researcher of P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Professor of the Apatity Branch of the MSTU

E-mail: nsorokhtin@ocean.ru

*Ekaterina N. Fomina* – Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: efom-10@ya.ru

### **Библиографическое описание статьи**

*Козлов Н. Е.* Особенности вещественного состава Кейвского домена (Кольский полуостров) / *Н. Е. Козлов [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2. – С. 30–38.

### **Reference**

*Kozlov N. E.* Features of Material Composition of the Keivy Domain (the Kola Peninsula) / *N. E. Kozlov [et al.]* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 30–38.

УДК 622.271.45/48:622.88(470.1/2)

## ОСОБЕННОСТИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРА И ЗАПОЛЯРЬЯ РОССИИ

**А. В. Архипов, С. П. Решетняк**  
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

### Аннотация

Проведен анализ нормативных документов (стандартов), регулирующих охрану природы и рекультивацию нарушенных породными отвалами земель, находящихся в регионах Севера и Заполярья России. В современных экономических условиях показана необходимость пересмотра некоторых нормативов проектирования горнодобывающих предприятий в соответствии с международными нормами и правилами. Приведены особенности формирования и размещения породных отвалов, а также технологии их рекультивации в таких регионах, обосновывающие необходимость изменить подходы и требования к рекультивации отвалов.

### Ключевые слова:

*породные отвалы, рекультивация, Север России, нормативы охраны природы.*

## FEATURES OF ROCK DUMPS REMEDIATION FOR NORTHERN AND POLAR REGIONS OF RUSSIA

**Alfred V. Arkhipov, Sergey P. Reshetnyak**  
Mining Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

The authors have analyzed the normative documents (standards) for nature protection and remediation of lands disturbed by rock dumps located in the Northern and Polar Russian regions. Under current economic conditions and in accordance with international standards and regulations, some of mining enterprises project documents should be revised. The article describes particularities in formation and disposition of rock dumps and their remediation technologies in the Northern regions which lead to / require for changes in approaches and requirements to the rock dumps remediation.

### Keywords:

*rock dumps, remediation, Russian North, nature protection standards.*



Вопросы рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами, в особенности отвалообразованием, регулируются целым рядом правовых документов, которые были разработаны и приняты в период 1980–1990-х гг., когда охране окружающей среды стали уделять повышенное внимание. Соответственно, эти нормативные требования давно утратили актуальность. Проектирование карьеров, отвалов вскрышных пород, складов попутно добытых и забалансовых руд требует

иных методических подходов, гармонизированных с нормами промышленно развитых стран. Отсутствие научно обоснованных нормативов по рекультивации территорий, нарушенных горно-обогатительными предприятиями, особенно остро ощущается при проектировании нагорных отвалов на территориях Севера и Заполярья.

Согласно ГОСТ 17.5.1.01-83 «Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения» [1], рекультивация земель – это комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и народнохозяйственной ценности нарушенных земель, а также

на улучшение условий окружающей среды в соответствии с интересами общества. В этом определении основной упор делается на восстановлении продуктивности земель в интересах общества людей, но не в интересах природы в целом.

В «Экологическом энциклопедическом словаре» рекультивация – это искусственное восстановление плодородия почвы и растительного покрова после техногенного нарушения природы [2]. И здесь на первом месте стоит экономическая причина восстановления. Приведенные определения как бы позволяют не предусматривать рекультивацию в тех случаях, когда нет экономической необходимости восстановления земель, то есть когда затраты на рекультивацию не окупятся за счет повышения плодородия почвы.

Горнодобывающим предприятиям невыгодно производить рекультивационные работы и платить за загрязнение окружающей среды. Общество же в целом, осознавая пагубность последствий нарушения и загрязнения окружающей среды, пока не освоило окупаемых по настоящим критериям технологий компенсации нарушений и восстановления природы. Поэтому оно принуждает горные предприятия к реализации природоохранных мероприятий различного рода платежами, налогами, штрафами, что заметно удорожает реализацию проектов освоения месторождений полезных ископаемых.

Если задаться условиями, что природу необходимо меньше травмировать, загрязнять и, по возможности, в кратчайшие сроки восстанавливать, то основными направлениями разработки технологий реабилитации окружающей среды могут быть:

- 1) разработка малоотходных и малозагрязняющих технологий производства;
- 2) проектирование размещения объектов производства с наименьшими нарушениями земной поверхности (к примеру, эстакадные способы или способы с размещением отходов в горных выработках);
- 3) разработка малозатратных и эффективных рекультивационных технологий для быстрой передачи территорий в соответствующие земельные фонды;
- 4) разработка природовосстановительных технологий с учетом региональных природных, экологических и экономических особенностей (к примеру, отсутствие в регионе пахотного земледелия не требует восстановления нарушенных земель до соответствующих критериев).

Если рассматривать размещение отвалов вскрышных пород с перечисленных позиций, то все эти направления можно задействовать при формировании отвалов. Так, использование многоярусных отвалов с малой высотой ярусов (до 30 м) и последовательным поярусным заполнением позволяет в полтора-два раза снизить энергозатраты на транспортировку вскрышных пород [3]. Следствием такой технологии будет сокращение расходов топлива при автотранспорте, парка машин, трудозатрат, загрязнения атмосферы газами и пылью.

Размещение отвалов вдоль периметра границ карьера на поверхности, находящейся на ближайшем расстоянии от этих границ [4], позволит уменьшить земельные отводы предприятий, несмотря на 5–9 %-е увеличение подотвальных площадей под многоярусными отвалами с малой высотой ярусов по сравнению с одноярусными [3].

Первоочередное заполнение участков отвалов, прилегающих к проектным границам, даст возможность начинать рекультивационные работы в более ранние сроки.

И наконец, грамотное и обоснованное использование всех региональных особенностей и условий приведет к снижению затрат на рекультивацию отвалов.

По действующим ГОСТам [1, 5], устанавливающим общие требования к рекультивации земель, в ст. 1.1 указано, что рекультивации подлежат нарушенные земли всех категорий [1]. Наряду с тем, что пунктом не предусмотрена обязательность рекультивации, при разработке проектов ГОСТ обязывает учитывать следующие факторы: природные условия района, расположение нарушенного участка, перспективы развития района, фактическое состояние нарушенных земель, степень естественного зарастания, перспективы использования нарушенных земель, гранулированный и химический составы вскрышных пород и их агрофизические свойства.

Статья 1.6 предписывает, что высота отвалов устанавливается в каждом конкретном случае [1], в то же время ГОСТ [5] ограничивает высоту рекультивируемых внешних отвалов значениями 50–100 м. Означает ли это, что отвалы выше 100 м рекультивировать не требуется?

Статья 1.9 обязывает выколачивать либо террасировать откосы отвалов, освобождать рекультивируемую поверхность от крупногабаритных обломков пород (размер не указан), покрывать поверхности потенциально плодородными слоями почвы (высота слоя не указана) [1]. При этом нет разъяснений, необходимо ли выполнять эти требования, если в этой зоне (по абсолютным высотным отметкам) ничего не растет, например, кроме лишайников.

На основе проведенного краткого анализа правовых документов о рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами, авторы настоящей статьи считают целесообразным пересмотреть положения некоторых статей в соответствии с современными подходами, техническими и региональными особенностями процесса отвалообразования и размещения отвалов. В этой связи в проектной документации по разработке месторождений полезных ископаемых, наряду с разделами об охране окружающей среды, следует в обязательном порядке предусматривать принципиальные проектные решения по рекультивации нарушенных горными работами территорий, но с необходимостью учета региональных особенностей и направлений использования вновь образованных техногенных объектов (карьеров, выработок, складов, отвалов и т. п.).

Так, в регионах Севера и Заполярья следует учитывать естественную зональность распространения растительности в зависимости от абсолютной высотной отметки рельефа. При разработке проектов рекультивации внешних отвалов путем заравнивания откосов и берм нецелесообразно предусматривать биологическую рекультивацию на территориях выше высотных отметок распространения древесной растительности и травостоя.

Суровые климатические условия и большая продолжительность зимнего периода в Заполярье приводят к очень медленному естественному восстановлению растительности при нарушении почвенного покрова, а недостаточная мощность бедных почв исключает пахотное зерновое земледелие.

Длительные наблюдения (в течение нескольких десятков лет) за состоянием откосов и площадок старых отвалов показали, что пылеобразование на породных отвалах низкое и происходит только на площадках разгрузки автосамосвалов и лишь в сухую погоду летнего сезона. После остановки эксплуатации через год-два наступает стабилизация массивов отвалов, деформации уплотнения ярусов больше не происходит, а стабилизированные откосы отвалов не пылят, так как мелкая фракция горной массы, которая может вызвать пылеобразование, проникает за счет осадков в пространство под крупными кусками, а на горизонтальных участках мелкая фракция переуплотнена автотранспортом.

Если произвести рекультивацию откосов отвалов, то на их поверхность придется отсыпать мелкодисперсную фракцию почвообразующих грунтов, что при сухих погодных условиях будет вызывать пыление откосов [6]. С учетом того, что в районах Заполярья, как правило, низкая плотность населения и населенные пункты (города, поселки) размещаются чаще всего на большом расстоянии от карьеров (в Мурманской обл. – рудники АО «Апатит», «Олкон», «Печенганикель», за исключением г. Ковдор, который располагается в 2 км от основных отвалов карьера), то с позиции снижения возможного пыления откосов, с эстетической точки зрения, а также с целью снижения затрат на рекультивацию целесообразно предусматривать биологическую рекультивацию только для откосов, обращенных к близко расположенному населенному пункту.

В нагорных тундровых зонах, где очень часто размещаются горные предприятия, имеющие карьеры и внешние породные отвалы, биологическая рекультивация нарушенных земель практически нецелесообразна, так как по климатическим условиям там ничего, кроме лишайников, не будет расти. Если же нарушены продуктивные участки, на которых росли деревья, чью древесину можно отнести к деловой, то при размещении отвалов на этих участках

нецелесообразно предусматривать рекультивацию таких территорий под выращивание на ней деловой древесины, так как на созревание деревьев до товарных кондиций на Севере и в Заполярье уходит более ста лет, а на склонах крутизной 30–37° заготовка древесины технически очень сложна, опасна и затратна. В подобных случаях расходы, предусмотренные на рекультивацию, целесообразно вложить в оборудование лесного питомника на другой подходящей территории, а рекультивацию отвалов производить после завершения открытых горных работ по более низким требованиям, чем для восстановления до необходимого продуктивного состояния.

Большинство горнодобывающих предприятий Мурманской обл. действует с 1950-х гг., многие отвалы, особенно высокие нагорные, заросли различного вида дикой растительностью, так как время существования старых отвалов уже превышает время зарастания в регионе (40 и более лет). Считаем, что такие отвалы вскрышных и проходческих пород уже не нуждаются в дополнительных рекультивационных работах, тем более если они остались от закрытых в настоящее время рудников.

В современных проектах расширения или реконструкции карьеров рекультивационные работы на отвалах, особенно на действующих, предусматривается производить после достижения отвалом конечных границ. При высоких отвалах, особенно многоярусных, с высотой яруса 80 м и более время начала рекультивации откладывается на десятилетия. Если карьер вскоре после начала рекультивации закрывается и не предусмотрен переход на подземные горные работы, для таких случаев необходимо разработать правовые положения о производителе последующей рекультивации и финансировании этих работ. Одним из способов разрешения подобной ситуации может быть внедрение технологии отвалообразования с использованием ярусов малой высоты (до 30 м) при последовательном поярусном заполнении и постепенной поярусной рекультивации отвала.

Требуется теоретической, нормативной и практической проработки вопрос рекультивации породных отвалов в случаях, когда уложенные породы могут считаться потенциально техногенным сырьем, а отвал – техногенным месторождением. Биологическая рекультивация такого техногенного сырья при флотационной переработке существенно ухудшит извлечение полезного компонента, а удаление заросшего слоя с отвала приведет к дополнительным потерям техногенного сырья.

Таким образом, нормативная документация по формированию и последующей рекультивации техногенных насыпей горных пород (отвалов пород и складов полезных ископаемых) требует обязательного пересмотра, особенно в условиях Севера и Заполярья.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель // Охрана природы. Земли: сборник. М.: Изд-во стандартов, 2002.
2. Экологический энциклопедический словарь. М.: Ноосфера, 2002. 930 с.
3. Архипов А. В., Земцовская Е. В. Выбор рациональной конструкции и высоты породных отвалов // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, (Апатиты, 13–15 октября 2014 г.). СПб., 2014. С. 171–177.
4. Архипов А. В. Формирование и размещение породных отвалов глубоких карьеров в качестве потенциальных техногенных месторождений минерального сырья // Глубокие карьеры: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Апатиты, 18–22 июня 2012 г.). СПб., 2012. С. 282–287.
5. ГОСТ 17.5.1.02-85. Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации // Охрана природы. Земли: сборник. М.: Изд-во стандартов, 2002.
6. Технологии ускоренной биологической рекультивации скальных отвалов / А. Г. Шапарь [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюлл. М., 2006. № 2. С. 217–219.

#### Сведения об авторах

Архипов Альфред Вячеславович – старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: avfred@yandex.ru

Решетняк Сергей Прокофьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: inpit@mail.ru

**Author Affiliation**

*Alfred V. Arkhipov* – Senior Researcher, Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: avfred@yandex.ru

*Sergey P. Reshetnyak* – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: inpit@mail.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Архипов А. В.* Особенности рекультивации породных отвалов на территориях Севера и Заполярья России / *А. В. Архипов, С. П. Решетняк* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 39–43.

**Reference**

*Arkhipov A. V.* Features of Rock Dumps Remediation for Northern and Polar Regions of Russia / *A. V. Arkhipov, S. P. Reshetnyak* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 39–43.

УДК 550.348.098.64(470.21)

## О ПОДХОДАХ К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА И РАЙОНИРОВАНИЮ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫМ ОБЪЕКТАМ

**А. И. Калашник, Д. А. Максимов**  
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

### Аннотация

Оценка сейсмического риска при проектировании производственных объектов осуществляется по картам ОСР-97. Анализ сейсмичности Кольского п-ова показывает, что эта оценка может существенно расходиться со значениями интенсивности колебаний земной поверхности над инструментально зарегистрированными очагами землетрясений. Выявлено, что интенсивность колебаний может превышать допустимые для опасных производственных объектов значения. Предложены методические подходы к оценке сейсмического риска и районированию территории Кольского п-ова.

### Ключевые слова:

*сейсмичность, риск, Кольский п-ов, интенсивность колебаний, районирование.*

## ON APPROACHES TO SEISMIC RISK ASSESSMENT AND ZONING OF THE KOLA PENINSULA

**Anatolii I. Kalashnik, Dmitriy A. Maksimov**  
Mining Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

Seismic risk assessment at designing production facilities is carried out through maps SRF-97. Analysis of the seismicity of the Kola Peninsula shows that such estimates may significantly diverge from the values of the intensity fluctuations on the Earth's surface instrumentally registered above earthquake centres. It has been revealed that the intensity of these fluctuations may exceed permissible values for hazardous production facilities. Methodical approaches have been offered for seismic risk assessment and zoning of the Kola Peninsula.

### Keywords:

*seismic risk, the Kola Peninsula, the intensity of the vibrations, zoning.*



### Введение

Сейсмическое районирование территории Российской Федерации осуществляется по картам ОСР-97 из СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» [1] (является актуализированной редакцией СНиП II-7-81\* [2]). На рис. 1 представлена карта сейсмического районирования ОСР-97-С, учитывающего сейсмособытия, вероятность которых не ниже 1 % за 50 лет для территории европейской части России.

По данным карты ОСР-97-С, вся территория Кольского п-ова характеризуется слабой сейсмичностью с максимальной интенсивностью 7 баллов движения земной поверхности в результате землетрясений.

При изучении сейсмичности слабосейсмичных регионов России и других стран исследователями отмечалось, что оценка сейсмической опасности по нормативным документам часто может быть существенно заниженной за счет целого ряда неучтенных факторов [3].

В связи с этим следует ожидать, что оценка сейсмической опасности по картам ОСР-97 для территории Кольского п-ова, вероятно, также занижена. Поэтому в данной работе выполнен анализ данных о произошедших здесь зарегистрированных сейсмических событиях, в том числе энергонасыщенности массивов пород в приповерхностной части земной коры.

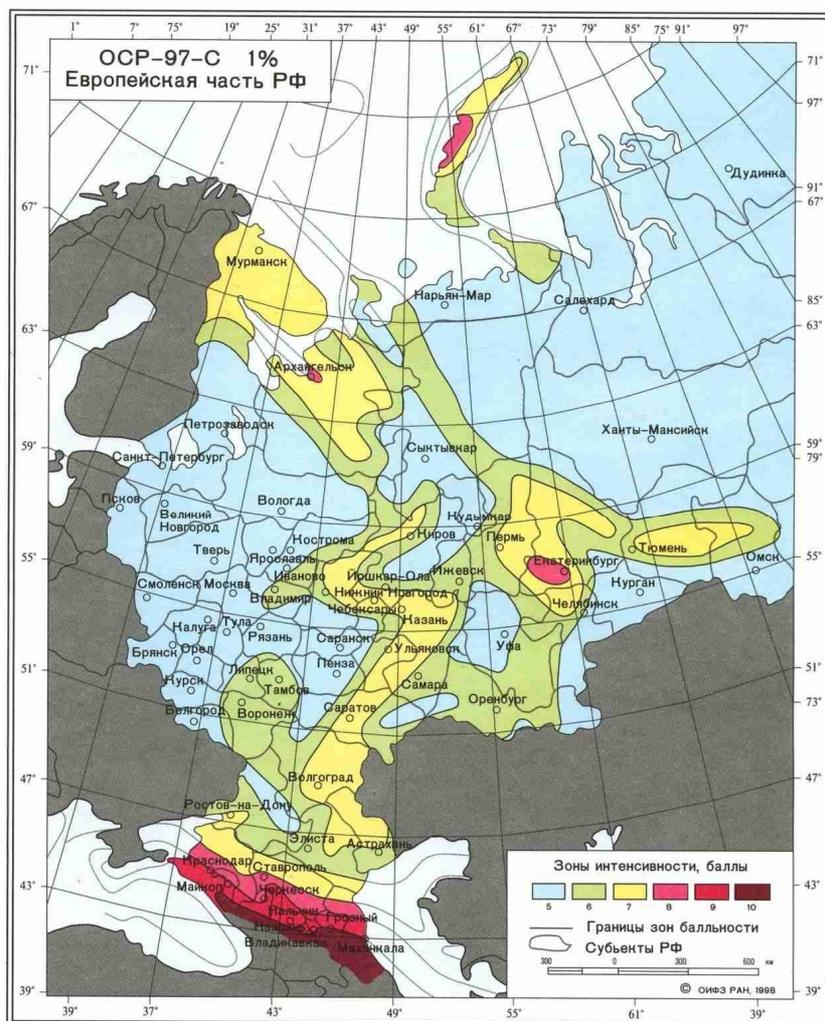


Рис. 1. Карта ОСР-97-С для европейской части России. Степень сейсмической опасности «С» (1 % за 50 лет) [2]

### Сейсмичность Кольского полуострова

На основе «Сводного каталога сейсмособытий Кольского полуострова» [4] авторами настоящей статьи выполнены обобщение, систематизация, а также анализ имеющихся данных. Выявлено, что в целом сейсмичность Кольского п-ова характеризуется относительно стабильным по годам уровнем распределения энергии, выделяющейся в результате сейсмособытий, о чем может свидетельствовать построенный авторами график Бенъоффа, характеризующий накопление высвобожденной в результате тектонических сейсмособытий энергии деформирования (рис. 2).

Как видно из табл. 1, наибольшее число землетрясений (более 90 %) имело магнитуду в диапазоне от 1 до 4. Вместе с тем, «Сводный каталог сейсмособытий» [4] содержит информацию как минимум о двух сейсмособытиях магнитудой 5 и выше, то есть вероятность землетрясения магнитудой 5 на Кольском п-ове за 50 лет статистически приближается к 100 %.

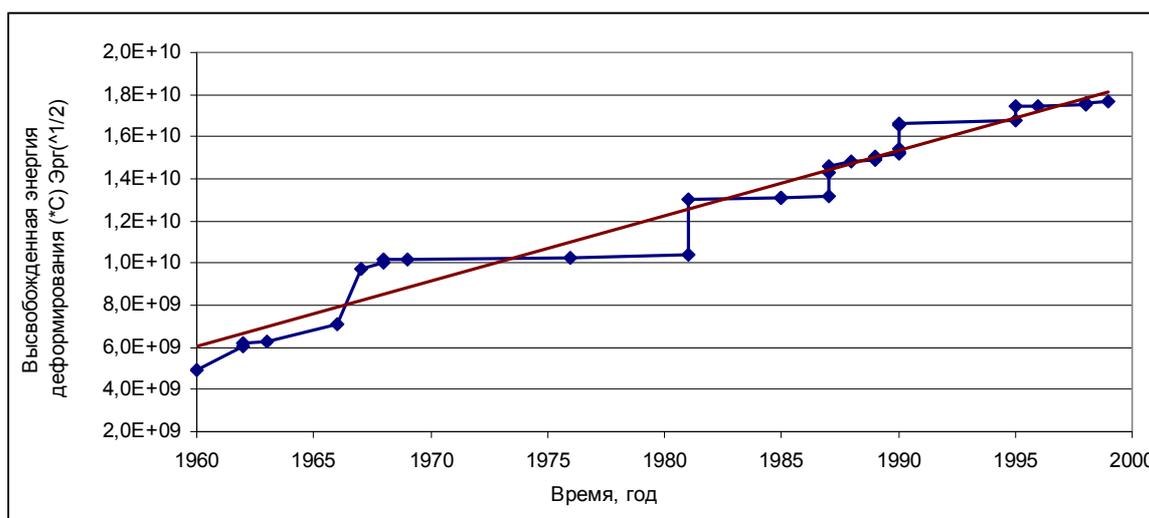


Рис. 2. График Бенъофа для тектонических землетрясений Кольского п-ова за период 1960–2000 гг.

### Анализ данных о сейсмособытиях

Информация о количестве землетрясений в зависимости от их магнитуды (с шагом 0.5) за последние 100 лет сведена в табл. 1.

Таблица 1

Распределение количества сейсмособытий на Кольском полуострове в зависимости от их магнитуды

Диапазон магнитуды	0–0.5	0.5–1	1–1.5	1.5–2	2–2.5	2.5–3	3–3.5	3.5–4	4–4.5	4.5–5	5–5.5
Количество сейсмособытий	1	7	10	45	29	41	26	10	4	2	2

Чтобы ответить на вопрос о возможности превышения фактической степени сейсмической опасности над определяемой по картам ОСР-97, необходимо перейти от магнитуды землетрясения к интенсивности колебания земной поверхности. Данный переход необходим для решения задач районирования, так как ущерб, причиняемый землетрясением сооружениям, зависит не только от магнитуды сейсмособытия, но и от глубины его очага и расстояния от эпицентра до рассматриваемого объекта. Очевидно, что наибольшее значение интенсивности колебаний земной поверхности наблюдается в эпицентре сейсмособытия, поэтому выявим распределение интенсивности колебаний земной поверхности над очагом сейсмособытия в зависимости от его магнитуды и глубины гипоцентра. Расчет интенсивности произведен по формуле Блэйка – Шебалина [5]:

$$I = 1.5M - 3.5 \lg(\sqrt{r^2 + h^2}) + 3.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2. В графическом виде результаты расчета интенсивности колебаний земной поверхности над очагом землетрясения представлены на рис. 3 в виде зависимости интенсивности от глубины и магнитуды землетрясения.

Таблица 2

Распределение интенсивности колебаний земной поверхности над очагом землетрясения от его магнитуды и глубины гипоцентра [6]

Глубина, км	Магнитуда, балл									
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
1.0	3.8	4.5	5.3	6.0	6.8	7.5	8.3	9.0	9.8	10.5
1.5	3.1	3.9	4.6	5.4	6.1	6.9	7.6	8.4	9.1	9.9
2.0	2.7	3.4	4.2	4.9	5.7	6.4	7.2	7.9	8.7	9.4
2.5	2.4	3.1	3.9	4.6	5.4	6.1	6.9	7.6	8.4	9.1
3.0	2.1	2.8	3.6	4.3	5.1	5.8	6.6	7.3	8.1	8.8
3.5	1.8	2.6	3.3	4.1	4.8	5.6	6.3	7.1	7.8	8.6
4.0	1.6	2.4	3.1	3.9	4.6	5.4	6.1	6.9	7.6	8.4
4.5	1.5	2.2	3.0	3.7	4.5	5.2	6.0	6.7	7.5	8.2
5.0	1.3	2.1	2.8	3.6	4.3	5.1	5.8	6.6	7.3	8.1
5.5	1.2	1.9	2.7	3.4	4.2	4.9	5.7	6.4	7.2	7.9
6.0	1.0	1.8	2.5	3.3	4.0	4.8	5.5	6.3	7.0	7.8
6.5	0.9	1.7	2.4	3.2	3.9	4.7	5.4	6.2	6.9	7.7
7.0	0.8	1.5	2.3	3.0	3.8	4.5	5.3	6.0	6.8	7.5
7.5	0.7	1.4	2.2	2.9	3.7	4.4	5.2	5.9	6.7	7.4
8.0	0.6	1.3	2.1	2.8	3.6	4.3	5.1	5.8	6.6	7.3
8.5	0.5	1.2	2.0	2.7	3.5	4.2	5.0	5.7	6.5	7.2
9.0	0.4	1.2	1.9	2.7	3.4	4.2	4.9	5.7	6.4	7.2
9.5	0.3	1.1	1.8	2.6	3.3	4.1	4.8	5.6	6.3	7.1
10	0.3	1.0	1.8	2.5	3.3	4.0	4.8	5.5	6.3	7.0

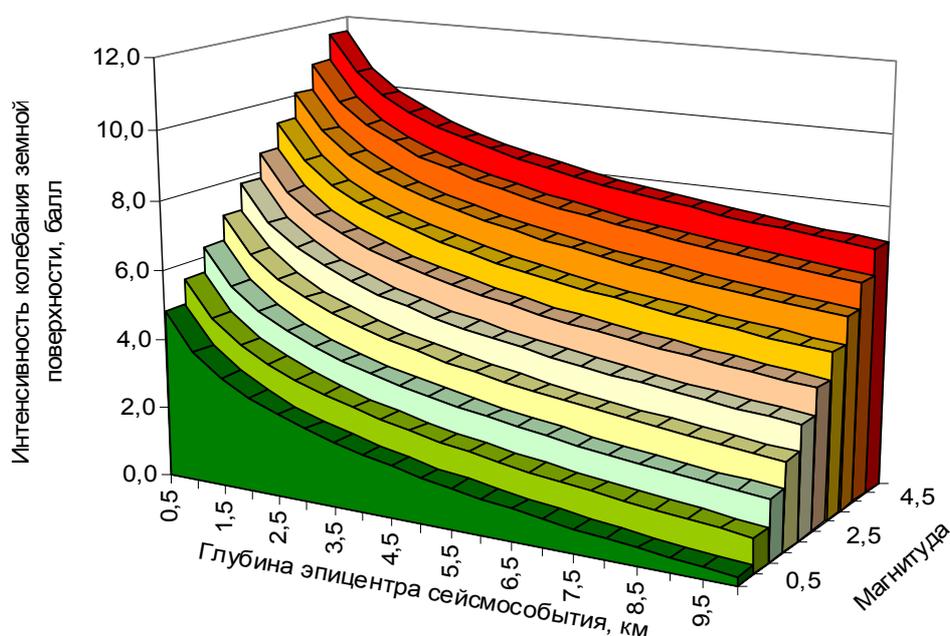


Рис. 3. Зависимость интенсивности колебаний земной поверхности над эпицентром землетрясения от его глубины и магнитуды

### Обсуждение результатов

Из сопоставления данных табл. 1 и 2 видно, что интенсивность колебаний земной поверхности над очагом землетрясения для зарегистрированных на Кольском п-ове сейсмособытий может значительно превышать максимальное значение для карты ОСР-97 в 7 баллов. Так, при землетрясении магнитудой 5 интенсивность колебания земной поверхности в эпицентре будет превышать значение в 7 баллов даже при глубинах гипоцентра землетрясения около 10 км. Интенсивность колебания земной поверхности может еще более существенно превысить значение в 7 баллов при небольшой глубине очага сейсмособытия, что представляется вполне вероятным для Кольского п-ова, характеризующегося малой мощностью осадочных отложений (до первых сотен метров).

Из сказанного выше следует, что районирование территории Кольского п-ова по картам ОСР-97 может существенно расходиться с действительными значениями интенсивности колебаний земной поверхности, возможными для данного региона на рассматриваемых промежутках времени. Но эти факты еще не могут однозначно свидетельствовать о важности данной проблемы, поэтому необходимо в первую очередь выяснить, входят ли значения интенсивности колебаний земной поверхности, определяемой разными методами, в диапазон опасных значений. Для этого на примере таких потенциально опасных линейно-протяженных объектов, как магистральные трубопроводы и насыпные гидротехнические сооружения (ГТС) [7], определим значения интенсивности, характеризующие разные степени опасности для объектов.

В соответствии с СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы» [8], актуализированной редакцией СНиП 2.05.06-85\* [9], выделяются два опасных значения:

- для магистральных надземных трубопроводов – 6 баллов;
- для магистральных подземных трубопроводов – 8 баллов.

Если обратиться к работам по описанию международной шкалы сейсмической интенсивности MSK-64, то классификацию опасных значений для трубопроводов можно расширить, добавив, например, значение интенсивности в 7 баллов, при котором возможны разрушения стыков подземных трубопроводов [10]. На основании нормативных документов и описания шкалы сейсмической интенсивности MSK-64 нами определена зависимость разрушений магистрального трубопровода от интенсивности колебаний земной поверхности (табл. 3).

Таблица 3

Влияние интенсивности сейсмического воздействия на целостность магистрального трубопровода

Сейсмичность, балл	Надземный	Подземный
0–6	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют
6–7	Разрушение трубопровода	То же
7–8	То же	Нарушение стыков трубопровода
8–12	«	Разрушение трубопровода

Согласно нормативным документам, критериями оценки опасности ГТС по сейсмичности являются следующие [1, 11]:

- 8 баллов и выше – высокий уровень опасности;
- от 7 до 8 баллов – средний уровень опасности;
- менее 7 баллов – низкий уровень опасности.

Как видно из приведенной информации, показатели интенсивности колебания земли в эпицентре землетрясений на территории Кольского п-ова могут попадать в диапазон опасных значений для рассмотренных линейно-протяженных объектов. Особенно актуальна данная проблема для ГТС, у которых проектным является землетрясение с повторяемостью 1 раз в 500 лет

[1]. В связи с этим возникает вопрос об источнике информации для оценки сейсмической опасности для инженерных сооружений и районирования линейных протяженных объектов.

### О районировании Кольского полуострова

Одним из таких источников может стать схема районирования Кольского п-ова с выделением сейсмогенных зон. Первая подобная схема опубликована Г. Д. Панасенко в 1969 г. [12]. За следующие 50 лет она претерпела ряд изменений, связанных с появлением дополнительной информации о сейсмичности и тектонофизических особенностях Балтийского щита, и приняла вид, представленный на рис. 4 [13].

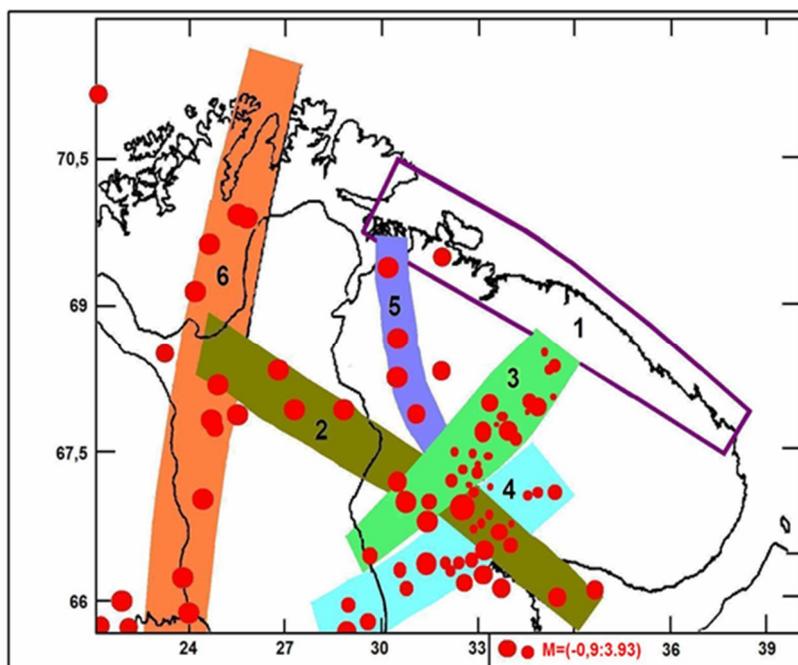


Рис. 4. Схема сейсмогенных зон Кольского п-ова с эпицентрами землетрясений (по данным цифрового сейсмомониторинга за период 1998–2009 гг.). Главные сейсмогенные зоны: 1 – Мурманская («спящая» в настоящее время); 2 – Кандалакшская; 3 – Хибинско-Ловозерская; 4 – Куусамо-Порьегубская; 5 – Варангер-Кандалакшская; 6 – Ботний-Финнмаркская

Еще одним источником информации для оценки сейсмической опасности может служить карта зон повышенной энергонасыщенности массивов горных пород. Идея сейсмического районирования на основании карт энергонасыщенности заключается в измерении математическими и другими методами распределения энергии, которая способна высвободиться в результате землетрясения, с поиском районов концентрации тектонических напряжений. Примером может служить схема, составленная сотрудниками Горного института КНЦ РАН (рис. 5) [14].

На рис. 5 представлены зоны повышенной энергонасыщенности для главных напряжений ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ) относительно усилий, действующих на границе Евразийской плиты, то есть зоны концентрации тектонических напряжений. При рассмотрении фактора сейсмичности указанные зоны потенциально опасны ввиду повышенных уровней напряжений.

Сравнив потенциально опасные зоны, приведенные на рис. 4 и 5, видим их сходство по локализации сейсмогенных зон, что может свидетельствовать о достаточном уровне объективности данных методов относительно оценки сейсмичности по картам ОСР-97.

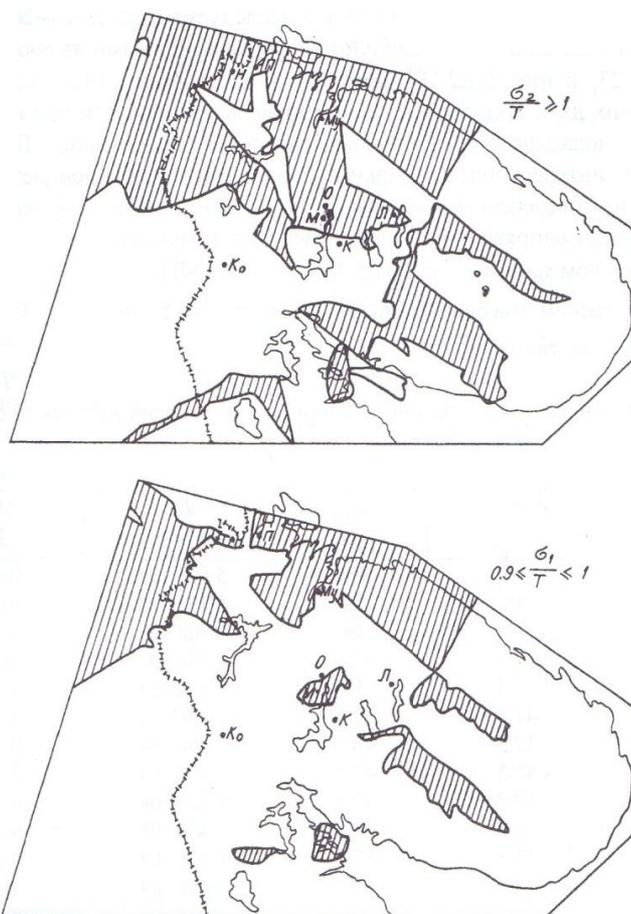


Рис. 5. Зоны повышенной энергонасыщенности массивов горных пород на территории Кольского полуострова с учетом геологического строения блоков III ранга [14]: К – Кировск, М – Мончегорск, О – Оленегорск, Му – Мурманск, П – Печенга, Н – Никель, Л – Ловозеро, Ко – Ковдор

## Выводы

Выполненный анализ свидетельствует о том, что использование карт ОСР-97 не в полной мере обеспечивает точность оценки уровня сейсмической опасности для проектируемых и эксплуатируемых производственных объектов Кольского п-ова, прежде всего линейно-протяженных.

Рассчитанные значения интенсивности колебаний земной поверхности в результате ряда землетрясений, зафиксированных на Кольском п-ове, превышают 7 баллов, положенных в основу карт ОСР-97. Для линейно-протяженных объектов эти превышения могут иметь критические значения.

Подходы к районированию территории Кольского п-ова должны базироваться на детализации карт ОСР-97 схемами выделенных сейсмогенных зон и зон повышенной энергонасыщенности массивов пород приповерхностной части земной коры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Строительство в сейсмических районах: свод правил СП 14.13330.2014. Введ. 2014-01-06. М.: Минстрой России, 2014. 131 с.
2. Строительные нормы и правила Российской Федерации «Строительство в сейсмических районах»: СНиП II-7-81\*. Введ. 2000-01-01. М.: Госстрой России, 2000.
3. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий / Т. С. Блинова [и др.]; ГИ УрО РАН. Пермь, 2015. 178 с.
4. Годзиковская А. А., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А. Ретроспективный анализ первичных материалов

о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке / отв. ред. А. Н. Виноградов. М.: Ваш полиграфический партнер, 2010. 130 с. **5.** Сейсмическое районирование территории СССР / отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с. **6.** Максимов Д. А. К вопросу о тектонофизических исследованиях северо-восточной части Балтийского щита // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы Второй молодежной школы-семинара. М.: ИФЗ, 2011. Т. 1. С. 164–168. **7.** Научно-организационные основы геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов в регионе Баренцева моря в целях защиты окружающей природно-технической среды / Н. Н. Мельников [и др.] // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 6. С. 5–10. **8.** Магистральные трубопроводы: свод правил СП 36.13330.2012. Введ. 2013-01-01. М.: Минстрой России, 2013. 131 с. **9.** Строительные нормы и правила Российской Федерации «Магистральные трубопроводы»: СНиП 2.05.06-85\*. Введ. 1986-01-01. М.: Госстрой России, 1997. **10.** Медведев С. В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 151–160. **11.** Гидротехнические сооружения. Основные положения: свод правил СП 58.13330.2012. Введ. 2012-01-07. М.: Минрегион России, 2011. 43 с. **12.** Панасенко Г. Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л.: Наука, 1969. 184 с. **13.** Панасенко Г. Д. Сейсмичность восточной части Балтийского щита // Сейсмичность и современные движения земной коры восточной части Балтийского щита. Апатиты: КФАН СССР, 1980. С. 7–23. **14.** Сейсмичность при горных работах. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 325 с.

### Сведения об авторах

*Калашник Анатолий Ильич* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Горного института КНЦ РАН

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

*Максимов Дмитрий Анатольевич* – младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: diman51rus@mail.ru

### Author Affiliation

*Anatolii I. Kalashnik* – PhD (Eng.), Head of Laboratory of the Mining Institute of the KSC of the RAS

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

*Dmitry A. Maksimov* – Junior Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: diman51rus@mail.ru

### Библиографическое описание статьи

*Калашник А. И.* О подходах к оценке сейсмического риска и районированию Кольского полуострова применительно к поверхностным линейно-протяженным объектам / *А. И. Калашник, Д. А. Максимов* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 44–51.

### Reference

*Kalashnik A. I.* On Approaches to Seismic Risk Assessment and Zoning of the Kola Peninsula in Relation to the Surface Linearly Extended Objects / *A. I. Kalashnik, D. A. Maksimov* // *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. – 2016. Vol. 2 (25). – P. 44–51.

УДК 551.578.48:551508.77(470.21)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЛОНА И СНЕЖНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ

С. В. Лукичев, А. Н. Любин, С. В. Звонарёва  
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

### Аннотация

Разработана трехмерная ячеистая модель снегонакопления, реализующая средства хранения данных параметров склона и числовой информации, которые оказывают влияние на показатели устойчивости снежного покрова в лавинных очагах. Приведено описание методики мониторинга снегонакопления на горных склонах в приложении Geotech-3D горно-геологической информационной системы MINEFRAME. Показано, что лавиноопасные территории устанавливаются путем анализа соответствия их условий геоморфологическим (рассчитываемым по цифровой модели) и метеорологическим (полученным по результатам наблюдений) параметрам.

### Ключевые слова:

*лавинная опасность, мониторинг снегонакопления, цифровая модель, ячеистая структура, лазерное сканирование, снежная толща.*

## MODELING OF SNOW SLOPE AND SNOW COVER TO ASSESS AVALANCHE HAZARD

Sergey V. Lukichev, Alexander N. Lyubin, Svetlana V. Zvonareva  
Mining Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

A 3D network model of snow accumulation has been developed to store data regarding slope parameters and numerical information impacting indicators of snow cover stability in avalanche sources. A method to monitor snow accumulation in snow slopes has been described by Geotech-3D application from the MINEFRAME mining-geological information system. The avalanche hazardous areas are shown to be detectable by analyzing the accordance of their conditions with geomorphologic (calculated by a numerical model) and meteorological (obtained by observations results) parameters.

### Keywords:

*avalanche hazard, snow accumulation monitoring, numerical model, network structure, laser scanning, snow stratum.*



### Введение

Среди прочих стихийных природных явлений снежные лавины способны вызвать гибель людей и причинить значительные разрушения. В разное время на территории Российской Федерации такие случаи неоднократно происходили. Наиболее известны трагические события 5 декабря 1936 г.

в Хибинах, когда двумя сошедшими подряд лавинами была уничтожена часть поселка Кукисвумчорр [1]. Ограниченные сведения о катастрофических лавинах содержатся в Кадастре лавин СССР [2]. При этом следует отметить, что размер лавин не имеет решающего значения для возможного ущерба и гибели людей. Статистика жертв утверждает, что почти половина

их гибнет под небольшими лавинами, которые проходят путь не более 200 м [3]. Из чего следует, что оценка любой лавинной опасности – актуальная часть комплекса основных задач противолавинных мероприятий, таких как защита от лавинных очагов, угрожающих конкретным хозяйственным объектам, и предупреждение попадания в лавины людей, передвигающихся по хозяйственно не освоенным территориям, где угрозу может представлять любой горный склон.

Кардинальным решением для предотвращения ущерба от лавин является запрещение строительства и размещения людей в лавиноопасных районах. По определенным причинам такой вариант не всегда приемлем. В этой связи разработан и с разной степенью успеха применяется целый комплекс противолавинных мероприятий [4]. Выявление лавиноопасных территорий и определение параметров явления, организация службы прогноза времени схода лавин, строительство защитных сооружений, предупредительный спуск лавин – эти действия направлены на предотвращение ущерба от лавин. Характер их влияния на процесс образования лавин различен. Инженерные сооружения различных типов препятствуют образованию лавин; профилактический спуск и некоторые типы защитных сооружений обеспечивают контролируемый сход (время обрушения, размер, направление движения и дальность выброса). Изыскательские работы и прогноз времени схода лавин способствуют организации хозяйственной деятельности в лавиноопасных районах и недопущению попадания людей на опасные в определенный момент времени территории. Наибольшая эффективность достигается, как правило, при сочетании различных противолавинных мероприятий.

Принятое в гляциологии понятие «прогноз схода лавин» (прогноз лавинной опасности) подразумевает предсказание периода лавинной опасности, времени и масштабов схода [5]. Обеспечение прогноза всегда требует создания информационно-методической базы.

Сбор информации, хранение и обработка ее в необходимом количестве в условиях лавинной опасности – трудоемкий и сложный процесс. Причины заключаются в сложности получения характеристик состояния снега в лавинных очагах, значительных погрешностях их измерения, а также в невозможности экстраполяции полученных в одной точке (точка-репер) данных на всю поверхность лавинного очага по причине значительной изменчивости рельефа склона, строения и свойств снега. Причины, подобные этим, и в смежных науках о Земле стали поводом смены традиционных бумажных носителей информации на цифровые карты и компьютерные базы данных с последующим развитием принципиально новой технологии геоинформационных систем (ГИС). В общем виде роль ГИС-технологий в лавинных исследованиях сводится к синтезу знаний о рельефе, климате и предшествующих событиях, которые входят в математические модели оценки устойчивости снежного покрова на всем склоне и на отдельных его участках.

Возможности ГИС позволяют сформировать массив расчетных параметров для моделирования распределения снега в зонах лавинообразования. С этой целью оцифровываются уже готовые карты, и в среде ГИС на генерируемой карте углов наклона горных склонов выделяются участки с наиболее благоприятными условиями для возникновения лавин. Причем лавиноопасные территории устанавливаются путем анализа соответствия их условий геоморфологическим (рассчитываемым по цифровой модели) и метеорологическим (полученным по результатам наблюдений) параметрам.

Подобные задачи всегда приходится решать, когда исследованиями проекта ГИС-технологий являются объекты, связанные с освоением горной территории. Базовой основой таких проектов служат, как правило, крупномасштабные карты. Они охватывают небольшие по площади территории: лавиноопасный склон, долину или отдельный горный хребет. В таком случае проект можно реализовать с использованием какой-либо из тиражируемых геоинформационных систем или для его реализации надо будет разработать специальную систему мониторинга, основанную на принципах ГИС-технологий.

Существующие компьютерные технологии инженерного обеспечения горных работ при освоении месторождений твердых полезных ископаемых постоянно развиваются

и дополняются моделями горно-геологических объектов. Такая методология создания информационных систем позволяет комплексно решать задачи крупномасштабных горных работ.

Ниже приведено описание подсистемы мониторинга снегонакопления на горных склонах в приложении Geotech-3D горно-геологической информационной системы MINEFRAME [6]. Целью разработки этой подсистемы является развитие компьютерных методов создания информационно-методической базы и оперативной оценки лавиноопасных территорий, в том числе на труднодоступных горных склонах.

### Методика мониторинга лавиноопасного склона

Многолетний опыт исследований позволил выявить определенные закономерности образования и обрушения лавин. В процессе анализа обрушений лавин были выявлены общие для различных горных регионов основные факторы и определен характер их воздействия на лавинообразование. Среди таких факторов отмечена крутизна склона, которая определяет критическую высоту снега [7].

Детальными крупномасштабными исследованиями с использованием натуральных наблюдений и расчетов, изучением геоморфологических, геоботанических, почвенных и гидрологических признаков в различных регионах было установлено, что наиболее благоприятны для лавинообразования склоны, угол наклона которых составляет 25–40° [9, 10]. На склонах этой группы происходит обрушение лавин при повреждении устойчивости снежного пласта на склоне под воздействием внешних факторов и вызванных их влиянием процессов внутри снежной толщи. Подобные процессы и условия погоды сильно влияют на механические свойства снега. Поэтому на типовых снеголавинных станциях (СЛС) ведутся регулярные наблюдения за плотностью снега, временным сопротивлением сдвигу и разрыву (пределом прочности на сдвиг и разрыв). Дополнительно могут измеряться влажность, твердость, предел прочности снега на сжатие и коэффициент трения.

Измеренные значения характеристик используются в расчетных моделях для оценки устойчивости снежного покрова на склоне постоянной крутизны и достаточно большой протяженности путем проверки выполнения следующих неравенств [1]:

$$\tau \leq \tau_c \text{ или } \alpha \leq \psi,$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига на контакте снежного пласта с подстилающей поверхностью;  $\tau_c$  – временное сопротивление сдвигу для опасного горизонта;  $\alpha$  – угол склона или поверхности скольжения;  $\psi$  – угол сопротивления сдвигу.

Степень устойчивости снежного покрова определяется коэффициентом устойчивости:

$$\gamma = \tau_c / \tau = \text{tg } \psi / \text{tg } \alpha.$$

Если это отношение больше единицы, лавинная опасность отсутствует. Когда значение коэффициента устойчивости равно единице, снежный покров находится в состоянии предельного равновесия, то есть может соскользнуть со склона при незначительном увеличении нагрузки или уменьшении удерживающих сил. Если же его значение менее единицы, это указывает на неустойчивое состояние снега на склонах, когда он удерживается силами, не принятыми в расчет, которые могут быть незначительными по сравнению с другими (обычно это силы на контурах пласта – силы сопротивления разрыву, сдвигу и сжатию). В таком случае достаточно случайного толчка или нарушения целостности снежного покрова, чтобы связи на контурах пласта и подстилающей поверхности были уничтожены и сошла лавина.

Расчеты устойчивости дают возможность оценить степень лавинной опасности при известном на какой-то момент состоянии снежной толщи. Для того чтобы определить время наступления лавинной опасности, необходимо предвидеть возможные изменения прочностных характеристик снежной толщи и снеговой нагрузки в зависимости от изменения погоды. Первое из этих двух условий оценивается по тенденции изменения временного сопротивления сдвигу или с помощью коррелятивных связей, полученных эмпирическим путем и позволяющих с использованием данных полевых измерений определить критическую высоту слоя снега, силу

сцепления у нижней границы слоя и предельный для данных условий угол наклона склона. Второе условие выявляется по выпадению количества осадков [1].

Таким образом, в простейшем виде методику оценки степени устойчивости снежного покрова при сдвиговом механизме лавинообразования можно свести к сравнению критической высоты снега с изменяющейся его фактической высотой на горном склоне произвольной конфигурации.

Расчет критической высоты снега  $H_{кр}$  (м) производится по формуле

$$H_{кр} = k \tau_c / \rho,$$

где  $k$  – поправочный коэффициент при сдвиге по наклонной плоскости;  $\rho$  – плотность снега, т/м<sup>3</sup>.

В этом случае показатели пространственного распределения снежного покрова на склоне горы выступают главным элементом информативной характеристики лавинной опасности.

Для своевременного прогнозирования лавиноопасных ситуаций СЛС необходима информация о толщине снега в лавиносборах. Традиционно сведения о состоянии снежного покрова, включая его толщину, как правило, ограничивались точечными измерениями в небольшом количестве доступных мест. При этом подавляющая часть площади снежного покрова в лавинных очагах остается вне зоны оценки. Как следствие, оперативная оценка с одинаковой плотностью распределения показателей снежного покрова по всей площади, в том числе на труднодоступных горных склонах, играет определяющую роль в информационном обеспечении лавинной опасности.

В настоящее время разработаны технологии оперативных снегомерных съемок методом воздушного или наземного трехмерного лазерного сканирования, включающие проведение двух последовательных этапов съемок лавиноопасной местности [11]. На первом этапе производится одна съемка (базовая) в период, предшествующий установлению снежного покрова (летнее измерение). Вторая и последующие съемки производятся на втором этапе – при наличии снежного покрова (зимние измерения). Задача этих съемок состоит в получении высокоточных цифровых моделей соответственно рельефу поверхности Земли и поверхности снежного покрова. Для этого импульсным наземным лазерным дальномером измеряется расстояние от места его установки в долине до контрольных точек в зоне зарождения лавин относительно точки-репера. Накопленный массив координат точек съемки используется для построения компьютерных моделей соответствующих поверхностей. Затем по разнице высотных отметок в точках измерений в летний период (при отсутствии снега) и в зимний период (при наличии снега) определяется толщина снежного покрова. Созданные подобным образом поверхности вполне можно представить в стандартных форматах файлов DXF, IGES, VRML, SAT, STL, DGN и экспортировать в любые CAD и 3D-приложения. Здесь важно отметить, что базовая цифровая модель рельефа используется для получения комплекса производных морфометрических показателей, характеризующих условия устойчивости снега на горных склонах. Среди них: гипсометрия, углы наклона, экспозиция склона, густота горизонтального и вертикального расчленения поверхности, параметры растительности и др. Это позволит повысить надежность оценки устойчивости снежного покрова на всем склоне и на отдельных его участках. Причем надежность такой оценки снежного покрова, который имеет изменяющуюся толщину и значительную пространственную вариацию параметров, лежит на горном склоне произвольной конфигурации и удерживается силой трения, будет зависеть от количества точек замера на склоне и точности лазерной съемки, в значительной степени определяемой параметрами аппаратуры.

Развитие технологии трехмерного лазерного сканирования ведет к появлению на рынке все новых производителей сканеров. В настоящее время компании-производители лазерных сканеров предлагают довольно широкий выбор разнообразных моделей [12].

Правильный выбор лазерного сканера в соответствии с требованиями технологии работ – от съемки до создания компьютерной модели и выдачи результатов – также один из факторов повышения надежности оценки лавинной опасности.

Таким образом, технологии оперативных снегомерных съемок методом трехмерного лазерного сканирования с последующим построением компьютерных моделей поверхности съемки позволяют дистанционно контролировать толщину снежного покрова на лавиноопасном склоне и тем самым обеспечить своевременное принятие решения о закрытии зоны поражения лавиной, а также о начале принудительного спуска лавины. Представленный подход к контролю лавиноопасного склона стимулирует исследование физических процессов в снежном покрове и построение компьютерных моделей для решения трехмерных задач оценки смещения снега относительно склона.

### Реализация подсистемы контроля снегонакопления на склонах

В настоящее время на Оленьем Ручье ЗАО «Северо-Западная Фосфорная Компания» ведет строительство горнопромышленного комплекса для разработки месторождения с одноименным названием. Все основные производственные объекты этого комплекса (карьер, подземный рудник, обогатительная фабрика, ремонтные, транспортные и энергетические объекты) размещены компактно на одной промышленной площадке у подножия г. Суолауйв (юго-восточные отроги Хибинского горного массива), ее склоны в районе расположения указанных объектов лавиноопасны. В этой связи возникла необходимость обеспечения службы противолавинной защиты строящегося предприятия современными инструментальными и программными средствами контроля высоты снежного покрова для оперативной оценки и принятия решений по проведению противолавинных мероприятий с учетом реального рельефа лавиноопасных склонов.

Решение данной задачи начато в Горном институте КНЦ РАН совместно со специалистами ЗАО «Северо-Западная Фосфорная Компания». Для ее реализации на основе цифрового моделирования склона г. Суолауйв в приложении Geotech-3D горно-геологической информационной системы MINEFRAME разрабатывается подсистема мониторинга снегонакопления в зонах лавинной опасности. Эта система позволяет выполнять цифровое моделирование рельефа гористой поверхности и снежного покрова на ней.

Модель снегонакопления представляет собой ограниченный контур, внутри которого расположена ячеистая структура (рис. 1). Каждая ячейка – также контур, высотные отметки которого спроецированы на каркасную модель поверхности. Длина и ширина прямоугольных ячеек задаются пользователем. Ячейка соответствует точке замера параметров снежной толщи: объема снега в границах ячейки, площади поверхности, среднего угла наклона, нормальной мощности, коэффициента сдвига.

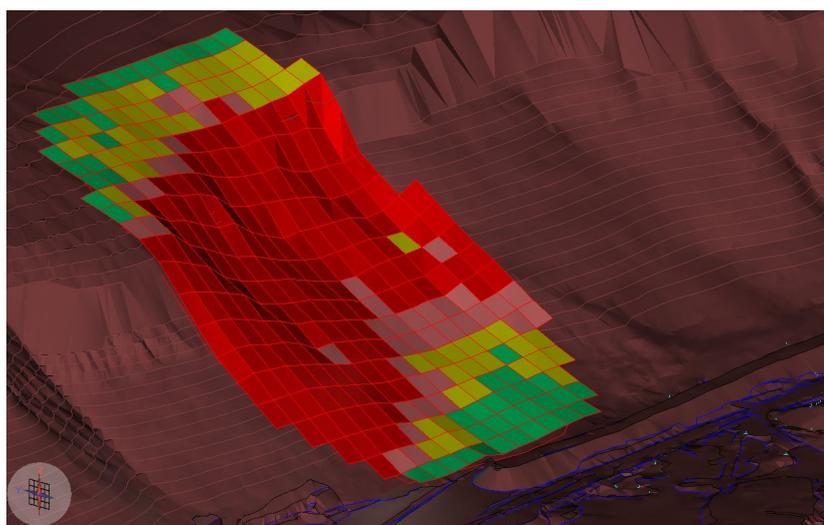


Рис. 1. Модель снегонакопления

Для расчета среднего угла наклона ячейки относительно горизонтальной плоскости строится пара треугольников, покрывающих ее поверхность. Из центра каждого треугольника находится нормаль к его плоскости. Средний угол между найденными нормальными и горизонтальной плоскостью (XY) и будет средним углом наклона ячейки (рис. 2). На основе значений угла наклона рассчитывается коэффициент сдвига.

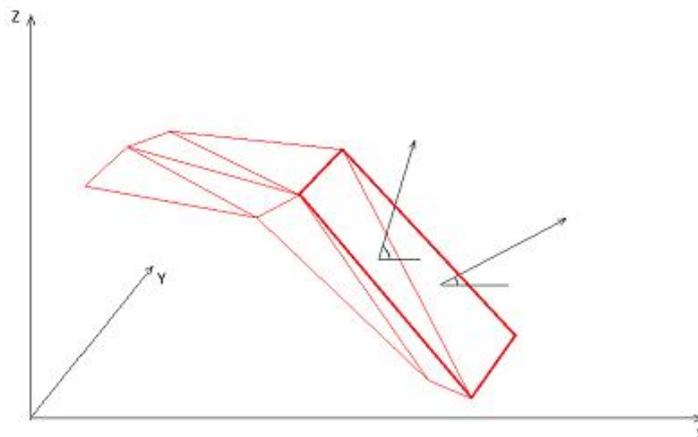
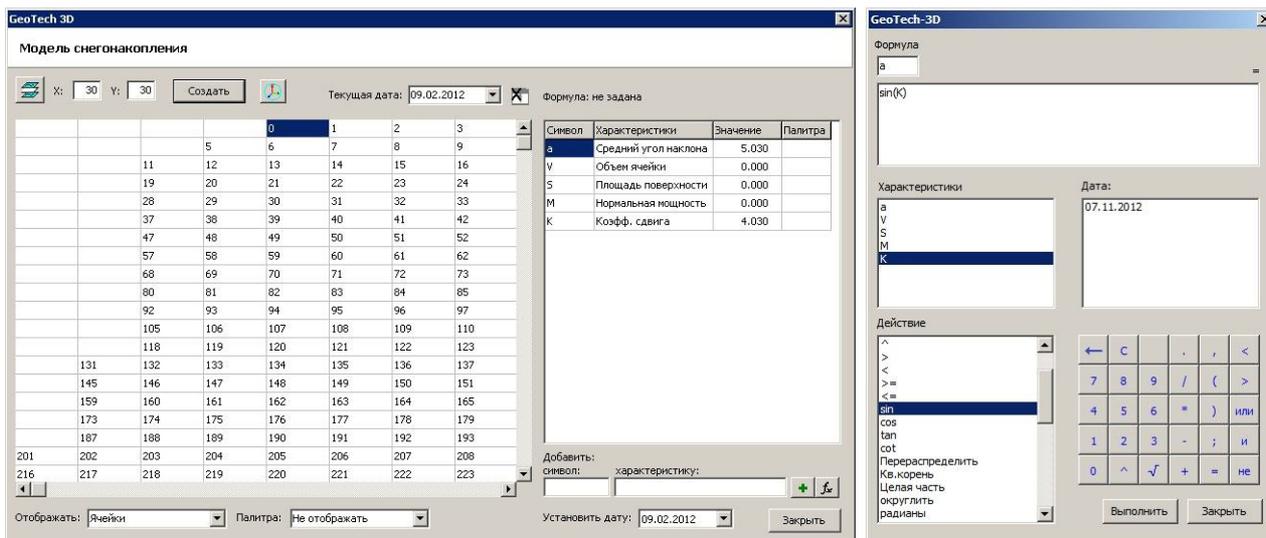


Рис. 2. Расчет среднего угла

Для работы с моделью снегонакопления создан интерфейс, отображающий все ячейки в виде таблицы (рис. 3а). Каждой ячейке соответствует таблица, которая отображает все ее характеристики. Выбор ячеек модели и таблицы сопоставлены друг с другом, при выборе ячейки в модели она отображается в таблице и наоборот.

Пользователю предоставлена возможность добавления новых характеристик в каждой ячейке и их редактирования. Каждая характеристика имеет свое символическое представление, которое необходимо для дальнейших расчетов. Для расчета значений используется редактор формул (рис. 3б). После расчета всех значений модель снегонакопления можно представить в трехмерном виде с использованием цветовой градации характеристик отдельной ячейки.



а

б

Рис. 3. Диалоговое окно для работы с моделью снегонакопления (а) и редактор формул (б)

## Заключение

В настоящее время по материалам маркшейдерской службы ЗАО «Северо-Западная Фосфорная Компания» (Кировский филиал) создана цифровая модель склона г. Суолауйв (абсолютные высоты от 230 до 696 м) и проведена проверка работы подсистемы мониторинга снегонакопления в зонах лавинной опасности при различных значениях снежного покрова. По результатам сравнения критической высоты снега в каждой ячейке с изменяющейся его фактической высотой сформированы зоны возможного схода лавин (рис. 4).

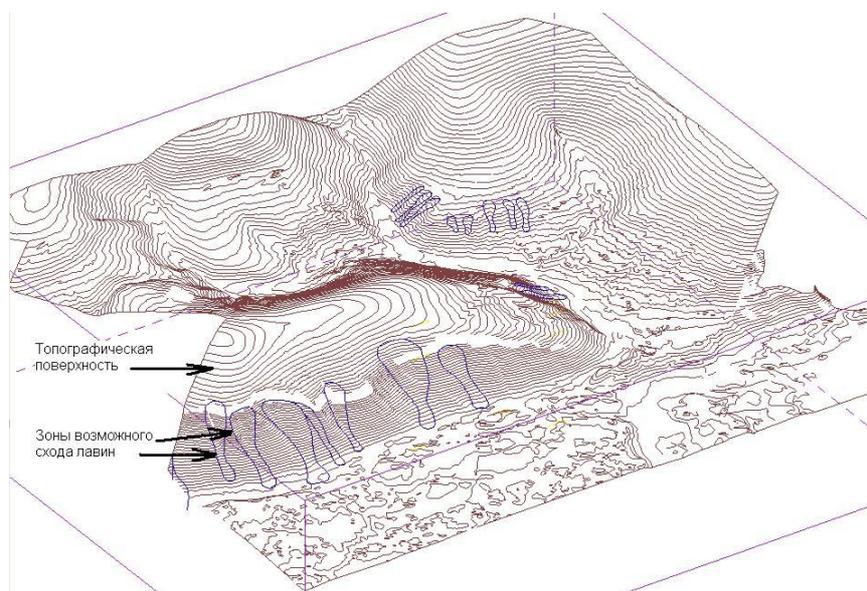


Рис. 4. Топографическая поверхность и зоны возможного схода лавин со склонов г. Суолауйв

Для формирования «истории» снегонакопления на конкретном участке используется механизм привязки данных к дате, что обеспечивает возможность пространственного и временного анализа данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по снеголавинным работам (временное). Л.: Гидрометеиздат, 1965. 397 с.
2. Кадастр лавин СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1984–1991. Т. 1-20
3. Божинский А. Н., Лосев К. С. Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеиздат, 1987, 280 с.
4. Проблемы эффективности защиты от лавин / под ред. А. Н. Божинского, С. М. Мягкова. Деп. в ВИНТИ, N 3967-B91. М., 1991. 285 с.
5. Гляциологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 526 с.
6. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Развитие методов моделирования горно-геологических объектов в системе MINEFRAME // Информационные технологии в горном деле: докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием (12–14 октября 2011 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. С. 142–147.
7. Perla R. I. On contributory factors in avalanche hazard evaluation // Can. Geotech. J. 1970. 7 (4). P. 414–419.
8. Avalanche classification // Hydrological Science Bulletin. 1973. 1 b, No. 4. P. 391–402.
9. Отуотер М. Охотники за лавинами. М.: Мир, 1972. 269 с.
10. Тушинский Г. К. Ледники, снежники, лавины Советского Союза. М., 1963. 312 с.
11. Бойко Е. С., Погорелов А. В. Оперативная оценка снегонакопления по данным воздушного лазерного сканирования // Геопрофи. 2008. № 1. С. 48–50.
12. Наземное лазерное сканирование: монография / В. А. Середович [и др.]. Новосибирск: СГГА, 2009. 261 с.

## Сведения об авторах

Лукичев Сергей Вячеславович – доктор технических наук, временно исполняющий обязанности директора Горного института КНЦ РАН

E-mail: lu24@goi.kolasc.net

Любин Александр Нестерович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

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

*Звонарёва Светлана Викторовна* – программист Горного института КНЦ РАН;  
E-mail: s.zvonareva@mail.ru

**Author Affiliation**

*Sergey V. Lukichev* – Dr. Sci. (Eng.), Interim Director of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

*Alexander N. Lyubin* – PhD (Eng.), Senior Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

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

*Svetlana V. Zvonareva* – Program Designer of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: s.zvonareva@mail.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Лукичев С. В.* Моделирование склона и снежного покрова для оценки лавинной опасности / *С. В. Лукичев, А. Н. Любин, С. В. Звонарёва* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2. – С. 52–59.

**Reference**

*Lukichev S. V.* Modeling of Snow Slope and Snow Cover to Assess Avalanche Hazard / *S. V. Lukichev, A. N. Lyubin, S. V. Zvonareva* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2. – P. 52–59.

УДК 551.464+557.465

**ФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХРАСТВОРНОЙ СИСТЕМЫ ПО АВТОМОДЕЛЬНОМУ РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА: ВЕТВИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

**С. И. Бардан<sup>1</sup>, Б. М. Долгоносов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН

**Аннотация**

Рассматривается безразмерная задача по распределению концентраций примеси конвективно-диффузионным переносом с неустановившейся диффузией в 2-растворной системе при растягиваемой границе раздела. В подвижной системе отсчета для проекции на ось деформации получено автомодельное решение в виде безразмерных пространственно-временных функций ( $D_{xt}$ ) и дополнений ( $1-D_{xt}$ ). Выделены семейства  $D_{xt}$ -кривых смешения с единой формой распределения примеси вдоль границ раздела и две ветви перемешивания растворов в классе морских вод: осолонения и опреснения, независимо действующие в объеме слоистых структур. Установлено соответствие распределения теоретических  $D_{xt}$ -функций из зон смешения вод для морей Русской Арктики. Приведены примеры решения стандартных задач океанологии по  $D_{xt}$ -функциям, показано сходство с результатами теории турбулентного перемешивания. Выполнен сравнительный анализ, и установлены причины отличий конечных состояний в слоистых структурах по разным решениям. Сформулированы принцип локальных равновесий и критерий объединения смежных прослоек систем растворов, согласующих особенности решений, полученных по  $D_{xt}$ -функциям.

**Ключевые слова:**

*область река – море, слоистые системы, автомодельное решение, системы отсчета, кривые опреснения и осолонения, ветви перемешивания, деформация границы раздела, фрактал, критерий слияния прослоек, локальное равновесие.*

**LAMELLAR STRUCTURE FORMATION IN DOUBLE SOLUTION SYSTEM BY SELF-SIMILAR SOLUTION FOR ADMIXTURE DISTRIBUTION NEAR BORDERLINE: BRANCHES OF INTERFUSION**

**Sergey I. Bardan<sup>1</sup>, Boris M. Dolgonosov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Murmansk Marine Biological Institute of the KSC of the RAS

<sup>2</sup>Institute of Aquatic Problems of the RAS

**Abstract**

A non-dimensional problem of admixture concentration distribution by means of the convection-diffusion transfer with non-steady diffusion in double solution system with changing borderline for turbulent torrent, was formulated. For movable indication system, a self-similar solution have been found. Two groups of non-dimensional curves describing both salinization and desalination independently developed in multilayered system where distinguished. Adequacy of theoretical distributions for zones of sea-river mixing have been confirmed for Russian Arctic seas as an example. A comparative analysis of standard oceanological problems with examples was completed. Similarity between solutions by means of  $D_{xt}$ -function and results of theory of turbulent mixing was identified. Reasons for differences of final states of different solutions for lamellar structures results were revealed.

**Keywords:**

*river–sea mixing zone, lamellar structure, branches of mixing salinization and desalination, self-similar solution, spatial-temporal function, solution interface stretching, effect of restraining diffusion, analytical modeling, convective-diffusion transfer.*



Актуальность рассматриваемых проблем определяется задачей исследования механизмов самоочищения и воспроизводства свойств водной среды в наиболее загрязняемой, прибрежной зоне моря [1–4]. В Русской Арктике зоны смешения (ЗС) речных и морских вод занимают всю прибрежную область. Здесь при устойчивом поступлении материкового стока в верхний деятельный слой происходит формирование устойчивых слоистых структур – ламелл ЗС (*lamellar structure*), образуемых промежуточными продуктами разбавления истинно морских вод пресными [1, 4–9]. Разные степени таких разбавлений упорядочены в деятельном слое моря [9–11] и формируют систему физико-химической трансформации примесей (субстанций), переносимых в составе взаимодействующих водных масс разного генезиса [3–5, 12–15]. В ходе последовательных изменений состава веществ в разных разбавлениях морских вод в физико-химических условиях, поддерживаемых для областей река – море, происходит самоочищение среды от большинства миграционных форм не характерных в этом геохимическом классе растворов [12–16], включая большинство антропогенных загрязнений [2, 6, 11–13].

Методы аналитического описания слоистых структур ЗС река – море, возникающих при перемешивании вод разного генезиса и класса, в настоящее время относят к слабо развитым направлениям океанологии или гидрологии [6, 9, 11, 17]. Теория турбулентного переноса, применяемая для описания перемешивания в открытом море, мало пригодна для областей река – море [1, 5, 10, 17], а действие законов массопереноса из динамики гидрологических процессов ограничено приустьевой частью рек [7–11]. Для побережья образуется «серая зона», в которой большинство современных океанографических моделей, используемых при изучении условий обмена и трансформации примесей, применяют постановку задач с «жесткой» расчетной сеткой [6, 9, 17]. При этом игнорируются как физическое содержание, так и геохимические последствия, наблюдаемые при смешивании растворов разного состава из разных геохимических классов [16, 18–22], заменяемые формальной подгонкой под их конечное состояние [6, 11, 17].

Цель нашей работы – выявить закономерности распределения концентраций субстанций ( $c_i$ ) в окрестностях растягиваемой границы раздела двухрастворных систем и способы их аналитического описания особыми функциями. Приводятся формулировки и общее решение задачи переноса примеси для диффузионного приближения (плоская задача) на основе принципа локальных (или «мозаичных») равновесий [1–2]. Решения при смешении пары растворов получены в подвижной (лагранжевой) системе отсчета для проекции редуцированной оси переноса (особая точка) в случае устойчивой деформации границ раздела. Приведены результаты численного решения в виде пространственно-временных функций ( $D_{xt}$ ) и ( $D_{ht}$ ) и их дополнений [1–2]. В статье основное внимание уделено временной функции вида: ( $D_{xt}$ ) и ( $D'_{xt} = 1 - D_{xt}$ ). Для  $D_{xt}$ -кривых перемешивания обсуждается вопрос о выделении двух семейств, описывающих качественно различные процессы с разными геохимическими последствиями для состава растворов и состояния экосистем в прибрежной зоне моря. Семейства этих кривых образуют две ветви смешения растворов: «опреснения» – для морских и «осолонения» – для пресных вод [13–17]. В сочетании с другими работами [2–5, 18–23] решение задачи переноса позволяет сформулировать ряд положений, являющихся основой

концепции механизмов формирования и устойчивости слоистых структур в ЗС, определяющих их эволюцию для областей река – море [1–3, 6–11].

### Материал и метод

Базовая схема перемешивания основана на наблюдениях в реальных ЗС река – море [4–6, 18–22]. Нами применяется трехступенчатое представление [4, 5], адаптированное к двухрастворным системам, когда каждая из таких ступеней включает несколько четко различимых стадий смешения [1, 18–22]. В природных условиях растягивание границ разделов в ЗС проходит за счет фронтального и бокового растекания ламелл с участием градиентных течений [4, 8–11]. Ранее показано [1–2, 24], что снос перемешанных вод, с растягиванием границ раздела некоторого участка длиной  $l_i$  в его сечении, приводит к приросту доступного объема для двухсторонней окрестности раздела – прослоек, прилегающих к любым внутренним поверхностям в растворе. Это инициирует ряд гидродинамических эффектов [1–3, 24–28], связанных со свойствами агрегатного состояния – слабые растворы [13–16, 23]. Их анализируют с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы конвективно-диффузионного переноса примеси через поверхность разделов для двухрастворной системы.

**1. Схема переноса через растягиваемую границу в растворе: переменные и общая задача.** Рассмотрим процесс переноса примеси между двумя растворами, применяемый в ламеллярной модели общего вида [1–3, 23–28]. При этом мы анализируем два наложенных один на другой водных раствора, а перемешивание проходит при их движении. В начальный момент времени  $t_i = 0$  они обладают постоянным составом и неограниченно простираются в горизонтальном направлении. Оба раствора могут иметь конечную толщину либо могут быть полу-ограниченными по вертикали (для удобства получения более простых решений). Пространство, в котором протекают анализируемые процессы переноса между растворами, трехмерное, что требует применения соответствующих ему систем отсчета. Каждый из растворов: а) занимает собственное полу-пространство, б) будет полу-ограничен по вертикали, в) разделяется плоско-параллельным промежуточным слоем конечной толщины. Такой промежуточный (или пограничный) слой обладает сложной структурой и включает в себя две достаточно малые окрестности, между которыми и проходит граница раздела в двухрастворной системе. Формально принимаем, что при  $x=0$  все точки расположены на поверхности раздела – «нулевая» толщина [1, 24, 26–28]. На рис. 1 приведены детализированные схемы переноса примеси через границу раздела для случая контакта двух растворов разного состава при ламинарном (или послойном) течении в жидкости, т. е. с определенным направлением переноса, как для самих растворов, так и их смесей.

Принимаем, что произвольный вектор скорости  $\vec{v}$  в выделенных на рис. 1а точках [a,b,c,d] можно представить матрицей-столбцом компонентов по осям [29–31] с подвижной двухосевой системой отсчета. Для упрощения примем, что явления, вызванные растягиванием границ в любом элементе объема, включающего границу раздела, рассматриваются в той части плоскости, через которую проходит произвольное сечение длины  $l_i$ , выделенное на схеме (рис. 1а) точками [a,b,c,d]. Деформация элементарных объемов по их сечению [abcd] рассматривается на малом участке, включающем две окрестности, примыкающие к границе раздела (с обеих сторон, см. рис. 1). Для определенности установим, что ось  $x$  (рис. 1б) направлена из равномерно насыщенного субстанции (солями) раствора в сторону однородного растворителя – пресных вод с низким содержанием соли (меньшей плотности). Тогда начало координат  $x = 0$ , есть граница раздела. К ней мы относим все точки сечения  $l_i$  через поверхность внутреннего раздела в двухрастворной системе, откуда толщина самой границы – условно «нулевая» (рис. 1б).

Определение скоростей деформации жидкости в объеме, ограниченном его сечением через точки [a,b,c,d], составляет содержание анализа локальных движений самих точек их векторами

$\bar{v}$  [29] приведенного сечения  $[abcd]$  (рис. 1). Такая система растворов подчиняется правилам сплошных сред и описывается уравнениями классической гидродинамики [6, 9–11, 17]: состояния, неразрывности, движения и сохранения энергии [29–32]. Это позволяет формализовать их свойства. Так, для *несжимаемого* раствора:  $\nabla \mathbf{v} = 0$ , где  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$  – поле скоростей;  $\mathbf{r}$  – пространственные координаты,  $t$  – время,  $\nabla$  – линейный оператор (набла) осей  $x, y, z$  – в прямоугольной координатной сетке [28–30]. Тогда система уравнений конвективно-диффузионного переноса субстанции, выписанная по концентрации ( $c_i$ ) любой из примесей переносимых растворами, примет вид [1, 2, 23–29]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v}c) = D\Delta c, \quad (1)$$

где  $D$  – скорость диффузии примесей;  $\Delta$  – дифференциальный оператор Лапласа.

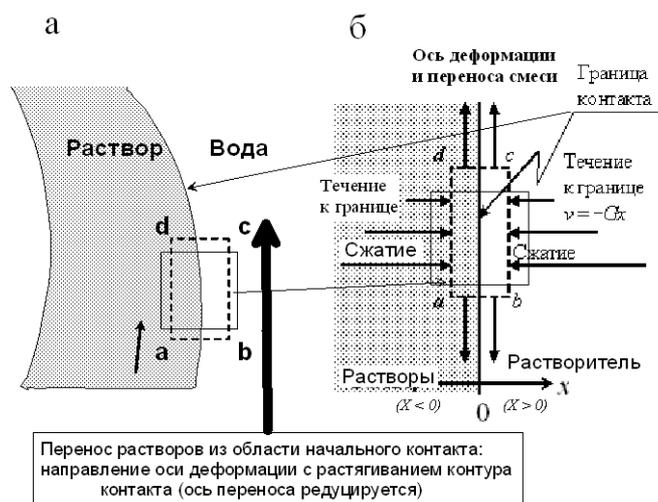


Рис. 1. Схема процессов переноса через границу раздела с ламинарным режимом течения. Показаны направление общего переноса и ось деформации (растягивания) поверхности раздела, прямоугольниками выделены элементы границы раздела «до» и «после» деформаций:

а – общий вид элементарного сечения  $[abcd]$  через границу раздела; б – схематизация процессов в выделенном элементе и его (малых) окрестностях по векторам  $\bar{v}$  в точках  $[a, b, c, d]$

## 2. Дифференциальные уравнения деформируемой границы раздела – одномерная задача.

Процесс переноса субстанции через границу раздела согласно схеме, приведенной на рис. 1, можно описать системами дифференциальных уравнений, полученных авторами ранее [1–3, 24]. Ниже приводится сводка уравнений системы (2) с кратким описанием и обозначениями переменных.

В схеме (рис. 1а, б) любое сжатие-растягивание границ внутренних разделов, представленных в растворах поверхностью сложной формы, будет приводить к деформациям сечений выделенных элементов вида  $[abcd]$ . По условию в уравнении (1) стороны элементов расположены в разных по составу растворах – разделены общей границей, через которую и проходит сечение  $l_i$ . Поэтому в состав каждого из элементов будет входить по две окрестности у границы. Определим их как диффузионные прослойки пары контактирующих растворов – часть полупространств, которые по знаку оси  $x$  обозначим как  $(\pm h_\delta)$ . По условиям *неразрывности* и *несжимаемости* жидкости, любой из таких элементов должен сохранять неизменность геометрических размеров – объема и сечений [29, 30]. Формализуем это свойство условием о неразрывности для элементарного объема (т. е. для отдельных участков границы, см. рис. 1), в уравнении общего вида:  $V = h_0 A = \text{const}$  (2.1), где  $h_0$  – характерный размер выделенного

элемента [1, 2];  $A$  – характерная площадь  $[abcd]$ , ограниченная точками элементов  $[a, b, c, d]$ , через которую проходит граница раздела между двумя растворами разного состава в данной системе.

Уточним, что при ламинарном течении, включающем и окрестности границы, касательные напряжения, которые обозначим через  $T$ , создаются трением между прослойками смежных слоев, что согласуется с условиями в системе (1). Тогда относительные скорости отдельных точек  $[a, b, c, d]$  любого элемента сечения  $l_i [abcd]$  относительно общей скорости деформации границ раздела запишем как:  $dv/dt = Tv$  (2.2), где  $v$  – вектор движения точек по осям  $x, y, z$  (см. ниже);  $T$  – тензор скоростей в точках (или оператор Гамильтона) [2, 24, 30].

Учтем, что деформацию растягивания на плоскости сечения  $[abcd]$ , проходящего за счет изменения отношения сторон  $ad$  и  $bc$  (рис. 1), можно выразить через характерный поперечный размер элементарных сечений, который в уравнении (2.1) обозначен через  $(h_0)$ . В дифференциальной форме изменение соотношения сторон по аргументу  $(t)$ , выписанному по  $(h_0)$ , примет вид:  $dh_0/dt = -Gh_0$  (2.3), где  $h_0$  – характерный поперечный размер сечений  $[abcd]$  элементов вдоль границы раздела;  $G$  – скорость деформации границ раздела (выраженная через симметричную часть тензора  $T$  – касательных напряжений [1–3, 24]). Системы уравнений (1) и (2.1–2.3), а также граничные условия их выполнения соответствуют положениям гидромеханики по свойствам сплошных сред [1–3, 29, 30]. Поэтому и любой элемент ламеллярных структур систем жидкость-жидкость в силу своей непрерывности (несжимаемость и неразрывность среды) будет сохранять свой объем. Выше это записано как  $V = \text{const}$ , а на рис. 1 приведена площадь элементарного сечения  $[abcd]$  такого объема. Дифференцируя выражение (2.1), получим еще одно уравнение вида:  $dA/dt = GA$  (2.4), где  $A$  – площадь характерного сечения  $[abcd]$ .

*Физический смысл* дифференциальных уравнений (2.3–2.4) сводится к тому, что всякий прирост длины в сечении границ раздела, для случая деформации растягивания оси  $l_i$  с удлинением элементов  $[abcd]$  (рис. 1 а, б), по условию о неразрывности для сред, приводит к *увеличению доступного объема* в прилегающих к границе диффузионных прослойках  $\pm h_\delta$  [1, 2].

Для данного типа деформаций (удлинение-сжатие), согласно уравнениям (2.3–2.4), прирост объема будет пропорционален изменению геометрических размеров в элементах на границе: по формуле (2.3), выписанной для  $h_0$ , – относительно характерного поперечного размера  $[abcd]$ , а для выражения (2.5), выписанного по  $A$ , – относительно изменения общей площади того же сечения. Поэтому, по условию о неразрывности всей границы между растворами, любой *прирост объема* в области распространения растворов должен сразу же *заполняться* со всех сторон (жидкости!) [1]. Так как по формулировкам из (1–2) граница не имеет разрывов, то по этому же формальному условию *растворы поступают из глубин* полу-ограниченного слоя через диффузионные прослойки  $\pm h_\delta$  (рис. 1), фактически из тех частей полу-пространств, которые удалены от границ внутренних разделов и сохраняют исходный состав растворов [1]. По принятой выше для оси  $x$  записи это части областей:  $(x > +\delta \geq 0)$  и  $(x < -\delta \leq 0)$  (рис. 1 и 2 [1, 2]).

**3. Пограничный слой и его свойства в решаемой задаче.** Согласно обозначениям аргументов в уравнениях (2.1–2.4) и направлению осей (рис. 1), скорости микропотоков в окрестностях двусторонней границы меняются по закону:  $v = \pm Gx$  (2.5а), где  $\pm G$  – скорость деформации границы раздела выраженная через симметричную часть тензора  $T$  напряжений [2, 24, 29]. Формально скорость переноса субстанций с микропотоками по формуле (2.5а) будет нарастать по модулю – с увеличением расстояния от поверхности раздела, а на самой границе, при  $x = 0$ :  $v \downarrow \uparrow = 0$  (2.5б). Тогда диффузия потока ионов  $(J(x, t))$  через границу раздела численно:  $J(x, t) \Rightarrow 0$  (2.5в), что было получено авторами настоящей статьи ранее для стационарного состояния [1, 2]. Отсюда следует, что коэффициенты адвекции-диффузии ( $D$ ) для любой пассивной субстанции (примеси) в окрестностях раздела:  $D = f(x) \neq \text{const}$ , то есть меняются в диапазоне от 0 до  $D_{\text{max}}$ , являясь функцией скорости продольных деформаций ( $\pm G$ ). Поэтому и  $D = f_1(Gx) \neq \text{const}$ , что полностью согласуется с условиями по (1) и (2). При этом по формуле

(2.5a) для областей выше и ниже раздела по слою  $\delta$  образующиеся микропотоки будут: а) противоположными по знаку (согласно деформации «растягивание-сжатие») и б) направлены с разных сторон к слою  $\delta$  (рис. 1б). Таким образом, обе окрестности, примыкающие к границе раздела, совместно образуют общую структуру пограничного слоя: имеют «ненулевую» толщину (рис. 1б). Показано, что пограничный слой  $\delta$  обладает выраженной гидродинамической природой и имеет реальную толщину, например, состоит из двух прослоек [1–3]:  $\delta = [|\delta| + |\delta|]$  (2.6), где знак ( $\pm$ ), соответствует направлению оси (рис. 1а).

Вывод уравнения пограничного слоя  $\delta$  приводится в работе [24]:  $\delta = \sqrt{2D/G}$ , где  $\delta$  – общая толщина диффузионного слоя (2.6), откуда [1, 2]:  $\pm|\delta| \approx 0.5\sqrt{2D/G}$  (2.7), где  $D$  – коэффициент диффузии веществ,  $G$  – скорость деформации границы, совпадающая с направлением переноса, выраженная симметричной частью тензора ( $T$ ) – напряжений, возникающих между движущимися ламинарными прослойками (типа  $\pm h_\delta$ ). Толщина пограничного слоя  $\delta$  определяется свойствами жидкости, динамическими условиями у границ (тензор  $T$ ), а также зависит от свойств диффундирующих веществ: для  $D_i$  – зависит от коэффициента молекулярной диффузии данного  $i$ -го вещества (парциальный) в водном растворе. Выделим: численно было получено [1], что диффузионный перенос через пограничный слой (фиковский) может проходить только в отсутствие продольных деформаций границ и их окрестностей, т. е. растяжений-сжатий элементов  $[abcd]$ . По физическому смыслу аргументов системы (2.1–2.7) при реальных диапазонах  $D_i$  ионов морских солей и неполярных газов (в слабых водных растворах) размер области, занятой диффузионным подслоем  $\pm\delta$  вдоль поверхностей внутреннего раздела, имеет порядок ( $n \cdot 10^{-3}$  м). Те же размеры соответствуют характерным масштабам элементов  $[abcd]$ , выделяемых в окрестностях границы.

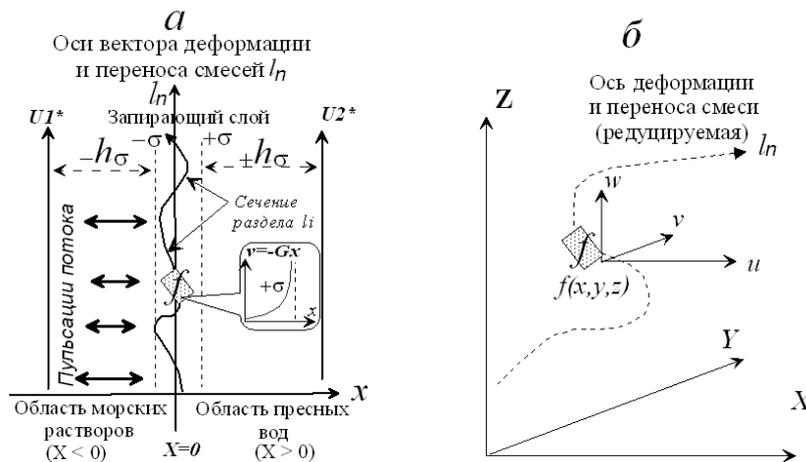


Рис. 2. Схема переноса примеси у границ раздела через учетную площадку  $f$  двухрастворной системы с подвижной системой координат и растягиваемой сплошной границей раздела, процессы и действие внешних сил на точки  $[a, b, c, d]$  соответствуют условиям системы уравнений (1–2):

$a$  – часть сечения  $l_i$  на поверхности растягиваемой границы с площадкой  $f[abcd]$  (по оси деформации условно выделены пограничные подслои толщиной  $\pm\delta$  и примыкающие диффузионные прослойки ее окрестностей толщиной  $\pm h_\delta$  (пунктиры), подвижная ось деформации ( $l_n$ ) – условно средняя, вдоль которой слой  $\delta$  делит объем на области турбулентного режима с разными средними скоростями (потоки  $u_1^*$  и  $u_2^*$ ). Врезка [2] – профиль скорости  $v$  микропотоков для окрестностей прослойки  $+h_\delta$  по уравнению (2.5));  $b$  – независимые оси  $X, Y, Z$  криволинейных уравнений движения для подвижной (лагранжевой) системы координат вида  $f(u, v, w)$  в сечении  $[abcd]$

Следовательно, в разделяющем растворы плоско-параллельном слое  $\delta$  (включает и малые окрестности, примыкающие к разделу – прослойки  $\pm h_\delta$ ) растягивание-сжатие границ формирует *переменные* и *ориентированные* по нормали, микропотоки жидкости. Они

направлены из основной массы контактирующих растворов в окрестность границы и наоборот (рис. 2а).

По условиям для системы дифференциальных уравнений (2.1–2.7) и схемы переноса на рис. 1, 2, слой  $\delta$  в задаче о переносе ионов через поверхность внутреннего раздела будет представлен как промежуточный *плоско-параллельный* (или *пограничный*) *слой* неограниченной протяженности, разделяющий растворы разного состава и образующийся в момент начального контакта [1].

Для слоя  $\delta$  очевидно наличие ряда особых свойств, из которых важными для рассмотрения являются следующие. Во-первых, переменные деформации элементов на границе раздела «нулевой» толщины  $x = 0$  для примыкающих к ней малых окрестностей  $\pm h_\delta$  вызывают многократный приток-отток растворов (согласно знаку изменения кривизны поверхности [25, 33]), направленный по нормали к оси деформации и линиям тока жидкости [2, 24]. Во-вторых, противоположные микропотоки в окрестностях плоско-параллельного слоя (у границ растворов) есть физический *механизм блокирования молекулярной диффузии* [1, 2]. В-третьих, микропотоки формируются и действуют по обе стороны границы раздела в целом локально, согласно изменению скоростей деформации любого участка (рис. 1). Это и определяет однородность свойств в примыкающих окрестностях ( $\pm h_\delta$ ) и смежных прослойках и рассматривается нами как *механизм поддержания устойчивости состава* двух смешивающихся растворов [1].

## Полученные результаты

**1. Формулировка плоской краевой задачи о распределении субстанции у границ раздела и граничные условия турбулентного режима.** Рассмотрим плоское турбулентное течение, направленное вдоль разделяющего растворы плоско-параллельного слоя неограниченной протяженности [31], образующегося в момент начального контакта. Схема переноса и микрорельефа поверхности раздела в растворах с турбулентным режимом показаны на рис. 1 и 2.

Для определенности условимся, что граница раздела в среднем ориентирована по оси деформации и переноса смесей двухрастворной системы (ось  $l_n$  на рис. 2а). Осредненные по полу-пространствам плоского турбулентного течения скорости ( $u^*$ ) [31, 32] в областях их распространения направлены произвольно ( $u_1^*$  и  $u_2^*$ ). Как и для других известных решений системы (1) конвективно-диффузионного переноса [1–3, 9–11, 24–29], ось  $x$  выбираем перпендикулярно оси деформации поверхности раздела и линиям тока растворов с разной  $c_i$ -концентрацией субстанции (рис. 1 и 2а). Направление отсчетов оси  $x$  выберем (см. выше) из области распространения морских вод (раствор) в область материковых (разбавитель). Учитывая инвариантный характер форм микрорельефа поверхностей раздела [1, 25, 33], размер произвольного элементарного участка – учетной площадки  $f$  площадью  $s$  сечения ( $abcd$ ) (рис. 1, 2 и ниже) выбираем много меньший, чем характерный размер (масштаб) турбулентных пульсаций [31, 33] потока, вызывающих образование мезо- и микрорельефа на деформируемой границе. Вдоль оси  $x$  (рис. 2а), в области полу-пространства  $-\infty < x \leq 0$ , находятся растворы с высокой концентрацией субстанции (примеси – морские соли), назовем его «раствор» (или «морская вода»). В области  $0 < x < +\infty$  – раствор без примесей, который обозначим как «чистый растворитель» (или «пресная вода»). Для любых решений задач о распределении  $c_i$  вдоль сложных поверхностей требуется применение подвижной системы отсчета – из-за сложности решения гидродинамических уравнений в потоке с неустановившимся режимом [6, 10–11, 31]. При этом любые прямоугольные (при  $t \Rightarrow 0$ ) координатные системы неизбежно трансформируются в криволинейные (рис. 2б) [29]. В таком случае системы уравнений переноса между растворами по формуле (1), т. е. плоская задача в лагранжевых координатах – система отсчета, закрепленная в данном сечении (на границе раздела, для  $x \Rightarrow 0$ ), примет вид [1–3, 24–29]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - Gx \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad (3.1)$$

где  $x$  – ось и координата, перпендикулярные границе раздела,  $c(x, t)$  – концентрация субстанции (примеси) в точке  $x$  в момент  $t = 0$ ,  $D$  – коэффициент диффузии примеси (см. выше формулу (1)).

Для определенности принимаем, что концентрация субстанции вдали от границы раздела  $l_i$  для «раствора» равна  $c_0$ , а в области «растворителя» отсутствует. Тогда граничные условия (3.1):  $c(-\infty, t) = C_0$ ,  $c(\infty, t) = 0$ . Для численного решения переведем систему (3.1) в безразмерную форму по обычной процедуре масштабирования аргументов [1–3, 24, 30]. Используем формулы:  $t = t'/G$ ,  $x = \delta x'$ ,  $c(x, t) = C_0 f(x', t')$ , где  $\delta = \sqrt{2D/G}$  – общая толщина пограничного (квазидиффузионного) слоя. Преобразуя, получим систему уравнений для плоской задачи в виде:

$$\frac{\partial f}{\partial t} - x \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0, \quad -\infty < x < \infty. \quad (3.2)$$

В системе (3.2) и далее штрихи опущены. Для численного решения системы (3.2) ее требуется дополнить начальными и граничными условиями. Для плоской и безразмерной задачи они имеют вид:  $c(x, 0) = C_0 \bar{\theta}(x)$ ,  $c(-\infty, t) = C_0$ ,  $c(\infty, t) = 0$ , где  $C_0$  – исходная концентрация ионов морских солей (на удалении от границы раздела морских и пресных вод); параметр  $\bar{\theta}(x) = 1 - \theta(x)$ , где символ  $\theta(x) = \{0, x < 0; 1, x > 0\}$ , что соответствует функции Хевисайда [29, 30, 34]. Граничные условия в системе (3.2) и модели с размерной формулой (3.1) одинаковы [1–2], и система корректна.

**2. Алгоритм решения задачи о распределении примеси в окрестностях растягиваемых границ.** Алгоритм решения системы (3.2) в этой работе приводится в уточненном виде [2].

Для возможности численного решения ограничимся описанием первой и второй ступеней перемешивания (условие для  $t \ll 1$ ), для которых характерен максимум развития физико-химических процессов трансформации субстанций в смеси растворов (ламелл ЗС река – море) [1, 7-13, 18-22, 35]. По схеме, используемой для системы (3), ступени перемешивания делятся от момента приведения жидкостей в контакт и до момента, когда характерные элементы микрорельефа на фрактальной поверхности раздела [25, 33] дробятся с появлением разрывов у раздела [1, 2]. Отметим, что характерный масштаб процессов у раздела неявно задается толщиной  $\delta$  пограничного слоя [1–3, 24, 25]. Причем структура границы будет последовательно «истончаться» рядом процессов: а) постоянного «бокового» растекания [7–8], при фронтальном сносе смешанных вод в море – растягиванием [9–11], б) турбулентными пульсациями в потоках, причем с обеих сторон раздела [1, 4, 18]. Постепенно ее толщина сравнивается по порядку со слоями  $\pm \delta$ , т. е. размером блокирующей поток ионов:  $J(x, t) = 0$  прослойки [1]. Для этих условий с дополнительным ограничением для безразмерного времени  $t \ll 1$  возможно получение приближенного аналитического решения о распределении  $c_i$  при использовании уже известных алгоритмов [1, 2, 24, 25–29] с их адаптацией к системе (3.2).

Будем исходить из условий для уравнения (3.2) и учета того, что ступенчатая функция Хевисайда  $\theta(x)$  аппроксимируется интегралом, известным как функция ошибок (erf) [2, 30, 34]:

$$\bar{\theta}(x) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{2t_0}} \right), \quad (4)$$

где erf – стандартная функция ошибок, тогда как используемое обозначение  $\operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erf}$  есть дополнительная к ней функция (не путать с обратной) [17, 30, 34].

Для значения erf при аргументе  $t_0 \rightarrow 0$  она соответствует пределу min и дает обычную ступенчатую функцию [1, 2] – стандартное решение во множестве задач, известное как «единичный скачок» для передаточной функции, обладающей свойствами непроницаемости – «кваситвердой» границы раздела в жидких системах [1, 2, 29, 30], что полностью соответствует условиям для системы (3).

Упростим систему (3.2), учитывая полученное нами ранее решение [1, 2], что с приближением к границе внутреннего раздела в контактирующей паре растворов скорости микроконвекционного переноса уменьшаются и обращаются в «нуль» для самой границы (по 2.3–2.5):  $V_{x=0}\uparrow\downarrow = 0$ , тогда поток через границу:  $J(x,t) = 0$ . При малых  $x$ , т. е. у границы или в ее малых окрестностях (рис. 1–2), можно пренебречь конвективным членом для системы (3), трансформировав ее в плоскую краевую задачу. Упрощение (3.2) проводим для условий:  $t \ll 1$ , т. е. рассматриваем начальные ступени перемешивания (см. выше). Это позволяет перейти к *одномерной диффузионной задаче* с ее приближенным решением, согласованным с начальными условиями – по пределу  $\min$  для уравнения (4), тогда первое полное диффузионное решение в уравнении (3.2):

$$f(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2t}}\right), \quad (5)$$

где  $\operatorname{erfc}$  – дополнительная функция ошибок;  $f(x,t)$  – искомая концентрационная функция по (3.2).

Для приближенного стационарного решения в уравнении (3.2) требуется взять предел функции для  $t \rightarrow \infty$ . Подставив, получим для  $t \rightarrow \infty$ :

$$f(x) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x). \quad (5.1)$$

Сразу же оценим точность численного расчета, определив ошибку при отбрасывании конвективной составляющей в системе (3.2). Учтя знаки аргумента по оси  $x$  и подставив выражение (5) вместо  $c_i$ , для модуля получим:

$$|(x\partial f / \partial x) / (\partial f / \partial t)| = t. \quad (5.2)$$

По формуле (5.2) ошибка решения для системы (5) за счет отбрасывания члена, учитывающего перенос субстанций с турбулентной конвекцией, будет нарастать пропорционально росту аргумента ( $t$ ) – времени, что в целом очевидно. Делаем промежуточный вывод о том, что при заданных краевых условиях для системы (3) полученное по уравнению (5) решение имеет смысл для достаточно малых промежутков. Это и учтено условием  $t \ll 1$ .

Далее представим общее решение для системы (5) в виде суммы: во-первых, стационарного решения при  $t \rightarrow \infty$  в уравнении (5.1) и, во-вторых, нестационарной добавки, которую обозначим  $v(x,t)$ :

$$f(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x) + v(x,t) = D_{xt}. \quad (6)$$

Вид функции  $D_{xt}$  с расчетом  $v(x,t)$  по уравнению (6) находим по формуле (3.2). При нулевых граничных условиях:

$$\frac{\partial v}{\partial t} - x \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \quad \text{при } t > t_0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad \text{откуда } v(x, t_0) = v_0(x), \quad v(\pm\infty, t) = 0. \quad (7)$$

Преобразуя выражение (7), получим, что добавка  $v_0(x)$  будет равна разности между уравнениями (4) и (5.1):

$$v_0(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2t_0}}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x). \quad (8)$$

Решение (8) ищем путем подстановки преобразованных величин в виде вспомогательных функций  $v(x,t) = u(x)T(t)$ . Нормируя и разделяя переменные, получим:  $2T' / T = (u'' + 2xu') / u = -\lambda$ . Как известно [29, 30, 34], его стандартными решениями являются выражения вида:  $T = C \exp[-(\lambda/2)t - t_0]$ , откуда:  $u'' + 2xu' + \lambda u = 0$ . Преобразование переменной в виде  $u = u \exp(-x^2)$  приводит к уравнению Эрмита канонического вида:  $y'' + 2xy' + (\lambda - 2)y = 0$  [30]. Из специальной литературы известно, что уравнение имеет спектр значений:  $\lambda = 2n + 2, n = 0, 1, \dots$ , собственными

функциями которых являются многочлены:  $y = H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}$ , где  $H_n(x)$  – многочлены

Эрмита. Тогда общее решение для уравнения (7) запишется как дополнение к общему стационарному решению (5) и разложение нестационарной добавки  $v$  по собственным функциям:

$$v(x,t) = e^{-x^2} \sum_{n=0}^{\infty} a_n H_n(x) e^{-(n+1)(t-t_0)} \quad (9)$$

В системе (9) коэффициенты многочленов Эрмита  $a_n$  вычисляются по формулам [34]:

$$a_n = \frac{1}{2^n n! \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} v_0(x) H_n(x) dx \quad (9.1)$$

Для приведенного преобразования интеграла (9), с учетом решения для уравнения (8) и исходя из известных свойств функций для многочленов Эрмита [30]

$$\operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x), \quad H_n(-x) = (-1)^n H_n(x), \quad H'_n(-x) = 2n H_{n-1}(x), \quad (9.2)$$

получаем определенный интеграл вида:

$$\int_0^{\infty} e^{-x^2} H_{2n}(\alpha x) dx = (\sqrt{\pi}/2) [(2n!)/n!] (\alpha^2 - 1)^n. \quad (10)$$

Приведенные выражения позволяют проводить аналитический расчет отдельных коэффициентов интеграла в системе (9), следуя схеме:

$$a_{2n} = 0, \quad a_{2n+1} = \frac{(2t_0 - 1)^{n+1}}{2^{2n+2} (n+1)! \sqrt{\pi}} \quad (10.1)$$

Подстановка коэффициентов из системы (10) в формулу нестационарной добавки  $v$  (9) дает:

$$v(x,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2t_0 - 1)^n}{2^{2n} n!} H_{2n-1}(x) e^{-2n(t-t_0)}. \quad (10.2)$$

Многочлены Эрмита вычисляем по рекуррентным формам соотношений вида [2, 24]:

$$H_{n+1}(x) = 2xH_n(x) - 2nH_{n-1}(x), \quad H_0(x) = 1 \quad H_1(x) = 2x. \quad (10.3)$$

Для уменьшения погрешности за счет резкого возрастания порядков чисел в ряду (10.3) перейдем к другому рекуррентному соотношению: вместо  $H_n(x)$ , которое быстро возрастает по  $n$  [30, 34], вводим вспомогательную функцию  $h_n(x)$  по их же отношению [2]:

$$\frac{h_{2n}(x)}{H_{2n}(x)} = \frac{h_{2n+1}(x)}{H_{2n+1}(x)} = \frac{(-1)^n}{2^{2n} (n-1)!} \quad (10.4)$$

В результате преобразований получаем полный набор формул, позволяющий аналитический расчет добавки  $v(x,t)$  в уравнениях (6–7) по системе (9–10). В общем виде:

$$v(x,t) = -\frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \sum_{n=1}^{\infty} h_{2n-1}(x) (1-2t_0)^n e^{-2n(t-t_0)} \quad (10.5)$$

Так как в уравнении (10.5) требуется перейти к пределу  $t_0 \rightarrow 0$  (см. выше), делаем заключение о том, что расчетное выражение (6) для концентрационной функции  $f(x,t)$  не содержит неопределенных параметров и *решается* численно. С учетом вспомогательного выражения для  $h_n(x)$  в рекуррентных соотношениях многочленов Эрмита численный расчет в формуле (10.5) проводим следующим образом:

$$h_0(x) = 1, h_1(x) = 2x; \quad h_{2n+1}(x) = 2xh_{2n}(x) + \frac{n}{n+1} h_{2n-1}(x); \quad h_{2n+2}(x) = \frac{1}{2n+4} [-xh_{2n+1}(x) + (2n+1)h_{2n}(x)]. \quad (11)$$

Окончательно в уравнениях (6) и (8) значения функций  $f(x,t)$  находим как сумму стационарного решения по формуле (5) и ее нестационарной добавки  $v(x,t)$ . Учитывая обозначения в системах (10–11), уравнение распределения концентрационной функции  $f(x,t)$  принимает окончательный вид:

$$f(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x) - \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \sum_{n=1}^{\infty} h_{2n-1}(x) (1-2t_0)^n e^{-2n(t-t_0)} = D_{xt}. \quad (12.1)$$

Дополнительная к  $D_{xt}$  функция, которую обозначим  $D'_{xt}$ , имеет вид [29, 34]:

$$D'_{xt} = 1 - D_{xt}. \quad (12.2)$$

Аналитические выражения (12.1) и (12.2) получены теоретически и дают решение безразмерной системы (3.2) в виде пространственно-временных функций ( $D_{xt}$ ). Они описывают распределение для пассивных, условно-консервативных субстанций [13–16, 23, 31, 32, 35] (см. ниже) в двухрастворной системе перемешивающихся растворов с растягиваемой границей раздела, в потоке с ламинарным или турбулентным режимом (учитывая условие о неразрывности границ по уравнениям (1–3)).  $D_{xt}$ -функция табулирована для требуемых безразмерных значений аргумента  $t_i$  в диапазоне  $i = 0.000001, \dots, 1.0$ . Функции  $D_{xt}$  являются основой для расчета и моделирования процессов развиваемой нами гипотезы о механизме формирования слоистых структур особого рода – ламелл ЗС области река – море. Они возникают в процессе смешивания вод разного генезиса и являются физической основой формирования каскадов физико-химических барьерных обстановок [1, 4, 9, 12–14, 18–22].

**3. Теоретические кривые распределения функции  $D_{xt}$  у поверхностей раздела.** Расчет проводили для одного и того же объема (с площадью сечения  $[abcd]$ ), движущегося в потоке перемешивающихся растворов (см. пункты 1–2 «Материала и метода») в формулировке (3), для учетной площадки  $f$  плоско-параллельного слоя неограниченной длины, в котором и проходит граница раздела в растворе (рис. 2). Метод подвижного анализа (эйлеровы координаты) приводит к редукции оси деформации раздела между растворами (сноса смесей). Поэтому в решении (12) ось сноса перемешанных вод сохраняется только как проекция координат  $D_{xt}$ , где ей соответствует особая точка [1, 29]. Численное решение о распределении  $c_i$  примеси вдоль границ внутреннего раздела в двухрастворной системе получено относительно этой особой точки. На рис. 3 приводятся сводка результатов в виде отдельных  $D_{xt}$ -кривых (1–8) на двумерной плоскости для стационарных условий – случай постоянного растягивания границ раздела [1, 2].

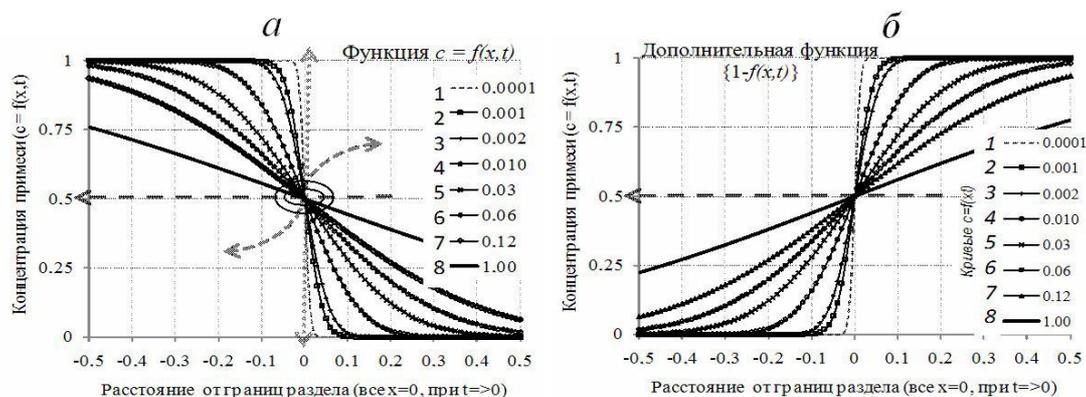


Рис. 3. Форма временных функций  $D_{xt}$  и  $D'_{xt}$  по данным численного решения плоской краевой задачи (12) в безразмерных координатах по аргументу  $t_i$ , которое выполнено по сечениям 1–8 одного и того же объема, движущегося в потоке растворов вдоль оси деформаций границы (и сноса вод), при  $t_i \{1 - 0.0001; 2 - 0.001; 3 - 0.002; 4 - 0.01; 5 - 0.03; 6 - 0.02; 7 - 0.12; 8 - \text{для } t_i \rightarrow \infty\}$ :

*а* – общий вид  $D_{xt}$ -кривых распределения  $c_i$  (вспомогательные построения на фазовой плоскости процесса уточняют особенности формирования двух семейств кривых по секторам, показаны: особая точка  $\{0; 0.5\}$  – проекция редуцированных осей деформации и переноса смесей, пунктирной линией по  $c_i = 0.5$  – условие полного перемешивания); *б* – общий вид распределения  $c_i$  дополнительной функции:  $D'_{xt} = 1 - D_{xt}$ , дающей симметричные решения  $D_{xt}$ -кривых в системе (12)

Результаты расчетов представлены на фазовой плоскости процесса перемешивания пары растворов как набор  $D_{xt}$ -кривых, построенных относительно особой точки. Приводятся кривые

для моментов безразмерного времени, аргумента  $t_i$ : 1 – 0.0001; 2 – 0.001, 3 – 0.002; 4 – 0.01, 5 – 0.03; 6 – 0.02; 7 – 0.12, предельный случай – кривая  $\delta$ , для  $t_i \rightarrow \infty$ . Трансформации  $D_{xt}$ -кривых по обеим окрестностям границ раздела по  $t_i$  закономерно меняют форму от близкой к ступенчатой в более пологие кривые сечений:  $2 \rightarrow 3, \dots, \rightarrow 7$ , аргумента  $\{t_1 \dots t_n, \dots t \rightarrow \infty\}$ . Так, ступенчатая функция в момент  $t_i \Rightarrow 0$  отражает полную непроницаемость поверхности раздела для процесса молекулярной или турбулентной диффузии (рис. 2б и 3). По  $D_{xt}$ -функции это аналог «квазитвердой» границы с соответствующими свойствами [23, 29–31, 35]. Предельный случай при  $t_i = 0$  – «отсутствие» контакта вод, формально запись  $t_i \Rightarrow 0$  более корректна. Скачок, характерный в момент, близкий к начальному контакту, при  $t_i \rightarrow 0$  (кривая 1, для  $t_i = 0.0001$ ) последовательно трансформируется в слабую криволинейную форму (кривые 2, 3), а затем в двояковыпуклые формы (кривые 4–7) со сменой знака кривизны  $D_{xt}$ -кривых в «особой точке» фазовой плоскости. Такая же эволюция проходит для дополнительной кривой  $D'_{xt} = 1 - D_{xt}$ . При этом трансформация кривых зеркальна и разворачивается в других секторах фазовой плоскости процесса перемешивания – симметрично основной  $D_{xt}$ -функции. Трансформация  $D_{xt}$ -кривых по сечениям протекает вплоть до стабилизации по  $c_i$  в равновесном состоянии. Это показано кривой  $\delta$  при  $t_i \rightarrow \infty$  как тах предел  $D_{xt}$ -функции. Стационарность состояния двухрастворной системы в этом случае определяется условиями в уравнениях (1–3) о сохранении скоростей деформации поверхности раздела и ее окрестностей: а) при постоянном сносе смесей и б) трении смежных слоев, восстанавливающих однородность состава растворов с развитием микроконвекции (см. выше и [1, 2, 24]). Это механизм поддержания существующих концентрационных разностей ( $\Delta c_i$ ) субстанции в смежных прослойках ЗС:  $\Delta\{c_n; c_{n+1}\} \neq 0$ . Тогда в слое  $\delta$  с концентрацией  $c_\delta$ , для примыкающих к нему  $\pm h_\delta$ , получаем условие:  $c_\delta \neq c_{\delta \pm 1}$  (см. ниже).

Для выявления особенностей перемешивания по секторам фазовой плоскости смешения [14] проведем разделительную линию, проходящую через точку  $c_i = 0.5$ , на рис. 3а, б – штриховые горизонтальные линии, нормальные к оси границы раздела, при  $x = 0$ . Такое построение выделяет для  $D_{xt}$ - и  $D'_{xt}$ -кривых по два сектора с однородными процессами, что имеет важный физический смысл. В верхней части рис. 3 выделены все растворы с безразмерной концентрацией  $c_i \geq 0.5$ , в нижней – смеси при  $c_i \leq 0.5$ . Следовательно, по системе (12), с одной стороны слоя, примыкающего к разделу, проходит процесс постепенного роста концентраций субстанции (примесей) – т. е. в «растворителе», с другой стороны границ – разбавление насыщенных субстанцией растворов тем же «растворителем». По условиям в системе (3) оба процесса развиваются независимо и изолированы по границе раздела. Сама же штриховая линия  $c_i = 0.5$  (рис. 3) соответствует состоянию двухрастворной системы при полном перемешивании (рассматривается случай равных объемов [4, 31]). Это также предельный случай, который соответствует определенному значению толщины слоя  $\delta$  (по критерию разрушения-слияния смежных прослоек), когда граница будет размываться, а концентрационные разности выравниваются:  $\Delta\{c_n = c_{n+1}\} = 0$ , т. е. смежные слои объединяются (см. выше и далее).

Для границы раздела последовательность  $D_{xt}$ -кривых в приведенной координатной сетке (рис. 3) следует рассматривать как постепенное изменение  $c_i$  во времени, т. е. отображающее перенос субстанции в фазовой плоскости двухрастворной системы [1, 5, 13–14]. Причем  $D_{xt}$ -кривые группируются по характерным секторам плоскости, а характер их изменения указывает на расхождение изолиний примеси в пространстве состояний при сносе вод в море. Исходя из распределения кривых по секторам, в «особой точке» на границе раздела, проходящей внутри плоско-параллельного слоя  $\delta$ , проходит формирование двух семейств  $D_{xt}$ -кривых с качественно различными процессами [12–17, 35]. Нами эти семейства разделены как: а)  $D_{xt}$ -кривые опреснения в геохимическом классе морских вод (на рис. 3 – сверху); б) семейство  $D_{xt}$ -кривых осолонения морскими растворами в классе материковых вод (на рис. 3 – внизу) [4, 5, 16].

**4. Пространственная форма  $D_{xt}$ -функций при деформации границ.** Проследим динамику одномоментных значений  $D_{xt}$  во времени по разным сечениям в потоке – вдоль оси деформации

растяжения и вектора сноса смешивающихся вод. Учтем, что лагранжева система координат в системах (1) и (3) подвижная, т. е. «привязана» к перемещающемуся объему жидкости (рис. 2б). Тогда по  $D_{xt}$ -кривым 1–8 (рис. 3) можно трансформировать временные  $D_{xt}$ -функции в их пространственную форму – семейства  $D_{hl}$ -кривых. Согласно системам (1–3), отсчеты аргументов расстояния  $l_i$  и времени  $t_i$  ведутся от точки (области) начального контакта растворов и до любых произвольных моментов (точек) на оси сноса, откуда  $l_i = f(t_i)$ . Сам расчет эквивалентен восстановлению редуцированной оси переноса  $l_i$  по стандартной процедуре [1, 29]. Проводится замена числовых значений  $t_i$  на расстояние  $l_i$ , пройденное одним и тем же элементарным объемом за промежуток от момента начального контакта в данную точку. Для расчета формы  $f_1(x_{i,n}, l_{i,n})$  учтем, что по оси ординат, нормальной к оси деформации-сноса, отсчет функций  $D_{xt}$  проводится в пределах, занимаемых плоско-параллельным слоем. Причем, для безразмерной формы значения  $x$  меняются в диапазоне  $[-0.5; +0.5]$ . Полную толщину обозначим  $h_0$ , тогда  $f_1(x_{i,n}, l_{i,n}) = f_1(h_0, l)$ . Саму пространственную функцию обозначим  $D_{hl}$ , а дополнительную к ней –  $D'_{hl} = 1 - D_{hl}$ .

Набор выбранных изолиний  $c_i$  для  $D_{hl}$  строим на оси деформации для значений, табулированных  $t_i$  для произвольного элемента  $f$ двигающегося в потоке вдоль редуцированной оси, которую обозначим  $0L_i$ . Результаты перерасчета решений по системе уравнений (12) показаны на рис. 4а и б – для функции  $D_{hl}$  и дополнительной пространственной функции  $D'_{hl} = 1 - D_{hl}$  соответственно.

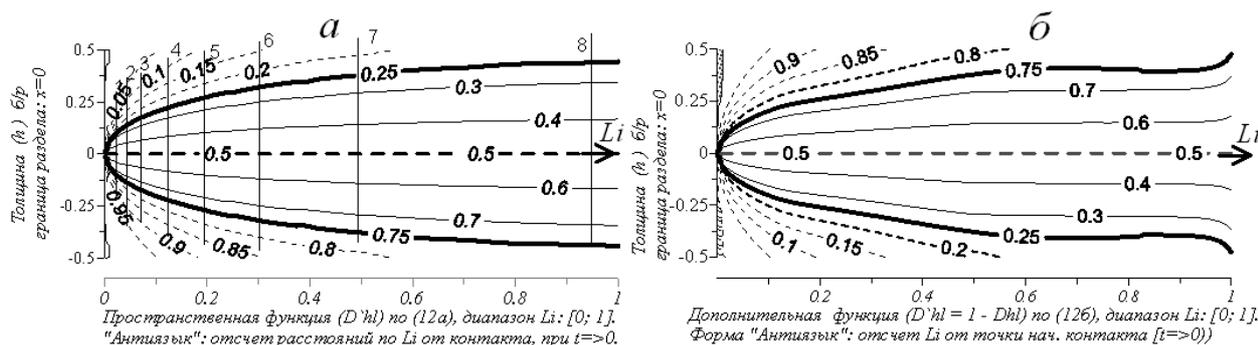


Рис. 4. Автомодельные формы пространственной функции  $D_{hl}$  (а) и ее дополнения  $D'_{hl} = 1 - D_{hl}$  (б) как двумерные распределения  $c_i$  (безразмерного вида) вдоль границ раздела растворов. Выделены два семейства изолиний распределения примеси (изогалин), вертикальными линиями на схеме (а) показаны сечения границ раздела (в порядке по аргументу  $t_i$ ). По оси ординат – векторы диффузии и шкала толщины (глубин) слоистой структуры ( $h_0$ ), отсчет от границ раздела, для  $x = 0$ ; по оси абсцисс  $0L_i$  – вектор деформации и средняя для линий тока, расстояния  $L_i$  отсчитываются от точки начального контакта, при  $L_i \Rightarrow 0$  ( $t_0 \Rightarrow 0$ )

Приведенные на рис. 4 изолинии  $c_i$  построены относительно пограничного слоя  $\delta$  и соответствуют его полному продольному сечению  $l_i$  (рис. 2) [1, 2]. Вертикальными линиями на рис. 4а показаны отдельные сечения, по которым строили  $D_{hl}$ -функцию. Граница раздела проходит по оси абсцисс  $0L_i$  и спрямлена. Исходно она ориентирована как средний вектор деформации, совпадающий с осредненным направлением переноса смешанных вод [1], и представлена фрактальной линией сложной формы и бесконечной длины (по определению [25, 33]). Ось ординат (рис. 4) характеризует толщину слоистой структуры  $h_0$  и соответствует направлению конвективно-диффузионного переноса примеси и растворителя по областям, разделенным плоско-параллельным пограничным слоем, формирующимся потоками смешивающихся растворов. Для всех ступеней смешения двухрастворной системы (рис. 4) распределение изолиний по полу-пространствам вдоль оси  $0L$  (деформации и сноса), как и выше

для  $D_{xt}$ -кривых, представлено двумя семействами изогалин (безразмерные). Изолинии упорядочены относительно границы раздела, проходящей по  $h_0 = 0$ , характеризуют их распределение вдоль растягиваемой границы при фронтальном переносе стоковым течением, с устойчивой деформацией границы (рис. 2б). Это и определяет устойчивость деформации всей поверхности раздела в данной системе растворов.

Пространственные  $D_{hl}$ -функции по уравнению (12) получились однообразной формы: они зеркально симметричны относительно слоя раздела. Процессы опреснения или разбавления сильных растворов морских вод (по рис. 4а) проходят в нижней части ламеллы для морских вод. Осолонение или насыщение вод материкового генезиса растворами морских солей проходит в верхней области слоистой структуры. Дополнительная функция  $D'_{hl} = 1 - D_{hl}$  на рис. 4б также симметрична по отношению к основной и описывает параллельные, но противоположно направленные процессы, фактически иллюстрируя принцип действия Ле Шателье – Брауна.

Отметим, что применение в формулах (1)–(3) подвижной системы отсчета позволяет проводить продольные сечения вне зависимости от сложности форм фрактала – поверхностей раздела, возникающих в турбулентном потоке [2, 24–29]). При этом для функций  $D_{hl}$  подвижная система отсчета в уравнениях (1)–(3) и глобальная система фиксированных прямоугольных координат (рис. 2б) [29, 30] совпадают только в одном случае – при смешивании равных объемов растворов [1, 31]. Исходя из структуры слоистых систем, это условие соблюдается только для «сжатой» на 1-й ступени перемешивания ламеллы ЗС (см. далее). В точке начального контакта растворов изолинии  $c_i$  сразу же начинают расходиться. Поэтому с учетом формы и характера распределения  $D_{hl}$ -изолиний на рис. 4а очевидно, что пространственные  $D_{hl}$ -функции  $c_i$  приобретают единую форму только относительно положения границы раздела в растворах. Подчеркнем еще раз, что на рис. 3 и 4 рассмотрен случай равных объемов перемешиваемых растворов (см. выше). Как и выше, линия раздела между процессами опреснения и осолонения, проходящая вдоль оси  $OL$ , разделяет области качественно разных физических явлений, связанных с осолонением и опреснением морских вод, что распространяется и на ламеллы ЗС река – море.

Поэтому, согласно свойствам границы раздела, любые трансформации субстанций в областях полу-пространств выше и ниже слоя раздела *изолированы* друг от друга и *проходят независимо*.

**5. Прикладные аспекты  $D_{xt}$ -функций: решение океанологических задач.** Безразмерная форма  $D_{xt}$ -функций в системе (12) требует ввода числовых множителей и нормирования для придания физического смысла согласно рассматриваемым процессам. Решения (3) в приближении по формуле (12) в виде  $D_{xt}$ -функций имеют практические приложения в анализе реальных явлений и процессов, проходящих в открытом море и областях река – море [5–11, 17–22]. Функции, сходные с полученными выше для семейств  $D_{xt}$ -кривых (рис. 3а), известны для распределений концентрации ионов при смешении вод разного генезиса из приложений гидрохимии или физико-химии слабых водных растворов [12–17, 23, 35]. Наибольшую известность они приобрели как «практические кривые», используемые при расчете объемного перемешивания, например, как кривые смешивания разных разбавлений раствора морских солей-полиэлектролитов.

Введение нормировочных множителей для  $D_{xt}$ -функций позволило использовать их в решении стандартных океанологических задач. На рис. 5 приведены результаты аппроксимации  $D_{xt}$ -кривыми таких задач [6, 8–11, 17, 32], а также их сравнительный анализ с результатами обработки стандартными методами прикладной океанологии по данным работ [4, 18–22]. В легенде схем приведены значения аргумента  $t_i \{t_1 \dots t_n, \dots t \rightarrow \infty\}$  от 0.000001 до предельного, по которым строили отдельные  $D_{xt}$ -кривые промежуточных решений в задачах. По ходу иллюстрации применения  $D_{xt}$ -функций проводили сравнительный анализ результатов обработки тех же данных традиционными для океанологических исследований методами [6, 11, 17, 31]. Конечные состояния, полученные стандартными методами, показаны овалами –

точки  $M$  (рис. 5). Для иллюстрации результатов расчета по  $D_{xt}$ -кривым пунктирами даны линии полного перемешивания и конечных состояний вод на основе  $D_{xt}$ -функций (рис. 3).

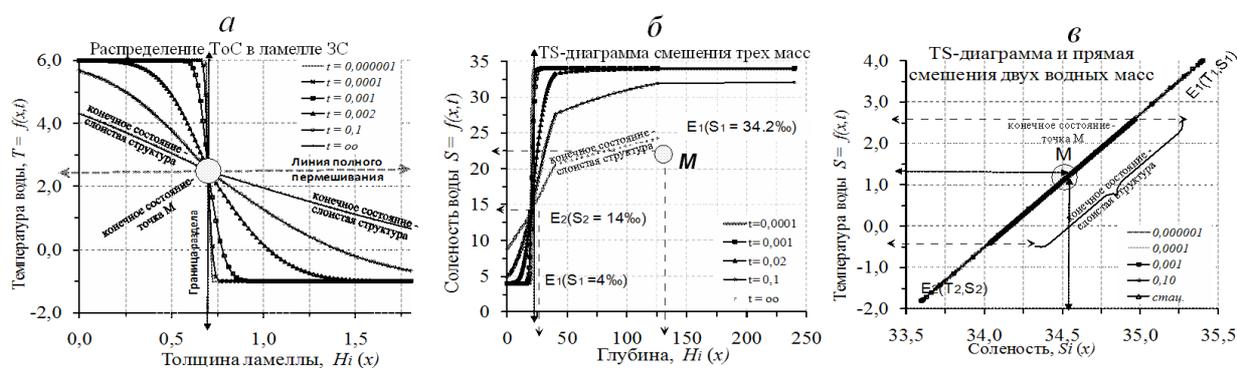


Рис. 5. Примеры прикладного применения  $D_{xt}$ -функций для решения океанологических задач с введением нормировочных множителей в семейство  $D_{xt}$ -кривых (см. рис. 3а). Проводится сравнительный анализ полученных результатов с итогами стандартных методов океанологии: для иллюстрации отличий применения  $D_{xt}$ -функции штрих-пунктиром проведены линии полного смешения и стационарные решения по  $D_{xt}$  по формуле (3) для слоистых структур при  $t \rightarrow \infty$  (см. текст):

$a$  – задача распределения энтальпии при перемешивании ( $T_w$ , °C) для ламеллы ЗС река – море, при  $h_0 = 1.6$  м, с границей раздела на глубине 0.7 м;  $b$  – анализ  $S$ -кривых трех водных масс;  $v$  – анализ  $T_w$ - $S$ -диаграмм перемешивания для двух водных масс по прямой смешения

**Задача А.** На рис. 5а изображено решение задачи о распределении теплосодержания ( $T_w$ , °C) в реальной слоистой структуре – ламелле ЗС классического эстуария в Кольском заливе в весенний период [20, 21]. Средняя толщина  $h_0$  ламелл на вершине эстуария составляет 1.6 м, граница раздела расположена на глубине 0.7 м [4]. В весенний период смесь морских и пресных вод с разной энтальпией проходит путь полного перемешивания от вершины к устью эстуария  $\sim L = 50$  км, в среднем за 5–6 суток. Рассмотрен случай, когда относительно теплые ( $T_w = 6$  °C) и сильно опресненные воды распространяются поверх холодных ( $T_w = -1.2$  °C) и соленых морских вод.

Результаты стандартного анализа перемешивания по  $T_w$ -кривым и с использованием  $D_{xt}$ -кривых в промежуточных состояниях подобны, вплоть до наступления стационарного состояния в ламелле ЗС по  $D_{xt}$ -функциям. В стандартном подходе конечным результатом перемешивания является точка  $M$ : кривая энтальпии вырождается [32]. В случае  $D_{xt}$ -кривых ламелла стабилизируется с постоянным расслоением, а основные различия между методами сводятся к конечному состоянию для толщи перемешанных вод. Известно, что в натуральных условиях расслоение сохраняется вплоть до размывания ламеллы в водах прибрежной зоны, а в морских водах – стратификация устойчиво соблюдается. Поэтому состояние для точки  $M$  – нереалистичный «идеал» [31]. Расчеты по  $D_{xt}$ -функции дают более точный результат: устанавливается  $\text{grad } T_w = \text{const}$  вплоть до разрушения структуры ламелл в ЗС. Это и позволяет сделать вывод о более адекватном описании процесса полученными нами  $D_{xt}$ -функциями.

**Задача Б.** На рис. 5б приведен анализ вертикального расслоения водной толщи по  $T_w$ ,  $S$ -кривым при трансформации вод по солености ( $S$ -кривые смешения). Нами рассмотрен случай трех стратифицированных по глубине водных масс ( $E_1, E_2, E_3$ ). Центры масс располагаются в толще вод на глубинах до 240 м (для  $E_1 = 5$  м,  $E_2 = 20$  м и  $E_3 = 130$  м), причем две верхние массы сильно опреснены ( $E_1 = 4$  ‰;  $E_2 = 14$  ‰) и подстилаются чисто морскими водами (при  $E_3 \approx 34.2$  ‰). Данные характеризуют гидрологическую обстановку у входа в Кольский залив (побережье Баренцева моря) в период окончания весеннего гидрологического сезона [4, 20].

Результаты применения стандартного метода  $S$ -кривых и использования  $D_{xt}$ -кривых на промежуточных стадиях перемешивания дают сопоставимые результаты, вплоть

до наступления стационарного состояния (по  $D_{xt}$ -кривым). Причем по стандартным  $T_w, S$ -кривым перемешивания конечный результат достигается образованием вначале двух, а далее одной общей массы, когда кривая смешения вырождается в точку  $M$ . Ее термохалинный индекс рассчитывают по формуле смешения:  $\bar{S} = (m_1 S_1 + m_2 S_2 + m_3 S_3) / (m_1 + m_2 + m_3)$  [31]. В методе  $D_{xt}$ -кривых формируются те же массы (см. рис. 5б, кривые), которые, трансформируясь, стабилизируются с соблюдением стратификации – в устойчивом состоянии. При этом сохраняется упорядоченность с расслоением по вертикали и разной стратификацией по трем областям водной толщи при  $\text{grad } S_{1,2,3} \uparrow \Rightarrow \text{const}_{1,2,3} \uparrow$ . Ядра масс сохраняются вплоть до истощения границ ламеллярной структуры (по критерию слияния) [1]. Различия результатов двух методов те же, что и выше для конечного состояния толщи воды, причем промежуточные результаты обоих методов схожи при полном различии конечных состояний для толщи перемешанных вод.

**Задача В.** На рис. 5в проводится анализ перемешивания двух первоначально однородных водных масс ( $E_1, E_2$ ) стандартным методом  $T_w, S$ -диаграмм и по  $D_{xt}$ -функциям. Массы имеют разные  $T_w, S$ -характеристики:  $E_1 \{S = 35.4 \text{ ‰}; T_w = 4.0 \text{ °C}\}$ ,  $E_2 \{S = 33.7 \text{ ‰}; T_w = -1.8 \text{ °C}\}$ , что соответствует условиям зоны Полярного фронта (северо-восточной части Баренцева моря) в летний период, при глубинах  $\sim 400$  м [21–22]. Как и выше, промежуточные результаты методами  $T_w, S$ -диаграмм и при использовании  $D_{xt}$  совпадают вплоть до стационарного состояния. На рис. 5в показана прямая смешения для  $D_{xt}$ -функции и точка конечного смешения  $M$  стандартного метода, различия, как и выше, в конечном результате перемешивания. В стандартном методе  $T_w, S$ -диаграмм – это точка  $M$ , или масса с термохалинным индексом (см. выше). В методе  $D_{xt}$ -кривых устанавливается прямая стратификация вод при устойчивом  $\text{grad } (T, S) \uparrow \Rightarrow \text{const}$ . Последнее соответствует наблюдаемому в природных условиях распределению  $T_w, S$ -индексов из областей полярного фронта в процессе формирования глубинных баренцевоморских вод [21–23].

Анализ трех задач показывает, что промежуточные результаты применения обоих методов будут сходными при одновременном полном различии конечного состояния в смеси вод. Это стратификация и расслоение для  $D_{xt}$ -функций либо гомогенное образование по стандартным методам. Совпадение с современными океанологическими методами наступает только в случае полного разрушения структуры вод – размывания границ раздела и нарушения условий стационарности, так как в отсутствие деформаций границ слоистая структура исчезает [1, 2]. Следовательно, полученное по формуле (12) решение задачи переноса и распределения концентраций у растягиваемых границ раздела является основным уравнением для аналитических расчетов (или моделирования) процессов перемешивания, в которых конечным состоянием для смеси является образование слоистой структуры (рис. 3–5). В рамках наших работ последствия таких решений определяются рядом эффектов в гидродинамическом пограничном слое толщиной  $\pm \delta$  (2.7) на растягиваемой границе раздела в паре перемешивающихся растворов [1, 2]. Фактически эти эффекты определяются *поверхностными силами*, действующими в объектах такого рода.

## Обсуждение результатов

**1. Кривые перемешивания: опреснение и осолонение растворов.** По решению (3) в системе (12) получены разные типы  $D_{xt}$ -кривых смешения и их дополнения, обычно наблюдаемые при опреснении океанических и осолонении растворов пресных вод. Приведенные в графической форме результаты двух семейств кривых позволяют провести их интерпретацию по особенностям изменения функций  $D_{xt}$  по разным секторам фазовой плоскости процесса смешения (рис. 3а). В выделенных секторах (рис. 3) располагаются только однородные по знаку кривизны и форме выпуклости  $D_{xt}$ -кривые, т. е. смеси в системе всегда будут упорядочены, как и их положение в фазовой плоскости  $\{c_i, x_i\}$ . Изменения кривых 1–8 (рис. 3а, б) по секторам носят прямо противоположный характер, определяя форму

и направление трансформации веществ в растворах. В приложении к взаимодействию растворов из разных геохимических классов вод [16] это будут качественно разные процессы по последствиям для их вещественного состава и среды [12–15].

Особенности физико-химических явлений, возникающих при разбавлении чистой водой (т. е. пресным стоком) водных растворов морских солей-полиэлектролитов давно известны [4–9, 31]. Для растворов морских солей из области разбавлений  $c_i \leq 0.5$ , расположенной с одной стороны границы раздела, будут проходить процессы, известные как «осолонение» пресных вод [13–16]. В таких смесях происходит резкое увеличение ионной силы растворов ( $I^Z$ ) и развитие системы явлений с необратимой трансформацией миграционных форм элементов, входящих в состав геохимического класса пресных вод [7–9, 18–22]. Их движущей силой является изменение  $I^Z$  за счет роста концентраций солей-полиэлектролитов [7, 9, 16], сопутствующие им процессы для природных вод – лавинная седиментация, перезарядка оболочек взвесей, изменения дисперсности, гидрофобность, сольватация и др. [13–14]. С другой стороны поверхности раздела в области смесей  $c_i \geq 0$  проходит противоположный процесс – «опреснение» (разбавление) растворов морских полиэлектролитов океанической солености слабыми растворами пресных вод. Это приводит к резкому снижению в смеси  $I^Z$  [13, 16, 35]. Для таких смесей развиваются необратимые и качественно другие формы трансформации их состава, наблюдаемые в геохимическом классе морских растворов [9, 12–16]. К сопутствующим опреснению явлениям относят гидрофильность, освобождение связанных в хелаты форм тяжелых металлов, образование коллоидных структур, растворение осадочных пород и др. [7, 13–15].

При этом разделяющая линия (при  $c_i = 0.5$ ) имеет точный физический смысл: она отображает условия достижения предельного равновесия при  $c_i = \text{const}$  (случай равенства объемов смешиваемых растворов) [31]. На фазовой плоскости  $\{c_i, x_i\}$  эта линия определяет момент «полного» перемешивания во всем объеме, когда концентрационные разности  $\Delta\{c_n = c_{n+1}\} = 0$ , – условие, когда смежные слои сливаются. Поэтому гомогенизация – есть разрушение пограничного слоя, в котором проходит граница раздела (см. точку «М» на рис. 5).

**2. Геохимическое содержание ветвей перемешивания.** Важный промежуточный результат перемешивания разных разбавлений морских вод связан с возникновением пограничного слоя при растягивании границ раздела, когда происходит формирование семейств однородных  $D_{xt}$ -кривых. С одной стороны границы это семейство  $D_{xt}$ -кривых опреснения, с другой – семейство  $D_{xt}$ -кривых осолонения, которые относятся к разным ветвям смешения вод разного состава и генезиса [1, 4, 5, 18–22]. Пространственная форма  $D_{hi}$ -функций также реализуется как два разных семейства изолиний  $D_{xt}$ -кривых смешения, при этом и семейства  $D_{hi}$ -функций формируются выше-ниже границы внутреннего раздела (рис. 1, 4).

Начальный момент для  $(l, t_0) \rightarrow 0$  по решению (12) соответствует ступенчатой функции (рис. 3). По системе (12) процесс смешения начинается прямо в точке начального контакта и в тот же момент распадается на две практически изолированные ветви перемешивания – ветвь опреснения морских и ветвь осолонения пресных растворов. В каждой из ветвей существуют специфические  $D_{xt}$ -кривые (рис. 3 и 4) при разных геохимических последствиях для состава примесей в растворах, принимающие *необратимый характер* (см. выше). Хотя обе ветви перемешивания возникают одновременно, при этом: а) они развиваются независимо друг от друга, как разделенные поверхностью со свойствами «твердых» границ; б) по-разному «растворяются» в массе окружающих ламеллы ЗС морских водах. Поэтому в разных ветвях перемешивания и для различных разбавлений морских вод, отличающихся по  $I^Z$ , на пути смешивания вод разного генезиса в структуре ламелл ЗС *одновременно в одном и том же сечении* будут проходить противоположные по физико-химическому содержанию процессы трансформации переносимых в растворах веществ [4].

Большая часть таких изменений несет для прибрежной зоны моря глобальные геохимические и экологические последствия. К ним мы относим, например, лавинную

седиментацию взвесей или их диспергирование, гидратацию/гидрофильность оболочек ионов с изменением знака заряда на коллоидах и в дисперсных структурах, выход/переход из/в хелатных комплексов тяжелых элементов (для токсичных форм), растворение/образование осадков или явления формирования дельт и каньонов [1, 3, 7, 9, 18–23, 35]. Это и позволяет сделать вывод о том, что в каждой из выделенных на рис. 3 и 4 областей, разделенных слоем  $\delta$ , проходят качественно различные явления – осолонение и опреснение. Для них действуют специфические законы и существуют специализированные семейства кривых смещения [1, 3]. С позиций гидрофизики (или механики процесса перемешивания), содержание этих различий – несущественно, тогда как геохимически это будут качественно разные явления. Глобальность таких последствий наиболее выражена и очевидна именно для областей река – море.

**3. Автомодельность решения и ее последствия.** По характеру решений системы (3) по формулам (12) слоистые структуры разобранного вида относятся к объектам особого рода – фракталам [1–3, 25]. Они обладают весьма необычными свойствами: их длина, площади и объемы в одних видах фракталов равны нулю, в других – близки к бесконечности [33]. Но основным свойством фрактала является их самоподобная структура, или автомодельность в системе (12). Это значит, что в самом простом случае даже небольшая часть такого объекта *содержит всю информацию* о всех масштабах [25]. Согласно рис. 3 и 4, автомодельное решение в системе (12) очевидно на функциях  $D_{xt}$  и  $D_{hl}$  (12.1) и дополнительных к ним  $D_{xt}(D'_{hl}) = 1 - D_{xt}(D_{hl})$  (12.2), что и показано на примерах рис. 5.

Так, геометрические масштабы разобранных слоистых структур различаются в  $10^5$  раз и более при неизменном сохранении самоподобия в распределениях  $c_i$  приведенного рода. Мультипликатор масштаба размерных форм в слоистых структурах по длине достигает  $10^5$  раз и более, а на рис. 5а, б вертикальный масштаб  $h_0$  меняется в  $\sim 10^4$  раз. При этом картина расхождения  $c_i$ -кривых по изолиниям воспроизводит детали всех масштабов (рис. 3, 5). Для безразмерной  $D_{hl}$  относительно  $0L$  масштаб мультипликатора составляет 0.00001 или  $\sim 10^5$  раз (рис. 4а, б). Следовательно, при реальных изменениях размеров (масштаба) структур такого же рода, будут выделяться и их основные структурные элементы, которые *характерны для всего указанного диапазона*. Для слоистых структур области река – море отметим такие особенности:

- а – вдоль границ выше-ниже границ разделов будут выделяться две ветви смещения: опреснения и осолонения морских вод (разбавления-насыщения в слабых растворах) (рис. 3–5);
- б – в разных ветвях перемешивания действуют специфические кривые (рис. 3а, 4а);
- в – в слоистой системе будут выделяться ее *устойчивая* и *нестационарная* части (рис. 4).

В настоящее время известно, что структура природных фракталов влияет на большинство проходящих в них физических процессах, выступая как носитель особых свойств. К таким объектам относят, например, русловые сети, древесные структуры, а также слоистые системы самого разного рода [2, 25, 33], которые *по-другому* рассеивают излучения, проводят массопотоки или электричество и т. п. Как следует из нашей и других работ [3, 13–14, 16, 25], в объектах этого рода несколько *по-другому* проходят и процессы массопереноса веществ [1, 2].

**4. Сравнительный анализ применения функции  $D_{xt}$ .** Полученные теоретические решения (3) в форме  $D_{xt}$ -кривых придают уже известным «практическим» кривым смешивания [31, 35] формальное теоретическое обоснование как независимого теоретического решения в системе дифференциальных уравнений общего вида (1–3). С другой стороны, распространение и реалистичность распределений этого же типа есть прямое подтверждение корректности результатов решения задачи о переносе примеси через границы внутренних разделов для двухрастворных систем в случаях их деформаций растягивания-сжатия [1–5, 18].

Сравнительный анализ методов, традиционно применяемых в океанографии (аналитическая геометрия  $T_w$ ,  $S$ -диаграмм, метод масс и кривые смещения), показывает, что основные различия двух подходов сводятся к разным конечным состояниям формирующихся

смесей вод. Промежуточные результаты расчета носят сходный характер вплоть до наступления стационарного состояния в методе  $D_{xt}$ -функций. При этом известно, что в натуральных условиях расслоение и стратификация водных масс, в том числе и при перемешивании, сохраняются, а исключения обычно оговорены. Недостатки стандартных методов анализа давно известны, и для коррекции конечного состояния толщи вод океанологами отработана система поправок [8, 31]. Авторы настоящей статьи предполагают, что как подобие промежуточных результатов, так и характер отличий, по сравнению с традиционными методами океанологии, определяются применением разных форм функции Крампа. Дело в том, что в полученных нами пространственно-временных функциях  $D_{xt}$  и  $D_{hl}$  используется функция ошибок  $\text{erf}(x)$ , а также ее дополнение  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$  [30, 34], при этом в классической океанологии используется прямая форма – интеграл вероятности  $\Phi(x)$  [31].

Сами стандартные методы анализа  $T_w$ ,  $S$ -кривых и метода масс теоретически разработаны В. Б. Штокманом [32] и развиты В. Н. Мамаевым [31] до уровня общей теории перемешивания (океанических вод). При этом расчеты изначально проводились с использованием обычного интеграла вероятностей  $\Phi(x)$ , табулированного по справочникам [30]. Применяемая нами функция ошибок  $\text{erf}(x)$  и ее дополнения:  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$  введены в науку сравнительно недавно [30, 34] и не были известны основателям русской или советской океанологии. Этими методами пользуются до сих пор при решении прикладных задач и современные океанологи (без их модификации). В своих работах, решая задачу о распределении концентраций для случая растягивания границ раздела жидких систем, мы использовали современный подход для решения дифференциальных уравнений (1–3), что и привело к соответствующим результатам.

Выделим общеизвестный факт, что в теории вероятности все эти функции связаны друг с другом точными соотношениями. Например, связь между разными формами функции Крампа имеет вид [30, 34]: 
$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(x/\sqrt{2})] = \frac{1}{2} \Phi_0(x).$$

Это объясняет как причины схожести промежуточных результатов, так и различия для конечных состояний водных масс, при одновременном использовании обоих подходов в одной и той же стандартной задаче. Поэтому причиной выявленных отличий результатов обработки, по нашему мнению, является использование разных форм представления  $\Phi(x)$ , с одной стороны, стандартного интеграла  $\Phi(x)$ , с другой – функции ошибок  $\text{erf}(x)$  и ее дополнения:  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ , имеющих различные конечные (финальные) решения. Это и приводит к разным конечным состояниям смешивающихся вод. Как правило, применение стандартного интеграла  $\Phi(x)$  приводит к *вырождению* изолиний в точку на плоскости, а в случае применения  $\text{erf}(x)$  устанавливается устойчивая стратификация – *расслоение* смесей. Последнее соответствует большинству наблюдений в природных условиях, в отличие от результатов с использованием  $\Phi(x)$ .

Полученные авторами решения для систем (1–3) создают возможность разрабатывать формы аналитического описания явлений перемешивания моделями, имеющими физический смысл. Приведенные на рис. 5 примеры приложения  $D_{xt}$ -функций к реальным гидрофизическим обстановкам морей Русской Арктики позволяют сделать вывод, что по сравнению с общепринятыми методами, при всей схожести промежуточных результатов, более адекватным будет описание перемешивания пространственно-временными функциями  $D_{xt}$  и  $D_{hl}$ . Изначально они разрабатывались нами для приложения к слоистым структурам жидкость-жидкость общего вида [1, 2, 24] и основаны на функции  $\text{erf}(x)$  и ее дополнении  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ . Такие решения более соответствуют наблюдаемым в природе процессам, причем для разных типов слоистых структур, т. е. не ограничены случаем прибрежья и ламеллами ЗС река – море [1, 2, 19–22].

**5. Критерий объединения прослоек: рост пограничного слоя и расхождение изолиний.** Для системы уравнений (3) мы отмечали условие о соблюдении соотношения между размером турбулентных вихрей в потоке и микроформами рельефа в пограничном слое [1, 2]. Для размеров

учетной  $f$  площади  $s$  (рис. 1 и 2а) уточним его как ( $s \gg \delta \approx h_0$ ) (2.8). При этом для структуры слоя  $\delta$  – границы раздела в уравнении (12) существует и неявное ограничение, определяющее соотношение между размером  $\delta$  и смежных с ним прослоек, так учитывая, что  $\delta = [|\delta| + |\delta|]$  (рис. 1 и 2а), формально между  $(\pm\delta)$  и  $(\pm h_\delta)$ . Учет этого ограничения позволяет правильно интерпретировать некоторые из решений (3) по уравнению (12).

Для формализации определимся, что  $\pm h_\delta$  – характерный минимальный размер смежных прослоек, прилегающих с обеих сторон к поверхности раздела  $\delta$  (условно «нулевой», см. выше). Если обозначить для  $\delta$  концентрацию  $c_\delta$ , то в примыкающих прослойках  $\pm h_\delta$  они запишутся как  $c_{\delta\pm 1}$ . Выше решениями по формуле (12) получено, что при данных температуре, вязкости и гидродинамических условиях (в прочих равных условиях) [23, 35] величина  $c_\delta$ ,  $c_{\delta-1}$  и  $c_{\delta+1}$  постоянна в данной системе растворов (рис. 3–4), вплоть до полного разрушения структур и исчезновения границ раздела [1, 4]. Это дает основания для формулирования критерия *слияния (объединения) смежных прослоек*. Критерий, выписанный относительно  $c_i$  для окрестностей  $\delta$ , в виде формального логического выражения существования (и сохранения) хотя бы части стабильной структуры на границах раздела, можно записать таким способом:

$$\text{если } [(c_\delta \neq c_{\delta+1}) \vee (c_\delta \neq c_{\delta-1})] \subseteq (\pm h_\delta). \quad (13)$$

где  $\subseteq$  – логический предикатор или *функтор* включения части общего выражения.

В такой форме запись в (13) характеризует самые общие условия *размывания границ разделов* слоистых структур. Для решений по (12) его смысл сводится к тому, что в отличие от записи в (3), уменьшение толщины (и объема) прослоек  $\pm h_\delta$  вдоль двусторонней поверхности  $\delta$  будет иметь физический смысл не во всех случаях. Действительными будут те из решений в (12), для которых толщина  $\delta$  остается меньше размеров любой из примыкающих прослоек  $\pm h_\delta$  (рис. 2а), иначе говоря, они объединяются за счет слияния. Формально (и фактически), для решений системы (3) получим, что начиная с момента контакта (при  $t_0 \rightarrow 0$ ) слой  $\delta$  непрерывно расширяется за счет объединения и слияния смежных с ним прослоек (и слоев). Именно такая особенность и определяет тип распределения  $c_i$  относительно пограничного слоя  $\delta$ , что наиболее выражено для пространственной функции  $D_{hl}$  и дополнений:  $D'_{hl} = 1 - D_{hl}$  (рис. 3 и 4).

**6. Принцип локальных равновесий в слоистых структурах.** Приведенные на рис. 3 и 5 расчеты по формуле (12), а также их сравнение с традиционно используемыми методами подтвердили достоверность применяемых нами схем (рис. 1, 2) и формулировок в (1–3), используемых в задаче переноса веществ через границы раздела. Учитывая сложность формы поверхностей раздела для слоистых структур [16, 25, 33], их пространственно-временную протяженность (масштаб для  $L_i \sim 10^{5-6}$  м, а для  $t_i \sim 10^5$  с), а также непрерывность прохождения процесса смешения и его характерную скорость, имеющую порядок  $\sim 10^{1-2}$  с [1–3], необходимо сформулировать согласующий их принцип. Назовем его принципом *существования локально-мозаичных равновесий* в системах растворов, на примере ламеллы ЗС река – море.

В работе [1] показано, что перенос субстанции через границу в системе двух растворов разного состава по условиям (3) будет невозможен: а) для неразрывной среды; б) при стационарности деформаций. Через *сплошную границу раздела* массоперенос может проходить по направлению падения концентрации (по Фикку:  $\text{grad } c_i$  или  $\Delta c_i$ ) только с нетурбулентной диффузией. Это случай, когда деформация растягивания-сжатия границ отсутствует, формально нарушаются условия стационарности. Поэтому диффузионные процессы и появление потока ионов  $J(x, t) \neq 0$  через границу раздела в двухрастворной системе могут (и будут) локально развиваться на тех участках, где проходят *множественные изменения* или развитие форм *микрорельефа – перегибы для поверхности раздела*. К таким зонам относятся локальные области и отдельные участки вдоль поверхностей раздела, на которых при смене знака кривизны микрорельефа ( $\pm$ )деформации растягивания-сжатия локально (временно) будут снижаться или полностью отсутствовать [1]. Такие локальные равновесия могут приводить и к возникновению

условий для развития молекулярной диффузии ионов через внутренние разделы в растворах. Причем, они возможны только в тех случаях, если фазы (растворы), находящиеся в прямом контакте, *обратимо взаимодействуют* (в термодинамическом смысле [13–16, 23, 35]).

Под *локальным («мозаичным») равновесием* понимается гипотеза о существовании в смесях, примыкающих к поверхностям раздела, множества промежуточных состояний, одновременно наступающих в разных частях данной физико-химической системы во времени, а «мозаично» – в пространстве, каждое из которых можно рассматривать как *равновесное по отношению к скорости регулирующим* диффузию физико-химическим процессам и реакциям.

Для произвольного момента, возможность развития диффузии ионов через границу раздела будет определяться пространственно-мозаичным нарушением стационарности условий, которые сформулированы для систем (1–3). Формально эти факторы действуют через условия, определяющие устойчивость поддержания скоростей деформации слоистых структур, например, растягивание границ ламелл в ЗС стоковыми и градиентными течениями. Введение принципа *локальных равновесий* позволяет формально корректно применять в расчетах трансформации веществ, основное уравнение термодинамики Гиббса – Дюгема, а также уравнения стехиометрии для реакций с диффузионно контролируруемыми процессами в растворе (или возможные только при условии развития молекулярной диффузии [1, 2, 13, 23, 35]). В целом формирование пространственно «мозаичных» *равновесий* у границ раздела в растворах следует и из более универсального принципа [13, 14], который позволяет неравновесную в целом систему разделять на отдельные части: подсистемы – структуры – области, в которых локально (в пространстве – времени) развиваются процессы, не соответствующие ее общему (условно среднему) состоянию.

## Выводы

1. Сформулирована задача о переносе субстанции через границу внутреннего раздела растворов разного состава для стационарных условий – при деформации растягивания пары разделяющих прослоек, примыкающих к границе неограниченной протяженности. Аналитическое решение получено в виде  $D_{xt}$ -функций относительно особой точки в плоском пограничном слое, ограниченном двумя полупространствами для ламинарного и турбулентного режима переноса (определяется условиями о неразрывности для границ разделов).

2. При аналитическом решении системы уравнений получены безразмерные формы кривых объемного перемешивания двух видов:  $D_{xt} = f(x, t)$ . Они соответствуют реально наблюдаемым процессам опреснения вод океанической солености и осолонения слабых растворов пресных вод.

3. Пространственная форма функций  $D_{hl} = f(x, l_n)$  также реализуется в виде двух семейств изолиний, образующихся выше и ниже границ внутренних разделов в растворах. Для случая равенства объемов перемешиваемых растворов системы – функция зеркально симметрична.

4. Две ветви перемешивания разбавлений морских солей – осолонения-насыщения субстанциями и опреснения-разбавления – возникают одновременно и развиваются независимо друг от друга. Они разделены «*полупроницаемой*» поверхностью – для молекулярного диффузионного переноса, которая одновременно является «*квазитвердой*» – относительно турбулентных пульсаций из потоков и определяется характером поверхностных сил, действующих в объектах данного рода.

5. Автомодельность решения (12) служит основой ряда заключений о формировании и основах устойчивости слоистых структур в разных масштабах: а) самоподобие – определяет, что любые преобразования размеров системы сохраняют ее подсистемы, свойства и структуру, существующие (выявленные) на других масштабах и с другим разрешением; б) каждая часть слоистой структуры содержит *информацию о всей системе* (с поправкой на масштаб); в) однородность форм распределения  $c_i = f(D_{xt})$  в объеме, занятом жидкостями, определяется свойствами пограничного слоя  $\delta$ , разделяющего взаимодействующие растворы разного состава, вплоть до момента полного перемешивания (с вырождением кривых в точку на плоскости).

6. Реальная причина различий между результатами обработки океанологических данных разработанным методом  $D_{xt}$ -функций и стандартными методами океанологии сводится, с одной стороны, к использованию интеграла вероятности  $\Phi(x)$ , с другой – функции ошибок  $\text{erf}(x)$  и дополнений  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ , приводящих к разным конечным состояниям в водных массах.

7. Формальный критерий слияния смежных прослоек, примыкающих к пограничному слою  $\delta$  относительно  $c_i$ , в логической форме:  $\rightarrow[(c_\delta \neq c_{\delta+1}) \vee (c_\delta \neq c_{\delta-1})] \subseteq (\pm h_\delta)$  характеризует условия постоянного развития границы раздела за счет неограниченного расширения слоя  $\delta$  в двухрастворной системе. Критерий согласован с решением в (12), когда с момента ( $t_0 \rightarrow 0$ ) слой  $\delta$  непрерывно расширяется за счет объединения со смежными прослойками, что определяет наиболее существенные особенности распределения  $c_i$  относительно этого слоя.

8. Под локальным («мозаичным») равновесием понимается гипотеза о существовании в смесях, примыкающих к поверхностям раздела, множества промежуточных состояний, одновременно наступающих в разных частях данной физико-химической системы во времени (и «мозаично» в пространстве), каждое из которых можно рассматривать как равновесное по отношению к скорости регулирующим диффузию физико-химическим процессам и реакциям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бардан С. И., Долгоносов Б. М. Физические основы устойчивости слоистых структур области река – море и натурные данные по Кольскому заливу // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 2. С. 36-53.
2. Долгоносов Б. М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 440 с.
3. Долгоносов Б. М., Губернаторова Т. Н. Механизмы и кинетика деструкции органического вещества в водной среде. М.: КРАСАНД, 2011. 208 с.
4. Бардан С. И. Количественный анализ и динамика области смешения морских и материковых вод Южного колена Кольского залива (Баренцево море) // Изучение и освоение морских и наземных экосистем: Материалы междунар. науч. конф. (Ростов-на-Дону, 6–10 июня 2011 г.). Ростов-н/Д: ЮНЦ РАН, 2011. С. 20–24.
5. Бардан С. И. Система однородных показателей при количественном описании смешения морских и пресных вод и классификационные критерии деления областей их взаимодействия // Природа морской Арктики: Материалы междунар. науч. конф. (Мурманск, 10–12 марта 2010 г.). Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 24–27.
6. Яковлев Н. Г. Численное моделирование крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана и его морей: дис. ... докт. физ.-м. наук: 25.00.29. М.: ИО РАН, 2005. 316 с.
7. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
8. Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 324 с.
9. Emelianov G. M. The Barrier Zones in the Ocean. Berlin – Heidelberg: Springer Verlag, 2005. 636 p.
10. Долгополова Е. Н., Исупова М. В. Классификация эстуариев по гидродинамическим процессам // Водные ресурсы. 2010. Т. 33, № 3. С. 274–291.
11. Лапина Л. Э. Динамика течений и особенности переноса консервативной примеси в устьевых областях приливных рек. Сыктывкар: ИММ УрО РАН, 2001. 140 с.
12. Перельман А. И. Изучая геохимию... (О методологии науки). М.: Наука, 1987. 152 с.
13. Злобин А., Нянишкене В., Путинцев Н. Экосистемы водорослей в изменяющихся условиях среды обитания (Теория, эксперимент, предположения). Вильнюс: Моклас, 1987. 296 с.
14. Крайнов С. Р., Швеиц В. М. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1992. 463 с.
15. Алёкин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 343 с.
16. Вернадский В. И. История минералов земной коры. Т. 2: История природных вод / Избр. соч. Т. IV, кн. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 7–538.
17. Фёдоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
18. Бардан С. И. Закономерности формирования пространственной структуры бактериоценозов в зимнем планктоне Печорского моря // Изв. РАН. Сер. географ. 2014. № 6. С. 49–61.
19. Бардан С. И. Размерная структура и морфологический состав зимнего бактериопланктона Печорского моря и условия его формирования // Микробиология. 2013. Т. 82, № 6. С. 741–752.
20. Бардан С. И. Ишкулова Т. Г. Суточная изменчивость гидрохимических параметров в начальный период органотрофной фазы функционирования экосистемы Кольского залива (Баренцево море) // Изв. РАН. Сер. географ. 2010. № 4. С. 90–100.
21. Бардан С. И., Сербов Н. Г. Формирование бимодального сценария сукцессии автотрофных компонент планктона в Баренцевом и Черном морях и оценка роли температурного фактора // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2013. Вип. 16. С. 90–114.
22. Бардан С. И., Сербов Н. Г. Фракталы в биогеографических закономерностях определяющих состав бактериоценозов зимнего планктона на примере Печорского моря // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2014. Вип. 17. С. 141–156.
23. Симкин Б. Я., Шлейхет И. И. Квантово-механическая и статистическая теория растворов. Вычислительные методы и их применение. М.: Химия, 1989. 256 с.
24. Долгоносов Б. М. Бинарная кристаллизация при турбулентном смешивании растворов // Теоретические основы химической технологии. 1995. Т. 29. С. 285–299.
25. Зеленый Л. М., Милованов А. В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // Усп. физ. наук. (Обзоры актуальных проблем). 2004. Т. 174, № 8. С. 809–852.
26. Muzzio F. J., Ottino J. M. Dynamics of a lamellar system with diffusion and reaction: Scaling analysis and global kinetics // Phys. Rev. 1989. A 40 (12). P. 7182–7192.
27. Ottino J. M., Rantz W. E., Macosko C. W. A lamellar model for analysis of liquid – liquid mixing // Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34. P. 877.
28. Rantz W. E. Fluid mechanical mixing – lamellar description /

Ulbricht J. J., Patterson G. K. (eds.) // *Mixing of Liquids by Mechanical Agitation*. New York, 1985. P. 1. **29.** Справочник по триботехнике: в 3 т. Т. 1: Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1989. 400 с. **30.** Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров (определения, теоремы, формулы). М.: Физматгиз, 1984. 831 с. **31.** Мамаев О. И. Морская турбулентность: (перемешивание вод Мирового океана): тексты лекций. М.: Изд-во МГУ, 1970. 204 с. **32.** Штокман В. Б. Основы теории  $\Theta$ - $S$ -кривых как метода изучения перемешивания и трансформации водных масс моря // *Проблемы Арктики*. 1943. № 1. **33.** Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая: Ижевск, 2001. 528 с. **34.** Теслер Г. С., Зы Хак Зунг. Вычисление функции интеграла вероятностей и ей обратной // *НАНУ. Математичні машини і системи*. 2004. № 3. С. 31–40. **35.** Татевский М. В. Теория физико-химических свойств молекул и веществ. М.: Изд-во МГУ, 1987. 239 с.

### Сведения об авторах

*Бардан Сергей Иванович* – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории планктона Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: bardanap@gmail.com

*Долгоносов Борис Михайлович* – доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования водно-экологических процессов Института водных проблем РАН (г. Москва)

E-mail: borismd@aqua.laser.ru

### Author Affiliation

*Sergey I. Bardan* – PhD (Bio), Leading Researcher of the Laboratory on Plankton of the Murmansk Marine Biological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: bardanap@gmail.com

*Boris M. Dolgonosov* – Dr. Sci. (Bio), Head of the Laboratory on Modelling of Aqua-Ecological Problems of the Institute of Aquatic Problems of the RAS

E-mail: borismd@aqua.laser.ru

### Библиографическое описание статьи

*Бардан С. И.* Формирование слоистой структуры двухрастворной системы по автомодельному решению задачи распределения примеси на границе раздела: ветви перемешивания / *С. И. Бардан, Б. М. Долгоносов* // *Вестник Кольского научного центра РАН*. – 2016. – № 2. – С. 60–82.

### Reference

*Bardan S. I.* Lamellar Structure Formation in Double Solution System by Self-Similar Solution for Admixture Distribution near Borderline: Branches of Interfusion / *S. I. Bardan, B. M. Dolgonosov* // *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 60–82.

УДК 550.4 (471.21)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ  
В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ  
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ БАСЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ**

**В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин**

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

**Аннотация**

Проведены исследования содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) в донных отложениях озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря. Среди исследованных тяжелых металлов наибольшее загрязнение отмечено для Pb: высокие значения коэффициента загрязнения имеет половина исследованных озер. Другие изученные халькофильные элементы (Cd, Hg, As), как и приоритетные для центральных промышленных районов Мурманской обл. загрязняющие тяжелые металлы (Ni, Cu, Zn и Co), оказывают не очень существенное влияние: коэффициенты загрязнения этими элементами для большинства исследуемых озер относятся к умеренным по классификации Л. Хокансона.

**Ключевые слова:**

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

**REGULARITIES OF HEAVY METALS DISTRIBUTION IN SEDIMENTS OF LAKES OF EASTERN PART  
OF THE MURMANSK REGION OF THE WHITE SEA BASIN**

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

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

**Abstract**

Researches of the content of heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) in sediments of lakes in the eastern part of the Murmansk region of the White Sea basin have been conducted. Among the studied heavy metals, the highest contamination have been noted for Pb, namely a half of the studied lakes has high values of contamination factor. Other studied chalcophile elements (Cd, Hg, As) have no real impact on pollution as well as heavy metals being typical pollutants for central industrial areas of the Murmansk region (Ni, Cu, Zn and Co). Values of contamination factor for these elements in the majority of the studied lakes belong to moderate contamination factors according to the classification of L. Håkanson.

**Keywords:**

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



**Введение**

Ряд прямых и косвенных факторов, среди которых доминирующими являются климатические, геологические и ландшафтные особенности территорий водосборов, близость Белого моря, обусловили разнообразные и специфичные условия формирования качества озерных вод юго-востока Мурманской обл. В целом, это ультрапресные и олиготрофные водоемы с небольшой прозрачностью вод. Большое влияние на качество вод оказывают залесенность (в среднем 35.8 %) и заболоченность (в среднем 28.7 %) водосборных бассейнов.

Два типа водных систем характерны для юго-восточной части Мурманской обл.: крупные озерно-речные системы основных рек и многочисленные малые озера и реки. По происхождению

озера делятся на две основные группы: ледниковые и тектонические. Большинство озер относится к ледниковым, которые имеют округлую или овальную форму и небольшую глубину. Иногда встречаются запрудные озера в составе рек, которые образовались в результате преграждения мореной какого-либо поверхностного стока воды. Ложа этих озер имеют удлиненную форму и большую глубину. Озера тектонического происхождения расположены в глубоких котловинах, образованных тектоническими разломами, имеют вытянутую форму, сложную конфигурацию береговой линии и неровный рельеф дна.

Поток поверхностных вод с водосборной площади, осадки в виде дождя и снега, поверхностный сток, испарение – основные составные части водного баланса озер. Для водоемов юго-восточной части Мурманской обл. характерно преобладание поверхностного притока и стока в водном балансе, осадки близки к потерям на испарение и могут составлять 2–16 % уравненного баланса [1].

Для восточной части Мурманской обл. все большую актуальность приобретает проблема оценки последствий долговременного аэротехногенного загрязнения водоемов, расположенных в фоновых районах. Территория восточной части Мурманской обл. в целом не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов, кроме нескольких водоемов на водосборе оз. Умбозеро. Эти озера расположены в районе деятельности комбинатов «Ловозерский ГОК» (р. Сура) и «Апатит» (рудник «Восточный», р. Вуоннемйок). 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. Эти вещества переносятся воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

Загрязнение водоемов сопровождается процессом закисления, которое определяется количеством кислотных осадков, выпадающих на территорию водосбора, продолжительностью их воздействия; геохимическими особенностями региона, гидрохимией и морфологией водоемов и др. Озера восточной части Мурманской обл., расположенные ближе к горлу Белого моря, 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 юго-востока Кольского полуострова**

Юго-восточная часть Мурманской обл. в районе морского побережья сложена микроклиновыми гранитами. Коренные кристаллические породы скрыты под тонкой подушкой тундрового почвенно-растительного покрова и часто выходят на поверхность, обнажая кислые гранитогнейсовые породы, что обуславливает низкую кислотонейтрализующую способность коренных пород и щелочность поверхностных вод. 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. В восточной части Кольского п-ова на палеозойских осадочных породах образованы, как правило, структурные плато с эрозионными формами рельефа. Горные массивы приурочены к относительно молодым интрузиям (Ловозерские и Хибинские тундры). В среднем течении р. Стрельна и в верхнем и нижнем течении р. Варзуга отмечены мощные покровы ленточных глин и горизонтально-слоистых песков. Образования слоистых глин встречаются по среднему течению р. Умба. В верховьях рек Поной, Стрельна и Варзуга расположены громадные болотные массивы.

Тектоника юго-восточной части полуострова 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. Разломы в настоящее время заняты реками, впадины – озерами. Нередко впадины приобретают лопастную форму.

В центре Мурманской обл. расположены крупные возвышенности – Хибинские и Ловозерские тундры. Высота отдельных гор достигает 1000–1200 м над ур. м. Горные массивы имеют платообразный характер вершин и крутые вогнутые склоны (50–60°). Продолжением горного массива является район возвышенностей Панские тундры в бассейне р. Пана с высотами до 500–600 м. Еще дальше на восток начинается широкое плато высотой 300–350 м (возвышенность Кейвы), разделенное глубокими ущельями-долинами. К югу и востоку от гряды Кейв местность имеет волнисто-грядовой рельеф с высотами 120–150 м. Местность здесь круто обрывается к горлу Белого моря и более полого спускается к югу, переходя в заболоченную низменность с отдельно выступающими грядами. Абсолютные отметки местности снижаются до 150–50 м. Вдоль побережья Белого моря тянется цепь гряд высотой до 250–280 м. Западнее ее, от оз. Колвицкое, местность имеет сильно расчлененный горный рельеф (Лувеньгские и Колвицкие тундры, Елки-Тундры). Севернее находится Южно-Кольская депрессия (100–120 м), которая простирается на восток до оз. Вялозеро. В ее пределах расположены большие болотные массивы и многочисленные мелкие и крупные озера, вытянутые в юго-восточном направлении.

Климат восточной части Кольского п-ова находится под смягчающим влиянием Баренцева и Белого морей, но Белое море зимой покрывается льдом. При удалении вглубь полуострова влияние морей довольно быстро исчезает, термический режим становится несколько суровее и продолжительнее на 1 месяц [1]. В восточной части полуострова вследствие более сглаженных форм рельефа климат отличается меньшей территориальной изменчивостью. Осадки довольно значительны (в среднем около 700 мм в год), распределяются по площади сравнительно равномерно, но в горах быстро возрастают с высотой.

Для восточной части Кольского п-ова наиболее характерны подзолистые почвы с различной степенью оподзоленности, которые развиваются на любых породах в зоне тайги, в местах развития лесотундровых ассоциаций, часто встречаются в тундровой зоне. На самом берегу Белого моря (Стрельна, Тетрино) встречаются суглинистые подзолы. В условиях значительного увлажнения бедные растворимыми веществами подзолистые почвы минерализованы незначительно. Также распространены торфяно-болотные почвы, среди которых встречаются примитивные тундровые почвы, приуроченные к возвышенным и более расчлененным местам. Тундровые почвы свойственны зоне тундр, а также горным вершинам и склонам над границей лесной растительности. Для восточной прибрежной части характерны примитивные тундровые почвы.

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

На гидрохимические параметры поверхностных вод юго-восточной части Мурманской обл. основное влияние оказывают подстилающие породы на территории водосборов, а также ветры, которые приносят воздушные массы, насыщенные морскими аэрозолями Баренцева и Белого морей. Расположение озер в заболоченной тундре и близость к побережью приводит к изменению общей минерализации и природного соотношения основных ионов в поверхностных водах. В озерах, расположенных в непосредственной близости от Белого моря (от побережья до 17 км вглубь полуострова), наблюдается более высокое содержание хлоридов.

Так как Белое море зимой замерзает, содержание хлоридов в озерах намного меньше, чем у побережья Баренцева моря. Выпадение серы оказывает незначительное воздействие на данный район. Концентрации сульфатов выше только в озерах вблизи побережья Белого моря и расположенных недалеко от центрального промышленного района верховьях водосбора р. Умба. По мере удаления от побережья Белого моря происходит повышение минерализации вод за счет увеличения заболоченных площадей. В большинстве озер отмечается природная минерализация вод, характерная для водоемов Кольского п-ова. В основном минерализация вод изменяется в диапазоне от 1.7 до 111.0 мг/л (в среднем 22.4 мг/л). Исключение составляют несколько озер, расположенных в районе деятельности рудника «Восточный» АО «Апатит», общая минерализация в которых в зависимости от сезона изменяется в пределах 36.6–185.4 мг/л (в среднем 99.4 мг/л).

Результирующим показателем ионного равновесия вод считается рН. Территориальное распределение данного параметра довольно равномерно и не зависит от удаления от побережья. Наибольшее количество минимальных значений наблюдается в центральных заболоченных областях Кольского п-ова и в прибрежной тундровой зоне. В этих районах находятся озера с рН воды около 5 ед. Низкие значения рН определяются содержанием гумусовых кислот. Эти озера, в отличие от техногенно закисленных, действительно отличаются более высоким содержанием органического вещества и цветностью вод. Среди обследованных водоемов на юго-востоке Кольского п-ова озера с рН менее 6 составили 30 %. Озера с низкими значениями рН, как правило, невелики по размерам: их площадь составляет в среднем менее 0.3 км<sup>2</sup>.

В настоящее время в большинстве озер юго-восточной части Мурманской обл. сохраняется относительная природная стабильность гидрохимического состава вод и их сезонная цикличность за счет динамического равновесия природных процессов и отсутствия серьезного антропогенного воздействия. Химический состав вод малых озер исследованной территории отражает зональную и региональную специфику условий его формирования.

### Материалы и методы

При написании этой статьи использовались результаты научно-исследовательских работ Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, включая инженерно-экологические изыскания, например, по месторождению Федоровы тундры [2], а также монографии [3]. Статья является продолжением предыдущих, касающихся оценки экологического состояния озер Мурманской обл. по результатам исследования химического состава донных отложений (ДО) [4–8]. Исследуемые озера водосбора Белого моря, в которых были отобраны образцы ДО, делятся на три группы: 1 – озера водосбора р. Умба, 2 – озера водосбора р. Варзуга и 3 – озера водосбора р. Поной. Химический состав ДО исследовался в 15 озерах бассейна Белого моря, из них 8 озер принадлежит к первой группе, 4 – ко второй, 2 – к третьей, а оз. Летнегорское относится к водосбору руч. Жемчужный (табл. 1, рис. 1). Большинство озер, за исключением некоторых из водосбора р. Умба, располагаются на довольно значительном расстоянии от главных источников загрязнения Мурманской обл., поэтому в основном подвержены влиянию воздушного переноса загрязняющих веществ.

В основном исследовались малые озера с площадью от 0.2 до 4 км<sup>2</sup> с малыми глубинами (за исключением озер Хибинского массива) и только одно озеро средних размеров – Песочное (табл. 1). Все озера располагаются на возвышенных участках на высоте от 150 до 250 м над ур. м., а одно озеро, Академическое, высокогорное, находится в Хибинских горах на высоте 760 м над ур. м. Площади водосбора озер также меняются в широких пределах – от 0.5 до 140 км<sup>2</sup>. Географические условия расположения исследуемых озер разнообразны. Территории водосборной площади озер по типу ландшафта относятся к таежной, лесотундровой и горно-тундровой зонам (табл. 1).

Для оценки экологического состояния озер произведены отбор колонок ДО и определение содержания элементов, в том числе тяжелых металлов (ТМ), в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [8, 9].

Таблица 1

Перечень исследуемых озер восточной части Мурманской обл. (Белое море), в которых отобраны колонки ДО. Указаны номер водосбора (рис. 1), название озера, водосбор реки, высота над уровнем моря, площади озера и водосбора, максимальная глубина и расстояние до моря

Номер водосбора и озера	Название озера	Водосбор реки	Высота над ур. м., м	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Максимальная глубина, м	Тип ландшафта
21-9	Инчъявр	Умба	211.0	3.1	18.7	1.5	Лесотундра
21-11	Академическое	Умба	759.4	0.31	2.04	18.5	Горная тундра
21-12	Комариное	Умба	174.0	0.66	4.26	15.0	Лесотундра
21-17	Китчаявр	Умба	154.2	3.51	116.1	–	То же
21-21	Китчепажк	Умба	157.8	0.81	95.1	–	«
21-45	Светлое	Умба	120.1	0.31	2.23	2.2	Тайга
21-52	Аркашкино	Умба	109.7	0.76	3.31	–	То же
21-56	Глубокое	Умба	132.6	1.66	13.4	15.0	«
24-1	Летнегорское	Жемчужный	105.4	0.61	4.86	4.5	«
37-1	Голубое	Варзуга	185.0	0.2	0.54	9.0	Лесотундра
37-2	Треугольное	Варзуга	175.9	0.18	76.6	6.0	То же
37-3	Подкаменник	Варзуга	187.1	0.87	3.04	3.5	«
37-5	Верхнее Элнйок	Варзуга	248.2	0.2	12.5	0.9	«
85-22	Песочное	Поной	149.9	26.35	137.4	2.5	«
85-27	Макаровское	Поной	149.9	4.39	143.7	2.0	«

### Результаты и их обсуждение

Для оценки аккумуляции и распределения химических элементов в ДО озер водосбора Белого моря, как и в предыдущих статьях [4, 5], 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 создается ТМ, накопленными в ДО.

#### Фоновые концентрации тяжелых металлов

Значения фоновых концентраций элементов для последующего установления интенсивности загрязнения, как и в предыдущих статьях [4, 5], определялись в образцах, отобранных из самых глубоких слоев колонок ДО (около 20 см) и отложившихся около 200 лет назад, которые характеризуют период до интенсивного освоения Мурманской обл. и прилегающих территорий [9].

Существуют значительные вариации в концентрациях ТМ в фоновых слоях ДО исследуемых озер (табл. 2). Средние фоновые концентрации некоторых ТМ в ДО озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря в среднем выше, чем в целом в озерах Мурманской обл.: Cd – более чем в 2 раза, Pb – в 1.2, As – в 1.1, а других металлов меньше – Co и Ni – в 2 раза, Cu и Zn – в 1.1 раза [9, 10]. Но в целом можно сказать, что средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора Белого моря подобны средним фоновым концентрациям в малых озерах Мурманской обл.

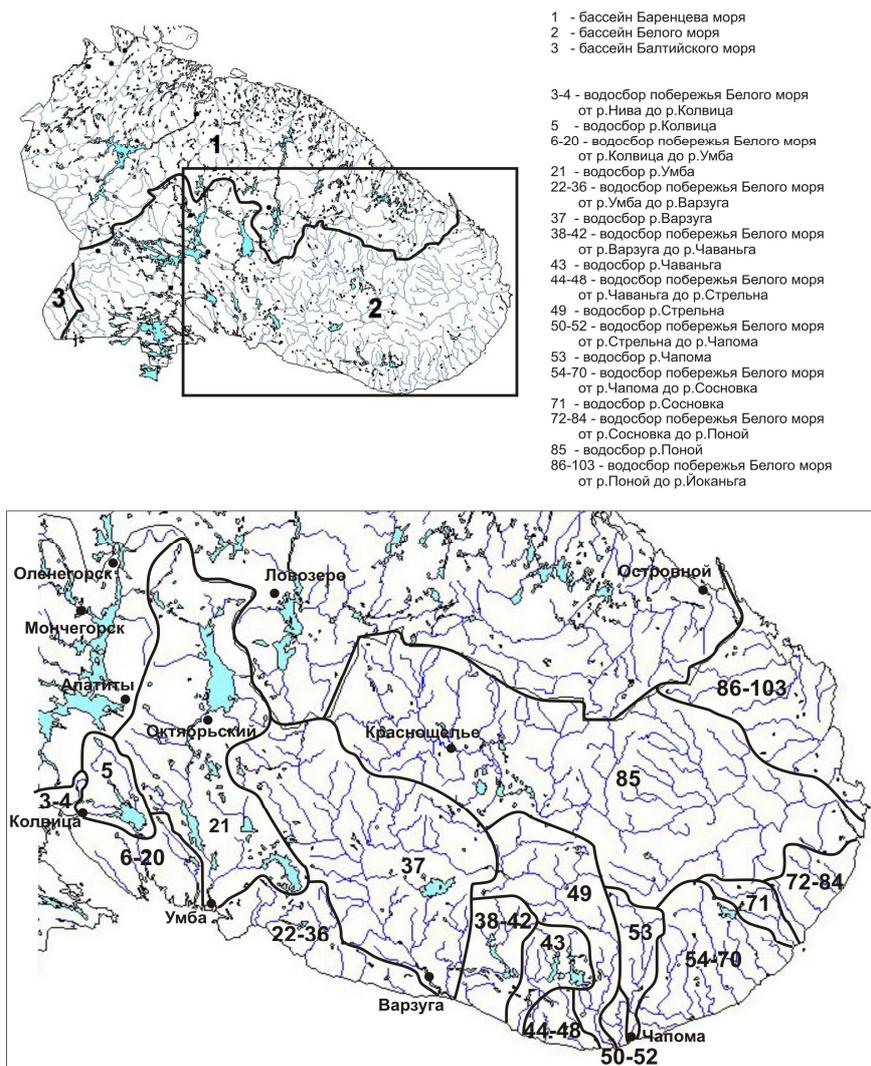


Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер восточной части Мурманской обл. (Белое море)

Интенсивность осадконакопления и содержания элементов в ДО могут зависеть от морфометрических характеристик озер [11] и от ряда геологических, геохимических, физических, химических и биологических процессов, происходящих как на территории водосбора озера, так и в самом озере [9, 12]. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава фоновых ДО исследуемых озер, проведен факторный анализ (табл. 3), который четко выявил первый фактор, имеющий наибольший вес (28 %) и объединяющий в первую очередь морфометрические параметры (площадь озера и водосбора), а также большинство исследуемых ТМ (Ni, Zn, Co, Pb, As, Hg). Первый фактор подтверждается высокими достоверными значениями коэффициентов корреляции морфометрических параметров озер с содержаниями металлов в фоновых слоях ДО на примере Zn (рис. 2). Физико-химические условия осадкообразования (рН воды озера) и процессы, происходящие в самом озере (потери веса при прокаливании ДО, как косвенный показатель содержания органического вещества), входят во второй фактор, что подтверждается высокой корреляционной связью этих показателей (рис. 3). Таким образом, установлено, что морфометрия озер и их водосборов и физико-химические условия процессов осадконакопления являются определяющими факторами формирования химического состава фоновых ДО исследуемых озер.

Таблица 2

Фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора Белого моря, мкг/г сухого веса

Озеро	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Инчъявр	8	7	98	4.3	0.14	0.8	1.7	0.014
Академическое	15	18	80	5.2	0.63	10.9	2.4	0.010
Комариное	7	10	39	5.0	0.24	17.0	н.о.*	н.о.*
Китчявр	94	10	54	4.6	0.80	4.2	н.о.*	н.о.*
Светлое	17	11	16	3.6	1.00	3.9	н.о.*	н.о.*
Аркашкино	3	4	32	3	0.19	3.4	н.о.*	н.о.*
Глубокое	60	22	50	7.7	1.81	4.6	н.о.*	н.о.*
Летнегорское	12	8	29	2.9	0.13	0.8	н.о.*	0.023
Голубое	12	16	125	11.6	0.14	3.6	4.2	0.051
Треугольное	9	6	58	6.7	0.12	1.9	4.8	0.058
Подкаменник	48	28	108	9.7	0.26	1.0	1.7	0.054
Верхнее Элнйок	22	18	84	9.1	0.45	0.6	н.о.*	н.о.*
Песочное	12	26	181	10.3	0.74	12.4	6.1	0.049
Макаровское	12	18	213	3.4	0.54	11.6	4.7	0.041
Среднее значение	<b>23.7</b>	<b>14.2</b>	<b>83.3</b>	<b>6.2</b>	<b>0.51</b>	<b>5.5</b>	<b>3.6</b>	<b>0.037</b>
Минимальное значение	<b>3.3</b>	<b>3.7</b>	<b>15.9</b>	<b>2.9</b>	<b>0.12</b>	<b>0.6</b>	<b>1.7</b>	<b>0.010</b>
Максимальное значение	<b>94.0</b>	<b>27.5</b>	<b>212.8</b>	<b>11.6</b>	<b>1.81</b>	<b>17.0</b>	<b>6.1</b>	<b>0.058</b>
Стандартное отклонение	<b>25.9</b>	<b>7.5</b>	<b>57.9</b>	<b>2.9</b>	<b>0.47</b>	<b>5.3</b>	<b>1.7</b>	<b>0.019</b>
Среднее по Мурманской обл.**	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>96</b>	<b>13</b>	<b>0.23</b>	<b>4.4</b>	<b>3.2</b>	<b>0.035</b>

\* Концентрации не определялись.

\*\* По [9, 10].

Таблица 3

Факторная модель концентраций ТМ в фоновых слоях ДО озер водосбора Белого моря

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина озера, м	0.251	0.323	-0.833
ППП	0.039	-0.766	0.378
Площадь озера	-0.768	-0.205	0.117
Площадь водосбора	-0.814	-0.065	0.324
Высота над уровнем моря	-0.048	0.452	-0.581
pH воды озера	-0.302	0.854	-0.050
Cu	0.193	-0.710	-0.552
Ni	-0.549	-0.569	-0.487
Zn	-0.911	-0.071	0.123
Co	-0.372	-0.292	-0.286
Cd	-0.010	-0.579	-0.553
Pb	-0.533	0.337	-0.320
As	-0.716	-0.272	-0.435
Hg	-0.474	0.613	-0.306
Вес фактора, %	28	24	18

Определение содержания элементов в фоновых слоях ДО озер необходимо для установления интенсивности изменений в аккумуляции металлов на территории водосбора

и их последующей седиментации на дно водоема, поэтому выявленные в данной работе величины фоновых концентраций металлов в ДО имеют очень большую экологическую и геохимическую ценность. Исследуя вертикальное распределение металлов в толще ДО, можно восстановить историю событий, происходивших на территории водосбора конкретного озера.

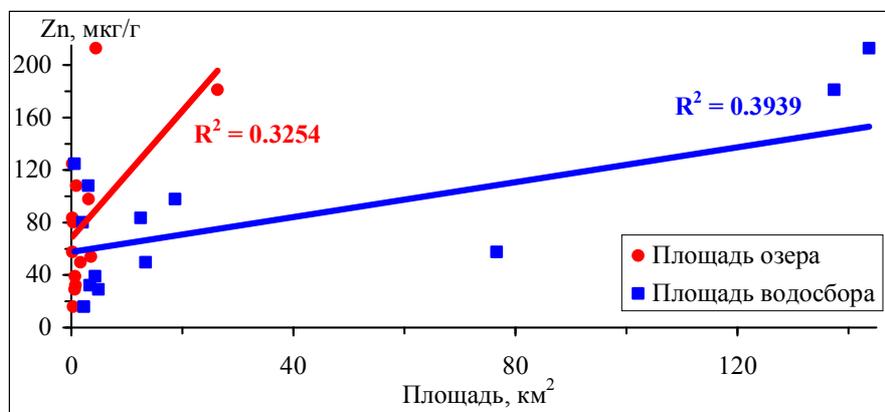


Рис. 2. Зависимости концентраций Zn (мкг/г) в фоновых слоях ДО исследуемых озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря от площади озер и их водосборов

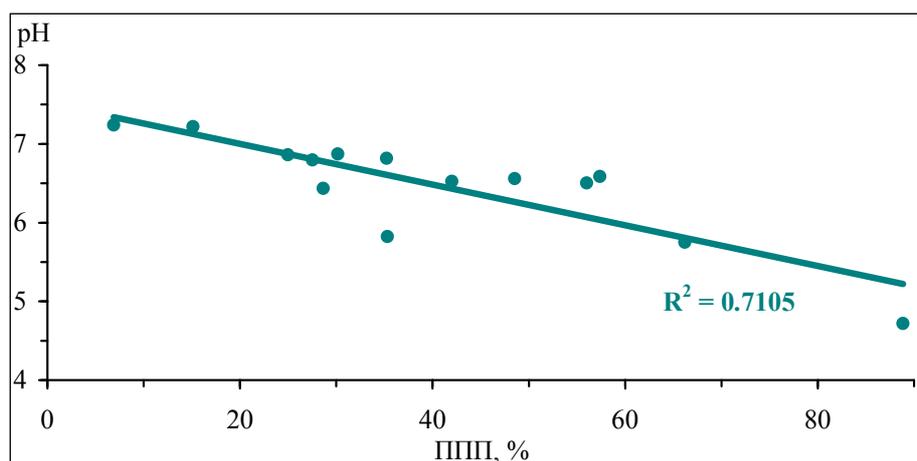


Рис. 3. Зависимость содержания органического вещества в фоновых слоях ДО исследуемых озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря от величины pH воды

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

Водосборы исследуемых водоемов в основном не испытывают серьезного антропогенного влияния, озера не получают прямые сбросы загрязняющих веществ, за исключением озер Хибинского горного массива, принимающих стоки Восточного рудника АО «Апатит» (Китчевур и Китчепахк). Поступление взвешенных и растворимых веществ в водоемы в основном происходит за счет выветривания подстилающих горных пород и атмосферного осаждения веществ и элементов, переносимых иногда на сотни и тысячи километров от источников поступления в атмосферу.

Несмотря на довольно значительную удаленность исследуемых озер от основных источников загрязнения Мурманской обл., в ДО водоемов выявлено увеличение содержания всех ТМ по направлению к поверхности ДО (рис. 4). Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–3 см ДО, хотя в некоторых озерах загрязнение прослеживается до глубины 7–9 см, например для Pb и Cd

в оз. Аркашкино. Поверхностные слои ДО всех исследуемых озер загрязнены халькофильными элементами – Pb, Cd, Hg и As. Таким образом, подтвердился результат исследований химического состава ДО озер водосбора Баренцева и Белого морей в пределах Мурманской обл., когда было установлено увеличение концентраций халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb и As) во всех исследуемых водных объектах вне зависимости от того, испытывают ли они аэротехногенную нагрузку или принимают сточные воды промышленных предприятий [5, 13–16].

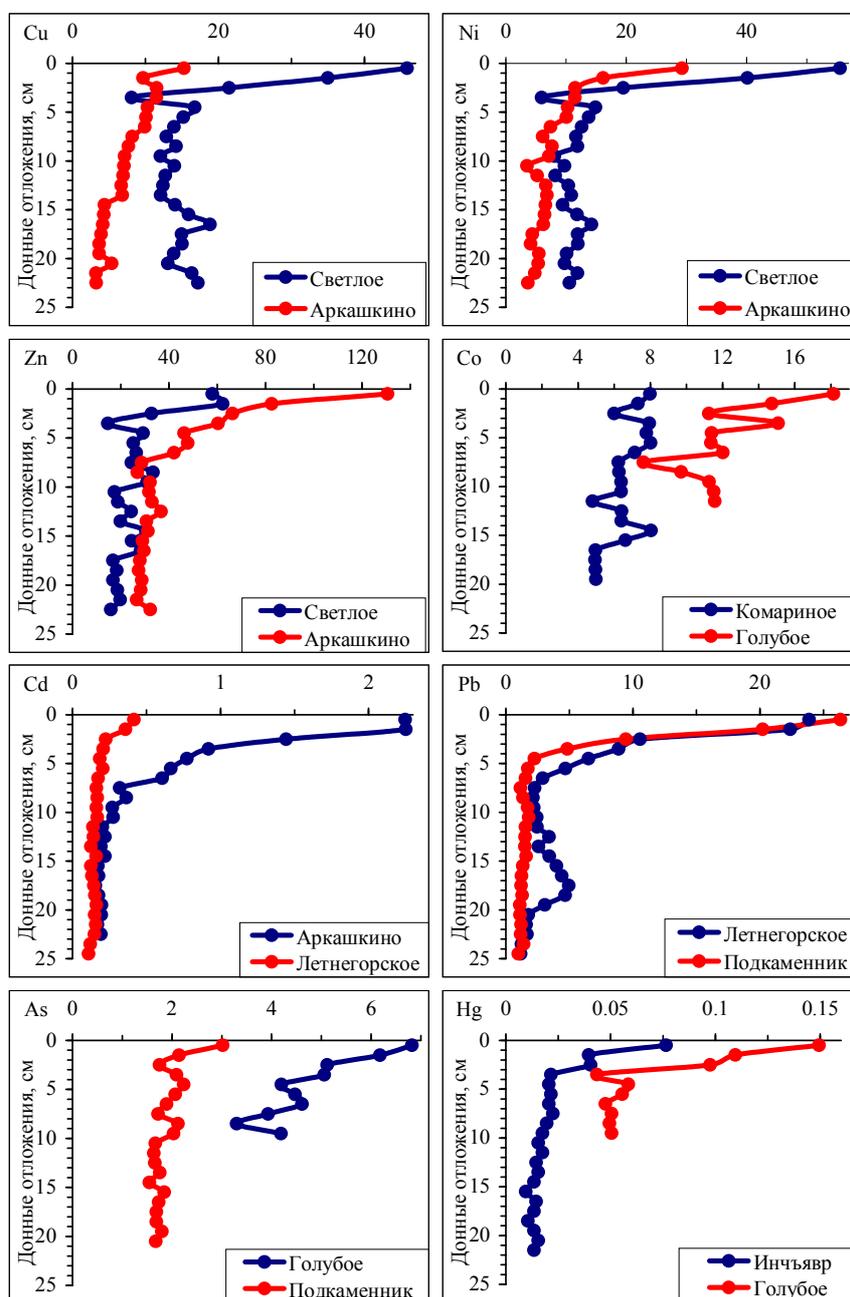


Рис. 4. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г сухого веса) в ДО исследуемых озер восточного района Мурманской обл. бассейна Белого моря

Эти элементы в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов. В поверхностных слоях ДО некоторых озер установлено также 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 14, 8, 8 и 12 озерах соответственно), но это увеличение не достигает масштабов загрязнения, зафиксированного в Печенгском районе [4, 7, 17–20]. 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.

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

Концентрации ТМ в поверхностных слоях ДО исследуемых озер в целом подобны содержаниям, отмеченным в озерах северо-западной части Мурманской обл., удаленных на расстояние около 100 км от горно-металлургических комбинатов [5, 17]. Среднее содержание большинства ТМ в поверхностном слое ДО исследуемых озер (табл. 4) выше в 1.5–3 раза, чем в озерах центральной части Кольского п-ова водосбора Баренцева моря [5, 13]. Исключение составляет Zn, средние концентрации которого в исследуемых озерах меньше, чем в озерах центральной части Кольского п-ова.

Таблица 4

Концентрации ТМ в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер водосбора Белого моря, мкг/г

Озеро	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Инчъявр	10	16	119	4.5	0.41	8.1	2.01	0.077
Академическое	24	32	103	5.4	0.94	35.1	3.32	0.020
Комариное	12	19	71	8.0	0.62	79.1	н.о.	н.о.
Китчяевр	34	22	75	8.0	1.80	18.0	н.о.	н.о.
Китчепахк	70	13	135	5.4	1.6	11.7	н.о.	н.о.
Светлое	46	56	58	4.5	1.37	77.9	н.о.	н.о.
Аркашкино	15	29	131	3.0	2.25	75.2	н.о.	н.о.
Глубокое	26	24	76	6.9	1.16	36.7	н.о.	н.о.
Летнегорское	9	8	47	2.2	0.42	23.9	н.о.	0.066
Голубое	16	21	141	18.1	0.31	15.3	6.82	0.150
Треугольное	14	16	115	9.3	0.36	12.6	5.73	0.119
Подкаменник	32	43	78	7.9	0.44	26.3	3.02	0.078
Верхнее Элнйок	11	22	272	9.9	0.60	7.7	н.о.	н.о.
Песочное	15	33	174	5.5	0.94	19.1	6.30	0.057
Макаровское	12	24	152	2.0	0.66	12.4	6.14	0.108
Среднее значение	<b>23.1</b>	<b>25.1</b>	<b>116.4</b>	<b>6.7</b>	<b>0.93</b>	<b>30.6</b>	<b>4.76</b>	<b>0.084</b>
Минимальное значение	<b>9.4</b>	<b>7.6</b>	<b>47.2</b>	<b>2.0</b>	<b>0.31</b>	<b>7.7</b>	<b>2.01</b>	<b>0.020</b>
Максимальное значение	<b>70.0</b>	<b>55.5</b>	<b>272.5</b>	<b>18.1</b>	<b>2.25</b>	<b>79.1</b>	<b>6.82</b>	<b>0.150</b>
Стандартное отклонение	<b>16.8</b>	<b>12.2</b>	<b>56.9</b>	<b>4.0</b>	<b>0.59</b>	<b>25.7</b>	<b>1.92</b>	<b>0.040</b>
Озера Кольского полуострова*	<b>15.7</b>	<b>20.4</b>	<b>151</b>	<b>5.7</b>	<b>0.32</b>	<b>15.2</b>	<b>1.64</b>	<b>0.056</b>

\* Центральной части полуострова [5].

Так как исследованные озера удалены от основных источников загрязнения и крупных населенных пунктов, а также от побережья Белого моря, территориальной закономерности в распределении ТМ в поверхностном слое ДО озер не отмечается. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава поверхностного слоя ДО исследуемых озер, проведен факторный анализ (табл. 5), который четко выявил первый фактор, имеющий больший вес (25.5 %) и объединяющий физико-химические условия седиментации

(величину рН воды озер), процессы, происходящие в самом озере (потери веса при прокаливании ДО как косвенный показатель содержания органического вещества), и половину исследуемых ТМ (Ni, Pb, As, Hg). Первый фактор подтверждается высокими достоверными значениями коэффициентов корреляции рН воды озер с содержаниями ППП и металлов в поверхностном слое ДО на примере Ni (рис. 5). Снижение концентраций органического материала в поверхностных ДО озер с низкими величинами рН воды происходит вследствие подавления биологической активности в озерах [21] и увеличения потока минеральных частиц с территории водосбора в результате закисления почв.

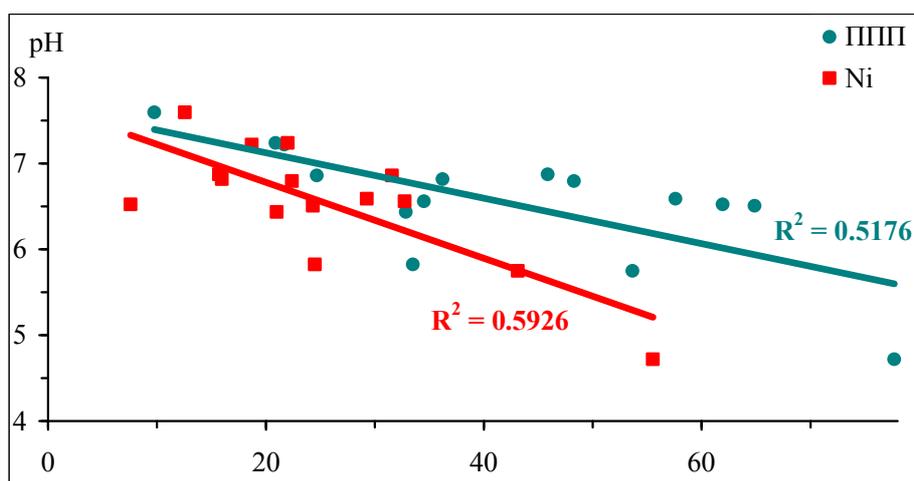


Рис. 5. Зависимость содержания органического вещества (ППП, %) и Ni (мкг/г) в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер восточной части Мурманской обл. бассейна Белого моря от величины рН воды

Органический материал как один из коллекторов ТМ в ДО, вследствие большой удельной площади поверхности [9, 12], влияет на содержание ТМ в ДО, что и сказалось в однонаправленности содержания органического материала и Ni в поверхностном слое ДО в зависимости от рН воды. Морфометрические характеристики озер (глубина, площадь озера и водосбора, высота над уровнем моря) входят во второй фактор, имеющий значительный вес (20 %), причем площади озера и водосбора влияют положительно, а глубина и высота уровня воды в озере – отрицательно (табл. 5). Таким образом, установлено, что морфометрия озер и их водосборов и физико-химические условия процессов осадконакопления являются определяющими факторами формирования химического состава поверхностного слоя ДО исследуемых озер, так же как и фоновых слоев ДО.

#### **Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер**

Для оценки геоэкологического состояния поверхностных вод определялись величины коэффициента и степени загрязнения [22], как это было сделано в предыдущих статьях [4, 5]. Коэффициент загрязнения ( $C_f^j$ ) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое к фоновому значению. Степень загрязнения ( $C_d$ ) вычислялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих ТМ.

При оценке состояния придерживались следующей классификации  $C_f^j$ :  $C_f^j < 1$  – низкий;  $1 \leq C_f^j < 3$  – умеренный;  $3 \leq C_f^j < 6$  – значительный;  $C_f^j \geq 6$  – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались классификации из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по 8 элементам (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg):  $C_d < 8$  – 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 5

Факторная модель концентраций ТМ в поверхностном слое (0–1 см)  
ДО озер водосбора Белого моря

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Глубина озера, м	-0.170	-0.827	0.165
ППП	-0.621	0.428	-0.560
Площадь озера	0.290	0.552	-0.022
Площадь водосбора	0.551	0.627	0.262
Высота над уровнем моря	0.079	-0.596	0.114
pH воды озера	0.821	-0.201	0.340
Cu	-0.153	0.160	0.723
Ni	-0.728	0.248	-0.006
Zn	0.537	0.239	-0.319
Co	0.277	-0.420	-0.264
Cd	-0.245	0.322	0.767
Pb	-0.773	-0.134	0.268
As	-0.582	0.176	-0.084
Hg	-0.706	-0.613	-0.058
Вес фактора, %	25.5	20.0	15.8

Таблица 6

Значения коэффициента ( $C_f^i$ ) и степени загрязнения ( $C_d$ ) ДО озер  
Мурманской обл/ водосбора Белого моря

Озеро	$C_f^i$								$C_d$
	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg	
Инчъявр	1.2	2.2	1.2	1.0	3.0	10.2	1.2	5.7	25.8
Академическое	1.6	1.8	1.3	1.1	1.5	3.2	1.4	2.0	13.9
Комариное	1.8	1.9	1.8	1.6	2.6	4.7	н.о.	н.о.	14.4
Китчявр	0.4	2.2	1.4	1.7	2.3	4.3	н.о.	н.о.	12.3
Китчепакк	0.7	1.3	2.5	1.2	2.0	2.8	н.о.	н.о.	10.5
Светлое	2.7	5.3	3.6	1.3	1.4	19.8	н.о.	н.о.	33.9
Аркашкино	4.7	8.0	4.1	1.0	11.7	22.3	н.о.	н.о.	51.7
Глубокое	0.4	1.1	1.5	0.9	0.6	7.9	н.о.	н.о.	12.6
Летнегорское	0.8	1.0	1.6	0.8	3.3	29.4	н.о.	2.9	39.7
Голубое	1.3	1.3	1.1	1.6	2.3	4.2	1.6	3.0	16.5
Треугольное	1.6	2.8	2.0	1.4	3.0	6.5	1.2	2.0	20.6
Подкаменник	0.7	1.6	0.7	0.8	1.7	26.7	1.8	1.4	35.4
Верхнее Элнйок	0.5	1.2	3.3	1.1	1.3	12.3	н.о.	н.о.	19.7
Песочное	1.2	1.3	1.0	0.5	1.3	1.5	1.0	1.2	9.0
Макаровское	1.0	1.4	0.7	0.6	1.2	1.1	1.3	2.6	9.9
Среднее значение	<b>1.4</b>	<b>2.4</b>	<b>1.9</b>	<b>1.1</b>	<b>2.7</b>	<b>11.1</b>	<b>1.4</b>	<b>2.6</b>	<b>22.6</b>
Минимальное значение	<b>0.4</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.0</b>	<b>1.2</b>	<b>9.0</b>
Максимальное значение	<b>4.7</b>	<b>8.0</b>	<b>4.1</b>	<b>1.7</b>	<b>11.7</b>	<b>29.4</b>	<b>1.8</b>	<b>5.7</b>	<b>51.7</b>
Стандартное отклонение	<b>1.1</b>	<b>1.9</b>	<b>1.0</b>	<b>0.3</b>	<b>2.7</b>	<b>9.5</b>	<b>0.3</b>	<b>1.5</b>	<b>12.9</b>

Среди исследованных озер наибольшие величины коэффициента загрязнения отмечены для Pb – высокие значения  $C_f^{Pb}$  имеет половина из исследуемых озер (табл. 6). Другие исследуемые халькофильные элементы (Cd, Hg, As) вызывают не очень существенное

загрязнение (за исключением озер Аркашкино и Инчъявр, где  $C_f^{Cd} = 11.7$  и  $C_f^{Hg} = 5.7$  соответственно) – величины коэффициентов загрязнения этими элементами для большинства исследуемых озер относятся к умеренным по классификации Л. Хокансона [22], так же как и для загрязняющих ТМ, приоритетных в Мурманской обл.: Ni, Cu, Zn и Co. Исключение составляет оз. Аркашкино, где величины коэффициента загрязнения Ni, Cu и Zn равны 8.0, 4.7 и 4.1 соответственно.

Наибольшую величину степени загрязнения ( $C_d = 52$ ) среди исследуемых озер имеет оз. Аркашкино (табл. 6), благодаря наибольшим значениям коэффициента загрязнения практически по всем ТМ (за исключением Co). В озерах Летнегорское, Подкаменник и Светлое зафиксированы высокие по классификации Л. Хокансона [22] величины  $C_d$  – 40, 35 и 34 соответственно. Значительные величины  $C_d$  имеют еще четыре озера – Инчъявр, Треугольное, Верхнее, Элнйок Голубое – 26, 21, 20 и 17 соответственно. Хибинские озера, а также озера водосбора р. Поной характеризуются умеренными значениями  $C_d$ .

### Заключение

Территория восточной части Мурманской обл. в целом не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов, кроме нескольких водоемов на водосборе оз. Умбозеро. 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. Эти вещества переносятся воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

Выявлено, что средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора Белого моря в целом подобны средним фоновым концентрациям в малых озерах Мурманской обл.

Установлено, что морфометрия озер (глубина, площадь озера и водосбора, высота над уровнем моря), а также физико-химические условия и процессы осадконакопления, происходящие в самом озере (в первую очередь величина pH воды озер и потери веса при прокаливании ДО как косвенный показатель содержания органического вещества), – определяющие факторы формирования химического состава ДО исследуемых озер.

Среди исследованных ТМ наибольшее загрязнение отмечено для Pb: высокие значения коэффициента загрязнения имеет половина из исследованных озер. Другие изученные халькофильные элементы (Cd, Hg, As), как и приоритетные для центральных промышленных районов Мурманской обл. загрязняющие ТМ (Ni, Cu, Zn и Co), оказывают не очень существенное влияние: величины коэффициентов загрязнения этими элементами для большинства исследуемых озер относятся к умеренным по классификации Л. Хокансона.

Несмотря на удаленность исследованных озер от основных источников загрязнения и крупных населенных пунктов, четверть озер характеризуется высокими величинами  $C_d$ , еще четверть озер – значительным загрязнением. Хибинские озера, а также озера водосбора р. Поной имеют умеренные значения  $C_d$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсы поверхностных вод СССР / Т. С. Антонова [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1970. Т. 1. 316 с. 2. Инженерно-экологические изыскания территории месторождения «Федорова тундра» (Кольский полуостров) (Обоснование инвестиций) / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2007. 151 с. 3. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области (Восточная часть. Бассейн Белого моря): в 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. Ч. 1. 221 с.; Ч. 2. 235 с. 4. 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. 5. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1. С. 69–80. 6. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения

содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 62–75. **7. 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. 106–121. **8. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С.** Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. 2012. № 2 (9), вып. 1. С. 54–87. **9. Даувальтер В. А.** Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 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.** Образование осадков в современных водоемах / Н. М. Страхов [и др.]. М.: АН СССР, 1954. 792 с. **12. Horowitz A. J.** A primer on trace metal-sediment chemistry. 2nd rew. ed. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1991. 136 p. **13.** 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. **14. 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. **15. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.** Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в озере Умбозеро, Мурманская область // Водные ресурсы. Т. 37, № 4. 2010. С. 461–476. **16. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.** Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах Севера европейской части России: учеб. пособие. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. 136 с. **17.** Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран. В 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с.; Ч. 2. 262 с. **18. Dauvalter V.** Heavy metals in lake sediments of the Kola Peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61. **19. Dauvalter V., Rognerud S.** Heavy metals pollution in sediments of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18. **20. Dauvalter V.** Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monitor. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215. **21. Кузнецов С. И.** Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., 1970. 440 с. **22. Håkanson L.** An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

#### Сведения об авторах

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

E-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Кашулин Николай Александрович* – доктор биологических наук, профессор, зав. лабораторией водных экосистем, зам. директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: nikolay@inep.ksc.ru

#### Author Affiliation

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

E-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Nikolay A. Kashulin* – Dr. Sci. (Bio), 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.* Закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер восточной части Мурманской области бассейна Белого моря / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 83–96.

#### Reference

*Dauvalter V. A.* Regularities of Heavy Metals Distribution in Sediments of Lakes of Eastern Part of the Murmansk Region of the White Sea Basin / V. A. Dauvalter, N. A. Kashulin // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 83–96.

УДК 697.3 (470.21)

## УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕМ

**Н. М. Кузнецов, А. М. Клюкин, С. Н. Трибуналов**

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

### Аннотация

Приведены результаты анализа использования энергоресурсов в жилищно-коммунальном секторе городов Мурманской обл. Выполнена работа по энергетическому обследованию пилотных зданий городов Кировска и Кандалакши в рамках проекта ENERU («Коларктик» – программа сотрудничества «Европейский инструмент содействия и партнерства»). Собраны и проанализированы сведения об объеме используемых энергетических ресурсов и показателях энергетической эффективности. Произведена оценка возможной экономии энергетических ресурсов, предложены мероприятия по повышению эффективности их использования.

### Ключевые слова:

*энергоэффективность, энергетическое обследование, электро- и теплопотребление, энергоресурсы, энергетический паспорт, энергосберегающие мероприятия.*

## MANAGEMENT OF POWER EFFICIENCY AND SAVING

**Nikolai M. Kuznetsov, Alexander M. Klyukin, Sergey N. Tribunalov**

Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS

### Abstract

The results of analysis of energy use in the residential sector of the cities of the Murmansk region are given. The work has been performed on energy audit of the pilot buildings in Kirovsk and Kandalaksha towns within the project ENERU (Kolarctic – a program “European Instrument for Cooperation and Partnership”). The results of the survey of energy and measures for power efficiency are presented. The information about the volume of energy resources and energy performance indicators has been collected and analyzed. Evaluation of possible energy savings has been produced. Some measures for energy saving and increase in energy efficiency are proposed.

### Keywords:

*power efficiency, power audit, power consumption, heat consumption, energy resources, energy performance certificate, energy-saving measures.*

Повышение эффективности использования энергетических ресурсов (энергоэффективности) – это направление на решение проблем, связанных с изменением климата, экономическим развитием и энергетической безопасностью. Органы государственного управления, участники процесса по реализации энергоэффективности и частный инвестор должны объединить усилия, чтобы достичь результатов по своевременному внедрению энергосберегающих мероприятий. Вероятность достижения успешных результатов в мерах энергосберегающей политики наиболее высока при наличии эффективной системы управления энергосбережением. Управление энергоэффективностью – это сочетание законодательной, нормативной базы и механизмов финансирования, институциональной организации и механизмов координирования, которые направлены на поддержку реализации стратегий, политики и программ энергосбережения. Нормативно-правовая база должна обеспечить: направление развития энергосберегающей политики; законодательную основу правил и положений, таких как строительные нормы, минимальные энергетические требования; ответственность за разработку программ; механизмы финансирования мероприятий по экономии энергии. Международное сотрудничество и содействие важны как элементы общего управления энергоэффективностью и способствуют

участию заинтересованных сторон. Необходимо привлечение в процесс энергосбережения государственных, научных и частных организаций. Сотрудничество с частным сектором позволяет, наряду с государственным финансированием, привлекать частные инвестиции для разработки и реализации политики и программ энергосбережения.

Промышленные предприятия и жилищно-коммунальный сектор располагают масштабным недоиспользуемым потенциалом энергосбережения, который по способности решать проблему обеспечения экономического роста страны сопоставим с приростом производства всех первичных энергетических ресурсов. Темпы снижения энергоемкости при отсутствии скоординированной государственной политики по энергоэффективности могут резко замедлиться. Это может привести к еще более динамичному росту спроса на энергоресурсы внутри страны, а увеличение объемов добычи углеводородов и развитие транспортной инфраструктуры требуют значительных инвестиций, особенно в районах Крайнего Севера. Причины, сдерживающие развитие энергосбережения и энергоэффективности: недостаток мотивации к энергосбережению, слабая информированность, отсутствие механизмов экономии в области энергосбережения, слабая организация и координация действий по энергосбережению. Решение проблемы надежного энергоснабжения возможно двумя путями: наращивание объемов добычи нефти и газа и строительство новых объектов энергогенерации (капиталоемкий путь) или обеспечение роста экономики за счет повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (менее затратный путь). На практике должны реализовываться оба пути с приоритетом энергоэффективности.

В Северо-Западном регионе России вопросам эффективного использования энергоресурсов уделяется большое внимание [1–6, 13]. В 1996 г. подписано соглашение между Норвегией и Россией о сотрудничестве в области энергоэффективности по направлениям: организация и развитие энергоэффективных демонстрационных зон, создание центров энергоэффективности, выполнение пилотных проектов, обучение и информационная деятельность, развитие российско-норвежской торговли и разработка финансовых механизмов для пилотных проектов по энергосбережению. Российско-норвежское сотрудничество в области энергосбережения на Северо-Западе России получило интенсивное развитие в г. Кировске Мурманской обл. [3]. В рамках проекта ENERU (*«Коларктик» – программа сотрудничества «Европейский инструмент содействия и партнерства»*) с целью повышения эффективного управления энергопотреблением в Баренц-регионе с 2013 г. проводится работа по созданию сети делового сотрудничества с привлечением компаний, муниципалитетов, образовательных и научных учреждений Баренц-региона [9, 10]. Модель сотрудничества, создаваемая в рамках проекта, построена на основе концепции тройной спирали, которая является отображением новых экономических процессов: экономика знаний; глобализация; интеграция деятельности государств и корпораций; новые средства коммуникаций и технологий; сетевые формы организации. Преимуществом Мурманской обл. как части Баренц-региона является географическое положение, способствующее естественным связям между северными территориями Скандинавских стран и России.

Для выявления потенциала энергосбережения, установления нормативных показателей энергопотребления, определения основных энергосберегающих мероприятий и объектов бюджетной сферы, на которых в первую очередь планируется внедрять мероприятия по экономии энергоресурсов, необходимо проводить энергетические обследования с последующим составлением энергопаспортов зданий. Процесс энергосбережения выполняется по следующим направлениям: идентификация проекта, сканирование, энергоаудит, реализация мероприятий, мониторинг [7, 8].

Удельные величины потребления энергетических ресурсов являются важнейшими целевыми показателями эффективного использования энергии для учреждений бюджетной сферы. Они призваны обеспечить связь энергетических паспортов бюджетных организаций с региональными и муниципальными программами в области энергосбережения и повышения

энергоэффективности [10]. Удельное потребление тепловой энергии жилищно-коммунального сектора Мурманской обл. значительно различается по городам (рис. 1). Это объясняется различной протяженностью тепловых сетей, тепловыми потерями, обусловленными изношенностью теплопроводов, гидравлическими режимами работы тепловых сетей, условиями регулирования параметров теплоносителя. Поэтому для городов актуально проведение энергетических обследований с целью разработки программ рационализации структуры и перспективного развития теплового хозяйства, расчета гидравлических режимов в тепловых сетях и последующей наладки режимов работы тепловых сетей, разработки и внедрения энергосберегающих мероприятий.

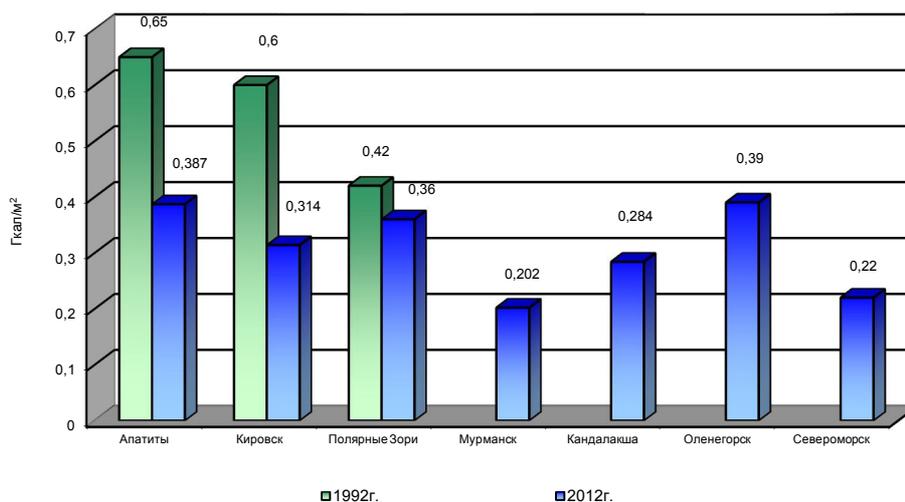


Рис. 1. Удельное теплотребление в жилищно-коммунальном секторе Мурманской обл.

График потребления тепловой энергии, построенный после обработки данных, которые получены в ходе выполнения мониторинга по замерам расхода тепловой энергии на отопление здания [11], показан на рис. 2. Значительное увеличение теплотребления вызвано включением вентиляционной нагрузки. Возрастает и потребляемая мощность электрической энергии на 5 кВт.

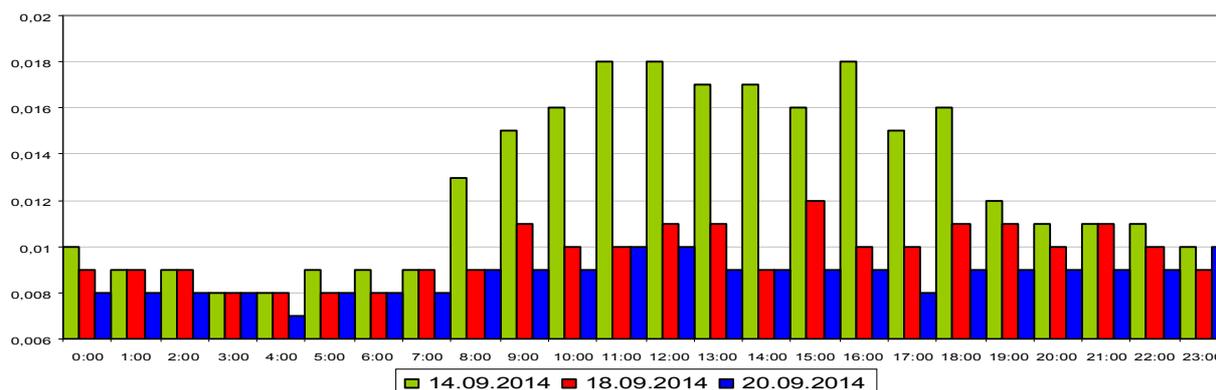


Рис. 2. График почасового потребления тепловой энергии

Посуточные данные теплотребления на основе результатов мониторинга представлены на рис. 3. Регулирование теплотребления при изменении температуры наружного воздуха производится на источнике теплоснабжения изменением температуры подаваемой воды.

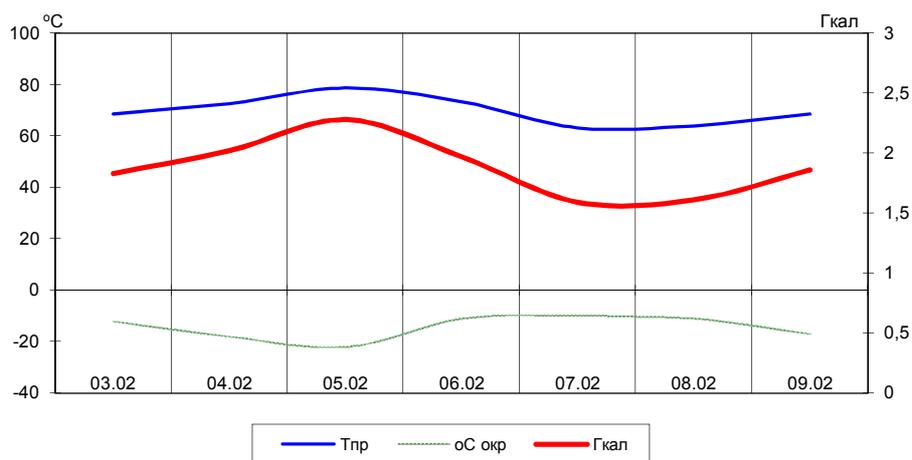


Рис. 3. Изменение теплотребления и температуры теплоносителя в подающем трубопроводе в зависимости от температуры наружного воздуха

Следует отметить, что температура на радиаторах отопления в помещениях обследуемого здания колебалась в пределах от 30 до 53 °С (температура на подающем трубопроводе составляла 61,4 °С), при этом в некоторых помещениях не обеспечивалась необходимая температура 18 °С.

Периодически на протяжении ряда лет в начале и конце отопительного периода температура в некоторых помещениях здания превышает требуемые по санитарно-гигиеническим нормам значения. Причина указанного явления («перетопа») – несоответствие фактической температуры наружного воздуха и прогнозируемой поставщиком тепловой энергии температуры для отпуска теплоты. Для эффективного использования энергоресурсов и возможности регулирования потребления тепловой энергии в системе отопления необходимо установить автоматизированный тепловой пункт с датчиками наружного и внутреннего воздуха. По соответствующей программе регулятор может осуществлять понижение температуры воздуха в помещениях в ночные часы и выходные дни, что наиболее актуально для зданий бюджетной сферы. Автоматизированное управление отопительной нагрузкой позволяет получить экономию в осенне-весенний период, когда распространены перетопа, связанные с особенностями центрального качественного регулирования тепловой нагрузки на источниках теплоснабжения.

Бюджетные учреждения вправе заключать энергосервисные договоры, предметом которых является осуществление исполнителем мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности энергетических ресурсов. Энергоэффективные мероприятия, направленные на снижение потребления объектом топливно-энергетических ресурсов. Мероприятия, особенно актуальные в бюджетной сфере [12]: установка индивидуальных тепловых пунктов с автоматическим регулированием подачи тепловой энергии; гидравлическая наладка систем отопления; установка термклапанов на радиаторы отопления; замена ртутных ламп и светильников на натриевые или светодиодные для уличного освещения и светодиодные для внутреннего освещения; автоматическое регулирование электрического освещения путем использования датчиков освещенности помещений и движения; установка частотно-регулируемого электропривода в системах водоснабжения и приточно-вытяжной вентиляции. У организации должен быть энергетический паспорт, составленный по результатам энергетического обследования объекта. В отчете энергоаудитора необходимо приводить рекомендуемые мероприятия и для каждого мероприятия указывать примерные требуемые инвестиции, сроки окупаемости и т. д. В первую очередь руководителю организации следует обратить внимание на эффективные мероприятия с короткими сроками окупаемости, которые

представляют наибольший интерес для энергосервисной компании и инвестора. На практике используются следующие модели государственно-частного партнерства:

- возложение на инвестора реализации всех элементов проекта (организации финансирования, проектирования, строительства и эксплуатации);
- возложение на инвестора реализации всех элементов проекта, за исключением его участия на этапе эксплуатации объекта;
- возложение на инвестора исключительно участия на этапе эксплуатации объекта.

Выполненные работы по энергоаудиту пилотных зданий в городах Кировск и Кандалакша [10–12] показали, что для эффективного развития жилищно-коммунального хозяйства городов необходимо привлечь значительные инвестиции. В настоящее время при производстве капитальных ремонтов с большими сроками окупаемости необходима поддержка со стороны государства.

Степень энергоэффективности отдельного здания определяется путем ее сравнения с эталонными значениями и указывается в энергетическом паспорте здания. Повышение энергоэффективности существующих зданий возможно за счет реализации следующих мероприятий: модернизации с установкой систем автоматизации зданий, установки комфортных значений температур обогрева и охлаждения, оснащения системы вентиляции средствами регенерации тепла, снижения потерь тепла на внешних поверхностях здания, замены окон. Можно добиться заметного сокращения потребления энергии за счет модернизации систем автоматизации в старых и менее энергоэффективных зданиях.

Мероприятия по энергосбережению нуждаются во внедрении системы управления электроприборами, приводами механизмов и всеми системами автоматизации, которая базируется на использовании возможностей встроенных функций оборудования при распределении электроэнергии (учет электроэнергии, диагностика состояния, показатели качества энергии и т. д.), а также устройств, позволяющих видеть эти параметры с помощью web-технологий для последующего анализа потребления энергоресурсов и принятия мер по снижению затрат и поддержанию оптимального уровня энергопотребления. Система управления обеспечивает также сбор данных о потреблении энергоресурсов (воды, газа, тепла) в режиме реального времени, оценку состояния автоматических выключателей, возможность дистанционного управления коммутационными аппаратами, консолидацию и визуализацию информации о больших или рассредоточенных объектах с использованием локальных или «облачных» систем энергомониторинга. При этом появляются новые возможности сравнивать потребление энергии по объектам, оценивать потребление энергии по типам нагрузок (освещение, отопление, горячее водоснабжение и т. д.), сопоставлять потребление за идентичные временные периоды (дни, недели, месяцы), прогнозировать тренды потребления и менять тарифные планы, избегать рисков внезапного отключения электроэнергии вследствие наложения пиков потребления. Установленная на объекте автоматическая система электроснабжения создает необходимые условия для эффективного энергосбережения.

## **Заключение**

Анализ энергопотребления в жилищно-коммунальном хозяйстве городов показал, что снижение удельного теплопотребления за счет внедрения организационно-технических мероприятий в городах Кировск, Апатиты и Полярные Зори составляет 48, 40 и 12 % соответственно. К проблемам систем теплоснабжения городов региона можно отнести высокий уровень морального и физического износа оборудования источников и сетей, низкую эффективность использования топлива, недостаточные приборный учет и эффективность регулирования потребления тепловой энергии, высокую стоимость поставок топлива в регион для теплоснабжения потребителей. Модель управления энергоэффективностью на региональном уровне должна учитывать исполнение региональной программы энергоэффективности и реализацию государственной политики в регионе, достижение интегральных показателей энергосбережения в области энергоэффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Н. М. Об экономии энергии в районах Севера // Проблемы энергетики Мурманской области и соседних районов. Апатиты, 1980. С. 60–66.
2. Kuznetsov N., Salina S. Energy Saving in Heat-Supply Systems of Russian Northern Cities // INCORD'94, Fourth International Symposium on Cold Region Development, Extended abstracts, Finland, June 13-16 1994. P. 172–173.
3. Кузнецов Н. М., Степанов И. Р. Проблемы энергосбережения в Мурманской области // Научные и методические основы управления развитием Баренц-региона. Апатиты, 1997. С. 37–48.
4. Кузнецов Н. М. Энергоэффективность на Севере Баренц-региона России // Проблемы энергетики Западного Европейского Севера России. Апатиты, 1999. С. 24–30.
5. Кузнецов Н. М. Древесные отходы – дополнительный источник энергии на Северо-Западе России // Горн. журн.: спецвып. 2004. С. 119–120.
6. Кузнецов Н. М. Энергопотребление и энергосбережение на Северо-Западе России // Научные школы Московского государственного горного университета. В 2 т. М: Моск. гос. горн. ун-т, 2008. Т. 2. С. 428–432.
7. Kuznetsov N. M. Energy Saving and Energy Audit // International J. Applied and Fundamental Research. 2013. No. 2. URL: [www.science-sd.com/455-24108](http://www.science-sd.com/455-24108) (дата обращения: 04.03.2016).
8. Kuznetsov N. M. Power Survey – Basis of Energy Saving // International J. Applied and Fundamental Research. 2014. No. 2. URL: <http://www.science-sd.com/457-24731> (дата обращения: 04.03.2016).
9. Кузнецов Н. М., Маслобоев В. А. Эффективное управление энергопотреблением в Баренц-регионе // Наука и инновационные разработки – Северу. Новосибирск: СО РАН, 2014. 580 с.
10. Клюкин А. М., Кузнецов Н. М., Трибуналов С. Н. Международное сотрудничество по повышению эффективного управления энергопотреблением в Баренц-регионе // Труды Кольского научного центра. 2014. № 7 (26). С. 93–97 (Энергетика).
11. Клюкин А. М., Кузнецов Н. М., Трибуналов С. Н. Энергетическое обследование – основа эффективного управления энергопотреблением // Труды Кольского научного центра. 2015. 2 (28). Энергетика. С. 16–24.
12. Клюкин А. М., Кузнецов Н. М., Трибуналов С. Н. Повышение энергетической эффективности бюджетных организаций // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. 8 (34). С. 72–82.
13. Федоров О. В., Кузнецов М. М. Альтернативні джерела енергії для віддалених споживачів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 6. С. 141–144. URL: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1865> (дата обращения: 10.03.2016).

**Сведения об авторах**

*Кузнецов Николай Матвеевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией энергетической эффективности и энергосбережения Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

E-mail: [kuzn55@mail.ru](mailto:kuzn55@mail.ru)

*Клюкин Александр Михайлович* – заместитель директора Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

E-mail: [kluk@ien.kolasc.net.ru](mailto:kluk@ien.kolasc.net.ru)

*Трибуналов Сергей Николаевич* – инженер лаборатории энергетической эффективности и энергосбережения Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

E-mail: [leee51@mail.ru](mailto:leee51@mail.ru)

**Author Affiliation**

*Nikolai M. Kuznetsov* – PhD (Eng.), Leading Researcher, Head of Laboratory of Power Efficiency and Saving of the Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS

E-mail: [kuzn55@mail.ru](mailto:kuzn55@mail.ru)

*Alexander M. Klyukin* – Deputy Director of the Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS

E-mail: [kluk@ien.kolasc.net.ru](mailto:kluk@ien.kolasc.net.ru)

*Sergey N. Tribunalov* – Engineer of Laboratory of Power Efficiency and Saving of the Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics KSC of the RAS

E-mail: [leee51@mail.ru](mailto:leee51@mail.ru)

**Библиографическое описание статьи**

*Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью и энергосбережением / Н. М. Кузнецов, А. М. Клюкин, С. Н. Трибуналов // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 97–102.*

**Reference**

*Kuznetsov N. M. Management of Power Efficiency and Saving / N. M. Kuznetsov, A. M. Klyukin, S. N. Tribunalov // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 97–102.*

УДК 621.311

## ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

**Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий**

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

### Аннотация

Даны результаты обследования электробезопасности городской сети 6 и 10 кВ, а также сети 35 кВ Мурманской области. Выявлены факторы, определяющие опасность поражения током при нарушениях на воздушных линиях. Предложены мероприятия по повышению электробезопасности сети 35 кВ и условие совмещения автоматических отключений с режимом изолированной нейтрали.

### Ключевые слова:

*электробезопасность, воздушная линия, изолированная нейтраль, однофазное замыкание, сопротивление растеканию, поражение током.*

### THE PROBLEM OF PROVIDING ELECTRICAL SAFETY FOR MEDIUM-VOLTAGE SYSTEMS ON THE KOLA PENINSULA

**Yu. M. Nevretdinov, G. P. Fastiy**

Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS

### Abstract

Results of a survey of 6, 10 kV urban electrical network and 35 kV power network in the Murmansk region are presented. The factors that determine the danger of electric shock at disorders on power lines have been revealed. The measures to improve electrical safety of the 35 kV electrical networks and a condition of combining automatic outages with the mode of the insulated neutral have been proposed.

### Keywords:

*electrical safety, power line, insulated neutral, single phase circuit, the spreading resistance, electric shock.*



Сети среднего напряжения 6, 10 и 35 кВ с изолированной нейтралью используются в схемах электроснабжения промышленных предприятий, населенных пунктов.

Основной элемент высоковольтной сети, который представляет потенциальную опасность для населения, – линии электропередачи. Это объясняется их доступностью для населения и относительно большим числом нарушений на линиях, связанных с перекрытиями изоляции на опорах или обрывах проводов.

Рассмотрим потенциальную опасность сетей 6 и 10 кВ, расположенных в населенных пунктах или в непосредственной близости от них, на примере характерной городской сети г. Апатиты, общая характеристика линий которой приведена в табл. 1.

Число воздушных линий (ВЛ) в сети 6 кВ составляет менее 25 %, а в сети 10 кВ около 10 %. Средняя протяженность ВЛ этих классов напряжений 1.5 км и около 1.1 км соответственно.

Сеть 10 кВ секционирована на 4 участка, поэтому электрические характеристики – емкость и составляющие токов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) – сведены в 4 основные группы: два участка, подключенные к 1 и 2 системам шин (с. ш.) подстанции ПС-360, и два участка, подключенные к системам шин 1 и 2 ПС-24 (табл. 2).

Таблица 1

Общая характеристика линий 6, 10 кВ городской сети г. Апатиты

№ п/п	Характеристика линий	Всего по линиям электропередачи	Воздушные линии	Кабельные линии
<i>Линии 6 кВ</i>				
1	Количество, шт. (%)	53 (100)	13 (24.5)	40 (75.5)
2	Протяженность, км (%)	31.3 (100)	20.1 (64.2)	11.2 (35.8)
3	Всего опор, шт.	–	380	–
4	Средняя длина, км	–	1.54	0.28
<i>Линии 10 кВ</i>				
5	Количество, шт. (%)	258 (100)	27 (10.5)	231 (89.5)
6	Протяженность, км (%)	102.9 (100)	28.4 (27.6)	74.5 (72.4)
7	Всего опор, шт.	–	433	–
8	Средняя длина, км	–	1.07	0.23

Таблица 2

Характеристика участков городской сети 10 кВ для расчетов защиты при однофазном замыкании на землю

№ п/п	Показатель	Всего по линиям 10 кВ	В том числе	
			воздушные	кабельные
<i>ПС-360 (участок 1 с. ш. /участок 2 с. ш.)</i>				
1	Длина линий, км	7.35/13.3	4.94/9.46	2.41/3.84
2	Емкость на фазу, мкФ	1.047/1.447	0.047/0.087	1.0/1.36
3	Ток ОЗЗ и его составляющие, А	5.67/7.93	0.26/0.49	5.41/7.44
<i>ПС-24 (участок 1 с. ш. /участок 2 с. ш.)</i>				
4	Длина линий, км	8.877/10.219	5.771/6.761	3.11/3.458
5	Емкость на фазу, мкФ	0.969/1.199	0.054/0.059	0.915/1.14
6	Ток ОЗЗ и его составляющие, А	5.258/6.55	0.291/0.34	4.967/6.21

Из приведенных данных видно, что величина тока ОЗЗ составляет по секционированным участкам от 5.3 до 7.9 А, а вклад ВЛ – всего 0.26–0.49 А, т.е. не превышает 1 А. Такая характеристика свидетельствует о возможности применения селективной релейной защиты с установкой срабатывания до 4 А. Так как на представленных ВЛ 6 и 10 кВ в населенных пунктах используются деревянные опоры и траверсы, вероятность импульсного перекрытия на землю ничтожно мала. Соответственно уменьшается вероятность импульсного перекрытия между фазами. Градиент рабочего напряжения по воздуху составляет 6.2–7.8 кВ/м, поэтому вероятность образования силовой дуги снижается до 0.04–0.065 (оценка по формуле Майкопара [1, 2]).

Таким образом, опасность поражения током вследствие перекрытий изоляции ВЛ 6 и 10 кВ практически отсутствует.

### Характеристики участков сети 35 кВ

Сеть 35 кВ ОАО «Колэнерго» сильно разветвлена, включает более 95 подстанций (в т. ч. около 29 ведомственных) и 148 линий электропередачи общей длиной более 906 км. Сеть 35 кВ не имеет кабельных линий электропередачи и включает только ВЛ, что, с одной стороны, способствует существенному уменьшению емкости сети и значений токов однофазных замыканий на землю, а с другой, – увеличивает число атмосферных перенапряжений и перекрытий изоляции.

Обширная территория, на которой расположена сеть 35 кВ, и большое число питающих подстанций позволяют разделить сеть на 48 секционированных участков, питающихся от шин

21-й подстанции и 6 ГЭС, и существенно снизить величину токов ОЗЗ. Поэтому в сети в соответствии с Правилами техники эксплуатации электроустановок [3] не используется компенсация емкостных токов замыкания.

В табл. 3 и 4 приведены данные по участкам сети 35 кВ, характеризующие их структуру, а также расчетные параметры для определения токов ОЗЗ. Данные по участкам сети г. Мурманска выделены в табл. 4.

Таблица 3

Сведения по участкам 35 кВ (кроме участков г. Мурманска)

№ п/п	Участок	Число присоединений (линий)	Длина линий*, км	Общая длина линий, км	Емкость участка**, нФ	Ток ОЗЗ, А
	1	2	3	4	5	6
1	ПС-36 Т-2	1 (1)	0.35	0.35	3	0.1
2	ПС-1 2 с. ш.	1 (1)	1.7	1.7	12.8	0.2
3	ПС-7	1 (1)	5.9	5.9	44	0.8
4	ПС-57	2 (2)	2.7–3.5	6.2	46	0.9
5	ПС-1 1 с. ш.	1 (1)	6.6	6.6	48.8	0.9
6	ПС-100 2 с. ш.	1 (1)	6.6	6.6	49	0.9
7	ГЭС-ХV Т-1	1 (1)	6.9	6.9	51	0.97
8	ГЭС-ХV Т-2	1 (1)	6.9	6.9	51	0.97
9	ГЭС-IV-V-VI	1 (2)	0.5–9.1	9.6	71	1.3
10	ГЭС-13 1 с. ш.	3 (3)	0.6–6.3	10	74	1.4
11	ПС-89 2 с. ш.	1 (1)	13.0	13	96	1.8
12	ПС-56 1 с. ш.	2 (2)	5.5–8.9	14.3	107	2.0
13	ПС-56 2 с. ш.	2 (2)	5.5–8.9	14.3	107	2.0
14	ПС-99	1 (1)	15.7	15.7	116	2.2
15	ПС-50 2 с. ш.	1 (1)	15.4	15.4	114	2.2
16	ПС-89 1 с. ш.	2 (2)	8.1–8.6	16.7	124	2.4
17	ГЭС-13 2 с. ш.	3 (4)	2.3–6.3	17.1	127	2.4
18	ПС-36 Т-1	1 (1)	17.3	17.3	128	2.4
19	ПС-81 1 с. ш.	2 (2)	5–12.4	17.4	129	2.5
20	ПС-50 1 с. ш.	2 (2)	3.5–15.4	18.9	140	2.7
21	ГЭС-ХVI Т-1	1 (1)	22.4	22.4	166	3.2
22	ГЭС-ХVI Т-2	1 (1)	22.4	22.4	165	3.2
23	ПС-29 1 с. ш.	4 (4)	2.97–8.5	27.2	201	3.8
24	ПС-100 1 с. ш.	1 (2)	6.4–23	29.4	217	4.1
25	ПС-3 1 с. ш.	2 (2)	6.4–23.1	29.5	218	4.2
26	ПС-81 2 с. ш.	2 (3)	4.8–13.3	32.0	237	4.5
27	ПС-28 1 с. ш.	3 (3)	4.3–24.4	38	281	5.4
28	ПС-28 2 с. ш.	2 (2)	4.3–24.4	38	281	5.4
29	ПС-3 Т-2	1 (2)	22.1–29.1	51.2	379	7.2
30	ПС-21 2 с. ш.	4 (5)	1.3–27.8	62.8	465	8.9
31	ПС-21 1 с. ш.	4 (5)	1.1–27.8	70.9	525	10
32	ПС-29 2 с. ш.	4 (8)	2.97–15.5	80.4	595	11.3

\* Минимальная и максимальная длина линий участка.

\*\* Расчетная емкость фаза – земля участка с учетом емкости оборудования подстанций.

## Сведения по участкам 35 кВ, г. Мурманск

№ п/п	Участок	Число присоединений (линий)	Длина линий*, км	Общая длина линий, км	Емкость участка**, нФ	Ток ОЗЗ, А
1	ПС-5 1 с. ш.	2 (2)	2–2.6	4.6	36	0.7
2	ПС-5 2 с. ш.	3 (4)	2.0–3.5	10.8	83	1.6
3	ПС-6 1 с. ш.	3 (4)	2.1–8.2	16.0	122	2.3
4	ПС-6 2 с. ш.	3 (4)	2.1–8.2	16.1	122	2.3
5	ПС-8 1 с. ш.	1 (1)	3.3	3.3	26	0.5
6	ПС-8 2 с. ш.	2 (2)	8.6–12.5	22	171	3.3
7	ПС-53 1 с. ш.	2 (2)	2.65–53.4	56.5	417	7.9
8	ПС-53 2 с. ш.	2 (2)	2.65–53.4	56.6	418	8.0
9	ПС-64 1 с. ш.	1 (1)	4.7	4.7	37	0.7
10	ПС-64 2 с. ш.	1 (1)	4.7	4.7	37	0.7
11	ПС-97 1 с. ш.	1 (1)	7.3	7.3	59	1.1
12	ПС-97 2 с. ш.	1 (1)	7.3	7.3	59	1.1
13	ПС-108 1 с. ш.	1 (1)	15.8	15.8	132	2.5
14	ПС-108 2 с. ш.	1 (1)	15.8	15.8	132	2.5

\* Минимальная и максимальная длина линий участка.

\*\* Расчетная емкость фаза – земля участка с учетом емкости оборудования подстанций.

В таблицах указано число присоединений линий к шинам питающей подстанции. Так как на отдельных участках имеются линии, образующие последовательно включенные передачи, в скобках дано полное число линий участка в нормальном режиме работы. Также указан диапазон протяженности линий участка, который дает информацию о расположении линии относительно подключенных подстанций, расположенных вблизи населенных пунктов или других потребителей электроэнергии.

Из табл. 3 и 4 видно, что около 78 % участков имеют простые схемы и включают одну-две линии, в том числе 50 % от общего числа – одну линию. Только 10 участков 35 кВ (менее 22 %) с 3 или 4 линиями электропередачи. Отдельные участки, например, 27, 28, 30–32 (табл. 3) и 7, 8 (табл. 4) включают электропередачи удаленных потребителей, для которых важным фактором является бесперебойность электроснабжения. Отметим, что большое количество линий имеют отпайки к промежуточным подстанциям. В целом по сети 35 кВ питаются более 70 подстанций потребителей.

Для оценки доступности к линиям 35 кВ можно использовать данные о протяженности линий электропередачи, а также участков сети. Показаны распределения относительного числа участков 35 кВ (в %) в зависимости протяженности подключенных линий, а также линий одно- и двухцепных исходя из их длины (рис. 1). В обработке учтены данные по 46 участкам сети 35 кВ, 27 двухцепным линиям и 51-й одноцепной линии.

Линии 35 кВ протяженностью десятки километров большей частью располагаются за пределами населенных пунктов и пригородной зоны. Соответственно доступность к опорам этих линий существенно снижается, тем более, если они расположены в труднодоступной местности. Исключением являются подходы этих линий к питающим подстанциям, расположенным в непосредственной близости от городов и поселков либо на их окраине. По технической документации такое расположение относится к линиям за пределами населенных пунктов. Однако эта зона в последнее время интенсивно осваивается населением для строительства гаражей, дачных участков и огородов.

Линии небольшой длины (до 2 км) и соответственно участки протяженностью до 3 км могут находиться целиком на территории небольших населенных пунктов. Аналогично, линии протяженностью до 4 км, соединяющие подстанции двух населенных пунктов, также целиком могут находиться на их территории.

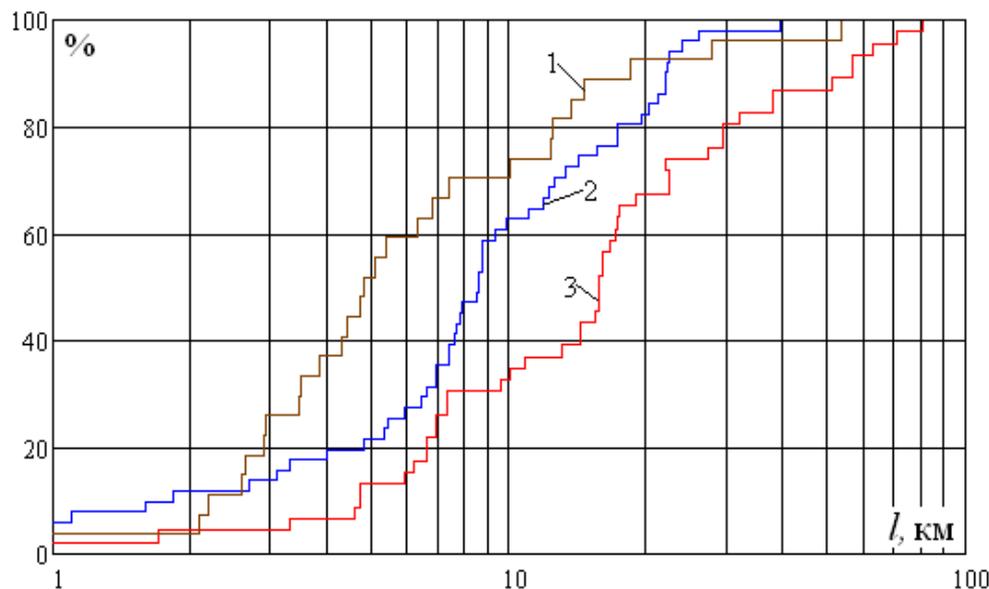


Рис. 1. Распределение числа участков и линий 35 кВ в зависимости от протяженности: 1 – одноцепные линии; 2 – двухцепные линии; 3 – протяженность линий одного участка

Ширина зоны доступности у населенных пунктов разного типа варьируется в широких пределах. Если принять среднюю зону доступности шириной 2 км, то в нее целиком попадают около 37 % двухцепных ЛЭП, около 20 % одноцепных ЛЭП и 7 % участков сети 35 кВ. Наиболее сложна в этом отношении сеть 35 кВ в г. Мурманске, которая включает 20 ВЛ длиной от 2 до 16 км, за исключением двухцепной линии длиной около 54 км. Для этой сети характерно расположение основной части линий в городской зоне, вблизи жилых зданий и других сооружений, в том числе гаражного кооператива, а также большое число пересечений с дорогами и участков вдоль трассы со свободным доступом для населения.

Для сети 35 кВ с изолированной нейтралью наиболее типичны следующие нарушения, сопровождающиеся возникновением опасных шаговых напряжений и напряжений прикосновения:

1) однофазные замыкания на воздушной линии, как правило, на опоре. Вследствие малой величины тока замыкания нарушение имеет длительный и неустойчивый характер с возможностью самоликвидации. В случае длительного замыкания многократные дуговые перенапряжения вызывают повторное перекрытие изоляции ранее не поврежденной фазы и развитие двухфазного замыкания;

2) обрыв фазного провода линии с падением провода на землю или сооружение, расположенное под ВЛ. Нарушение сопровождается несимметрией фазных напряжений и током замыкания, величина которого определяется сопротивлениями системы (по прямой и нулевой последовательностям) и контактным сопротивлением провода на землю.

Опасность замыканий на линиях в значительной степени зависит от величины тока замыкания и эквивалентного сопротивления заземления в точке замыкания, т. е. опоры линий или группы опор при наличии связи между ними по грозозащитному тросу. Сопротивление заземления опор с тросами составляет от 30 до 800 Ом, что обусловлено специфическими грунтовыми особенностями Кольского п-ова. Эти факторы влияют на изменение характера тока

и условия горения дуги при однофазных замыканиях на землю, длительность которых по нормативам допускается до двух часов [3].

Распределение значений тока однофазных замыканий на землю для участков сети 35 кВ с использованием данных табл. 3 показано на рис. 2.

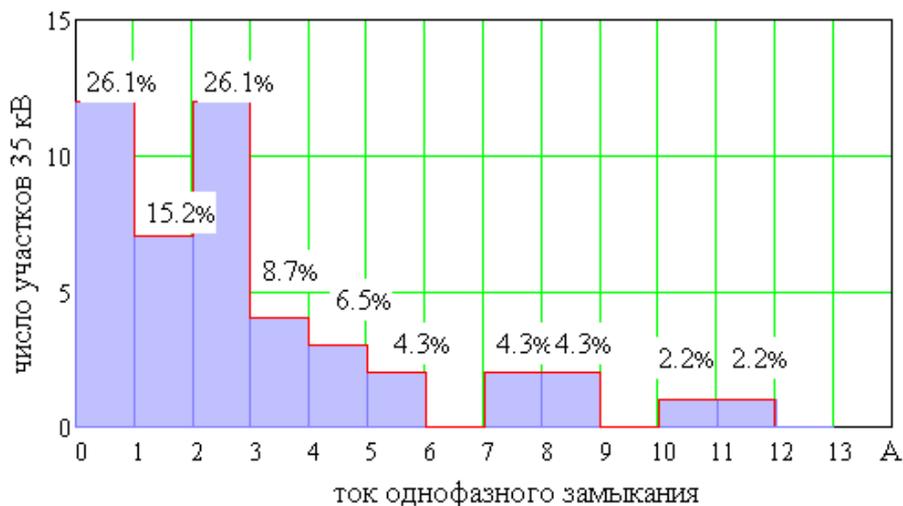


Рис. 2. Распределение числа участков 35 кВ в зависимости от величины тока однофазных замыканий

Большинство участков 35 кВ (более 67 %) имеют токи ОЗЗ не более 3 А, в том числе более 26 % участков – не превышающие 1 А (рис. 2). В основном эти участки имеют одну (17 участков – 55 %) или две линии (9 участков – 29 %). Малая величина токов ОЗЗ значительной части участков создает условия для самоликвидации случайных однофазных замыканий и повышения бесперебойности электроснабжения.

В качестве факторов снижения опасности электропоражения можно назвать наличие грозозащитных тросов, соединяющих ряд опор между собой, и усиление изоляции линии. Грозозащитные тросы установлены в соответствии с ПУЭ [4] на подходах у подстанций, расположенных на территории населенных пунктов или на ее границе, поэтому в этой зоне при достаточном уровне снижения эквивалентного сопротивления заземления опасность существенно снижается или исключается.

Большинство линий оборудовано грозозащитными тросами на подходах к подстанциям и частично по трассе. Длина подходов с тросом составляет до 1.2 км. Тросы, как правило, не заходят на открытое распределительное устройство, т. е. заземлены через крайние опоры линий и не связаны с контуром подстанции, 22 линии (10 одноцепных и 12 двухцепных) оборудованы тросами по всей длине. На 7 линиях тросы отсутствуют.

В основном изоляция линий 35 кВ выполнена гирляндами из 3 изоляторов, 12 линий имеют усиленную изоляцию (от 4 до 6 изоляторов в гирлянде) по всей длине или частично, 12 одноцепных линий имеют ослабленную изоляцию – из 2 изоляторов в гирлянде.

По результатам анализа надежности сети 35 кВ за период 1980–1998 гг. линии 35 кВ отключались 144 раза, с успешным АПВ – 91 раз, т. е. более 63 % [5]. Анализ работы устройств релейной защиты и автоматики в сети 35 кВ г. Мурманска с 2007 г. по сентябрь 2012 г. показал, что автоматика срабатывала 34 раза, в том числе 14 раз при двух- или трехфазных замыканиях на линиях, которые в значительной степени обусловлены развитием однофазных замыканий. Статистики по однофазным замыканиям нет, так как при этих нарушениях автоматика работает только на сигнализацию, то есть приведенные замыкания сопровождаются протеканием тока через землю и могут представлять опасность для населения.

Таким образом, условия формирования опасности поражения током на линиях и соответственно участках сети существенно различаются. Поэтому оценка опасности той или другой линии должна учитывать не только факторы доступности, но и величину тока замыкания, эквивалентное сопротивление растеканию опор линии, а также конструктивное исполнение линии и ее изоляции, влияющей на вероятности образования перекрытий изоляции и силовой дуги.

### **Заключение**

1. Сеть 35 кВ Мурманской обл. включает большое количество участков, имеющих разнообразные конфигурации, протяженности сети и подключенных ЛЭП и другие характеристики, включая расположение на территории населенных пунктов или близость к ним. Соответственно, участки сети и их элементы характеризуются разными условиями формирования опасности поражения электрическим током для населения. Поэтому первый этап решения задачи обеспечения электробезопасности сети 35 кВ – оценка опасности конкретных линий и их участков для населения и необходимость применения мер снижения опасности.

2. При оценке потенциальной опасности для населения при возникновении нарушений в сети необходимо учитывать не только доступность к опорам ЛЭП, но и факторы, влияющие на вероятность образования опасных напряжений прикосновения и шаговых напряжений. К таким факторам относятся: сопротивления заземлений опор, наличие соединений между опорами через грозозащитные тросы, величина тока замыкания, характеристики изоляции линии на опорах, наличие защитной автоматики линии и ее эффективность.

3. Мероприятиями, снижающими уровень опасности сети 35 кВ для населения, являются:

- усиление защитных заземлений, в том числе при помощи тросов или противовесов на участке, представляющем опасность поражения током;
- применение автоматических отключений при однофазных замыканиях при условии обеспечения селективности защиты, например, реле типа «Zero», в этом случае необходимо принять решение о целесообразности таких отключений;
- изменение режима заземления нейтрали с целью увеличения тока однофазного замыкания до величины, достаточной для обеспечения селективности защиты.

4. При выборе мероприятий, обеспечивающих электробезопасность, эффективно применение таких решений, которые позволяют избирательно применять автоматическое отключение линии при однофазном замыкании на ней с сохранением преимуществ режима изолированной нейтрали участка сети, т. е. на этом же участке часть линий, не представляющих опасности поражения током для населения, может продолжать работу ограниченное время при однофазном замыкании на них.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 463 с.
2. Техника высоких напряжений / под ред. М. В. Костенко. М.: Высш. шк., 1973. 530 с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор Минэнерго России. М.: Энергосервис, 2003. 392 с.
4. Правила устройства электроустановок. СПб.: ДЕАН, 2003. 928 с.
5. Ярошевич В. В., Невретдинов Ю. М. Оценка показателей надежности воздушных линий 35, 110 и 150 кВ в условиях Севера Кольского полуострова // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2013. Вып. 7. С. 90–100.

### **Сведения об авторах**

*Невретдинов Юрий Масумович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

E-mail: ymnivr@mail.ru

*Фастий Галина Прохоровна* – научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

E-mail: fastiy@ien.kolasc.net.ru

**Author Affiliation**

*Yuriy M. Nevretdinov* – PhD (Eng.), Leading Researcher of the Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS

E-mail: ymnevr@mail.ru

*Galina P. Fastiy* – Researcher of the Centre of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS

E-mail: fastiy@ien.kolasc.net.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Невретдинов Ю. М.* Проблема обеспечения электробезопасности сетей среднего напряжения в условиях Кольского полуострова / *Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 103–110.

**Reference**

*Nevretdinov Y. M.* The Problem of Providing Electrical Safety for Medium-Voltage Systems on the Kola Peninsula / *Y. M. Nevretdinov, G. P. Fastiy* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 103–110.

УДК 621.374: 622.323

## АРКТИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ЗАДАЧИ ИХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ\*

А. Ф. Усов<sup>1</sup>, М. Хи<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Кольский научный центр РАН

<sup>2</sup>Университет науки и технологии Хуажонг, КНР

### Аннотация

Рассмотрены перспективы использования электроимпульсного способа бурения скважин для совершенствования технологии вскрытия и разработки нефтяных месторождений с целью повышения полноты использования недр.

Обоснована концепция создания электроимпульсного проходческого комплекса на основе погружного источника высоковольтных импульсов с управляемым формированием призабойного пространства для повышения его маневренности и создания в толще породы специальных выработок технологического назначения для формирования куста наклонных и горизонтальных скважин с максимально полным охватом нефтеносных пластов, а также для размещения аппаратуры геофизического мониторинга и иных целей. Разработки по проекту в отношении техники генерирования импульсов, технических средств разрушения, аппаратурных методов контроля процесса разрушения и управления работой установки могут найти применение при бурении скважин большого диаметра для термальной энергетики, котловых скважин для создания хранилищ ядерных отходов, скважин для свайных оснований инженерных объектов в зоне вечной мерзлоты, в том числе хранилищ СПГ, в модульных установках для разработки месторождений особо ценного сырья в сложных географических и климатических условиях Севера и др.

### Ключевые слова:

*добыча нефти, тяжелая нефть, бурение скважин, Арктический шельф, электроимпульсное разрушение, буровая техника, высоковольтные импульсы.*

## ARCTIC PROSPECTS OF ELECTRIC PULSE METHOD FOR MATERIALS DESTRUCTION AND TASKS OF THEIR SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT

Anatoly F. Usov, Mengbing He

<sup>1</sup>Kola Science Centre of the RAS

<sup>2</sup>Huazhong University of Science and Technology, China

### Abstract

To improve the technology of opening and development of oil fields for increasing the completeness of subsoil use, the prospects of using the electric pulse method of drilling are discussed.

We have validated the concept of creating an electric pulse tunnel system based on submersible source of high-voltage pulses with controllable formation of work space for increasing its maneuverability and creating special technological outputs in a rock mass for forming a cluster of slant and horizontal boreholes with most complete coverage of oil shelves, for location of geophysical monitoring equipment and for other purposes.

Developments of the project related to techniques for generating pulses, technical means of destruction, hardware control methods of destruction process and work mode of a plant can be used for drilling large diameter boreholes for thermal power engineering; boiler wells for creating repositories of nuclear wastes; boreholes for foundations of engineering objects

---

\* Работа выполнена по гранту РФФИ-ГФЕН\_а № 53041.

in permafrost zone, including LNG storages, in modular plants for mining valuable raw materials in severe geographical and climatic conditions of the North.

**Keywords:**

*oil production, heavy oil, well drilling, Arctic shelf, electric pulse destruction, drilling equipment, high-voltage pulses.*



**Введение. Электроимпульсное разрушение материалов**

Российские ученые заложили основы нового научного направления в электрофизике – физики электровзрыва в конденсированных средах и его технологического применения для разрушения геоматериалов [1–3]. Электроимпульсный способ разрушения геоматериалов отличается высокой энергетической эффективностью и уникальные технологические особенности. Это определяет перспективность его универсального использования

в процессах добычи и переработки минерального сырья и в горнотехническом строительстве: для бурения скважин различного диаметра и назначения, дробления и измельчения руд и технических материалов, резания и поверхностной обработки массива и блочного камня. В России впервые были проведены испытания различных технологических применений способа как в лабораторных, так и в производственных условиях с подтверждением значимых технологических преимуществ способа перед традиционными. Особым стимулом для развития исследований способа было то, что он по энергоэффективности разрушения крепких и особо крепких горных пород существенно превосходит традиционные способы.

Научный приоритет российских ученых закреплен пионерными научными публикациями [4–7]; инновационный потенциал новых технологий подтверждается присуждением разработкам высоких наград международных инновационных выставок. Однако в силу отсутствия должного финансирования научных исследований и разрушения системы проектно-конструкторских организаций в горно-обогатительной отрасли, производственное освоение разработанных технологий в России остановилось, ограничившись передачей геологическим научно-производственным организациям десятка дезинтеграционных установок для исследования и опробования геологических проб [8]. Именно усовершенствованные образцы этих установок, поставленных в Германию, Францию и Великобританию, способствовали подключению зарубежных научных организаций и фирм к исследованиям по электроимпульсной тематике, в том числе в рамках совместных проектов с российскими организациями. В Исследовательском центре г. Карлсруэ (FZK), Германия, создан исследовательский институт электроразрядных и микроволновых технологий и уже появились предложения зарубежных фирм (Ammann Schweiz AG Mediacyber, SelFrag) [9] на продажу электроимпульсных установок, изготавливаемых по лицензиям данного центра. Работы по электроимпульсным технологиям также проводятся в Канаде, Японии, Австралии, Китае и др. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по электроимпульсным технологиям выполнены для транснациональных компаний: Shell, Statoil, UnoDril, Schlumberger, BP, Komatsu и др.

Государство и отечественный бизнес теряют возможность освоения уникальных инновационных технологий, создались условия для безвозвратной утраты накопленного в России большого багажа составляющих ноу-хау знаний. Для перехода к стадии широких опытно-конструкторских работ и производственного освоения технологий очень значимым является восстановление фронта научно-исследовательских работ для дальнейшего совершенствования научно-технических основ электроимпульсного способа с учетом современных достижений электроники, электротехники, высоковольтной импульсной техники. Поэтому сейчас, когда от российских ученых ждут «...не слепого копирования существующих зарубежных разработок, а собственных, оригинальных решений задач, стоящих перед экономикой и промышленностью...»

(из выступления В. В. Путина на Президентском совете 8 декабря 2014 г.), есть основание поставить вопрос о форсировании разработки научно-технологических основ электроимпульсного способа разрушения материалов, как отвечающего потребностям многих отраслей горной промышленности и инженерного строительства. Прежде всего, это имеет отношение к нефте-газодобыче в Арктике и связанным с ней технико-экономическим и экологическим проблемам.

Ниже оцениваются перспективы разработки технологий на основе электроимпульсного способа разрушения геоматериалов для освоения месторождений нефти, газа и твердых полезных ископаемых в зоне вечной мерзлоты и на Арктическом шельфе в сложной ледовой обстановке, для различных инженерно-технических работ в арктических условиях. Работы в данном направлении стали предметом проекта, выполняемого в соответствии с Соглашением о научно-техническом сотрудничестве между Кольским научным центром РАН и Университетом науки и технологии Хуажонг (Huazhong University of Science and Technology, HUST), КНР.

Научно-техническое содержание новой технологии повышения нефтеотдачи и полноты использования месторождений углеводородов с помощью электроимпульсного бурения и электрогидроимпульсного воздействия на продуктивный пласт включает:

- бурение скважин электроимпульсным способом как наименее энергоемким способом разрушения горных пород, наиболее производительным и экономичным способом проходки в силу более высокой стойкости породоразрушающего инструмента, меньших затрат времени на спускоподъемные операции;

- новые электротехнические решения в отношении генерирования высоковольтных импульсов, позволяющие создавать компактные буровые снаряды на основе погружных генераторов импульсов, обеспечивая высокую маневренность продвижения бурового снаряда в толще пород при проходке вертикальных, наклонных, горизонтальных и горизонтально-восходящих скважин с наиболее эффективным вскрытием нефтеносных пластов;

- создание с помощью электроимпульсных породоразрушающих устройств на глубине в толще пород специальных выработок (технологического оперативного пространства) для формирования куста наклонных и горизонтальных скважин с максимально полным охватом нефтеносных пластов, а также для размещения аппаратуры геофизического мониторинга и иных технологических узлов;

- электроимпульсное бурение удачно сочетается с электрогидроимпульсным воздействием на продуктивный пласт. Генерирование высоковольтных импульсов для электроимпульсного бурения по схеме работы с двумя источниками, отличающимися уровнями напряжения и энергии, обеспечит существенное повышение КПД передачи энергии в канал разряда блока электрогидроимпульсного воздействия за счет возможности увеличения длины разрядного промежутка при его пробое повышенным напряжением от блока электроимпульсного пробоя.

С 2016 г. эти работы начинаются проектом РФФИ-ГФЕН-а № 53041 – совместным конкурсом Российского фонда фундаментальных исследований и Государственного фонда естественных наук КНР, которым предусматривается совершенствование техники генерирования высоковольтных импульсов для электроимпульсного бурения скважин большого диаметра как первого этапа в разработке новой энергоэффективной технологии вскрытия и разработки нефтяных месторождений в рамках фундаментальной научной проблемы «Совершенствование научно-технических основ скважинных горных технологий для освоения нефтяных и газовых месторождений на больших глубинах».

### **Электроимпульсное бурение в технологии добычи нефти в Арктике**

Запасы нефти, удобные для добычи, истощаются ускоренными темпами, степень выработанности запасов осваиваемых нефтегазовых месторождений достигла 60 %, притом что извлечение нефти из недр ниже 40 % [10, 11]. В условиях стагнации нефтедобычи в основных регионах страны Арктический шельф России рассматривается как один из ключевых

регионов поддержания и роста добычи нефти. Потенциальные для освоения месторождения в северных районах в большей части содержат трудноизвлекаемые запасы тяжелой нефти и сложные подгазовые залежи. Разработка месторождений высоковязких нефтей (битумы, тяжелые нефти, газовые гидраты) как ценного сырья для получения множества полезных нефтехимических продуктов актуальна как никогда [12]. Однако для добычи нетрадиционных ресурсов требуются новые технологии, многими из которых Россия не располагает и ограничена санкциями на их поставку из-за рубежа. Возможно, что именно здесь ожидается наиболее эффективное использование электроимпульсного бурения для вскрытия месторождений, способствующее полноте извлечения тяжелой нефти.

Исследования электроимпульсного бурения в российских разработках электроимпульсной тематики составляют основную долю работ. Спектр технологического использования способа включает: бурение веера скважин в условиях подземной выработки для добычи руд, бурение горизонтальных опережающих скважин для сооружения подземных выработок, бурение неглубоких скважин (5–10 м) для сооружения траншей и котлованов в скальных породах, проходку скважин большого диаметра для сооружения шахтных стволов и колодцев (КНЦ РАН, г. Апатиты, рис. 1); бурение взрывных скважин для добычи руд на открытых горных работах, бурение геолого-разведочных скважин с отбором ориентированного керна, бурение скважин большого диаметра в мерзлых грунтах района БАМ, бурение глубоких скважин (Научно-исследовательский институт высоких напряжений, г. Томск), сооружение шахтных стволов (Институт угля Сибирского отделения РАН, г. Кемерово).



Рис. 1. Высоковольтный полигон электроимпульсного бурения КНЦ РАН: буровой стенд, буровые снаряды для бурения скважин большого диаметра и вид буримых скважин

Из богатого опыта физических исследований и технологических разработок в дополнение к оценке достоинств способа [13] акцентируем внимание на следующем.

*1. Фактор диаметра буримых скважин.* Техничко-экономическая эффективность применения способа определяется как технико-физическими показателями процесса – скоростью бурения и энергоемкостью процесса, так и показателями эксплуатационной надежности технических средств. При исключительно жестких условиях по уровню электрических параметров (импульсного напряжения) работоспособность технических средств имеет решающее значение для реализации способа. В частности, основная масса отказов при бурении связана с электрическим пробоем твердой и жидкой изоляции в буровом снаряде. При уменьшении диаметра скважин координация электрической прочности изоляционных элементов бурового снаряда и пробивных напряжений горной породы в рабочих промежутках породоразрушающего

инструмента соответствующим выбором соотношения величин этих промежутков с учетом вероятностного характера пробоя сред становится менее однозначной в отношении надежности работы изоляции. Кроме того, соответствующее этому случаю существенное снижение производительности разрушения делает электроимпульсное бурение при диаметре скважин менее 60–80 мм экономически нецелесообразным. Электроимпульсное бурение скважин диаметром 100–150 мм апробировано при бурении взрывных скважин в карьерах и в подземных выработках с использованием как диэлектрических жидкостей, так и воды. По критериям технико-экономической эффективности бурение оправдано при частоте следования 15–20 имп/с. Возможность работы импульсных конденсаторов в таком частотном режиме подтверждена стендовыми испытаниями как отдельно конденсаторов, так и генераторов импульсного напряжения (ГИН) Аркадзева – Маркса.

С увеличением диаметра буримых скважин координировать электрическую прочность элементов изоляции и пробивных напряжений породы становится все проще. Возможность увеличения рабочих промежутков в породоразрушающем инструменте способствует повышению производительности бурения. За счет секционирования породоразрушающего инструмента с подключением секций к отдельным источникам импульсного напряжения появляется возможность значительно (пропорционально числу секций) повысить плотность импульсов, подаваемых на забой разрушения и скорость бурения. Парадокс, но с увеличением диаметра скважины механическая скорость электроимпульсного бурения повышается, а удельные энергозатраты процесса бурения снижаются. Впервые на это обращено внимание в монографии [5], в работах последнего времени (см., например, [14]) подтверждено, что скорость бурения возрастает с увеличением диаметра скважины при оптимизации условий бурения: расстояния между электродами, рабочего напряжения, энерговыклада, условий промывки. Для получения скорости электроимпульсного бурения, сопоставимой с лучшими показателями механических способов, достаточно частоты следования импульсов 4–6 имп/с.

*2. Фактор вида промывочной жидкости.* Среда в приэлектродной области породоразрушающего устройства выполняет две функции: во-первых, аналогично буровому раствору при механических способах бурения, выносит из скважины продукт разрушения породы, во-вторых, и это главное, способствует реализации физического принципа процесса электроимпульсного разрушения – внедрения разряда в поверхностный слой твердого тела. В технологических исследованиях электроимпульсного бурения используются диэлектрические и слабо электропроводящие (от деионизованной до уровня технической воды) жидкости. Экспериментально показана возможность электроимпульсного разрушения в паровоздушной среде под давлением [15]. Но это можно рассматривать лишь в плане выявления ограниченного влияния фактора статического давления на разрушаемость породы. Техническую целесообразность и осуществимость предложения, рассматриваемого как перспективное для глубинного бурения скважин, еще следует подтвердить натурными экспериментами, это станет возможным лишь после разработки соответствующих технических средств бурения. Отметим, что предусмотренная выполняемым проектом разработка погружных генераторов высоковольтных импульсов создаст условия для проверки возможности бурения на больших глубинах при высоком статическом давлении. На первом этапе испытания предлагается провести на законсервированной скважине, но, как представляют авторы настоящей статьи, лучше при использовании диэлектрической жидкости в качестве рабочей среды. Реализация процесса в электрически прочном газе под давлением, в вакууме не имеет экспериментального подтверждения и технологически вряд ли осуществима для условий электроимпульсного бурения. Не имеет прямого отношения к принципу электроимпульсного разрушения и эффект разупрочнения материала каналами незавершенного пробоя при воздействии импульсов напряжения наносекундной длительности, реализуемый как в жидкой диэлектрической среде, так и в воздухе (принципиально в любом газе и в вакууме). Это самостоятельный и достаточно эффективный способ разрядно-импульсной обработки материалов, в частности, как один

из этапов комбинированного рудоподготовительного процесса с использованием нескольких способов дезинтеграции руды, например, для вскрытия и извлечения драгоценных металлов методами выщелачивания [16–18]. В первоначальном предложении электроимпульсного разрушения был вариант импульсного высоковольтного разрушения горных пород без второго электрода, когда его функцию выполняет электропроводящая породная масса в недрах Земли [1]. Предполагалось, что этот вариант найдет применение при бурении глубоких скважин. Результатов экспериментальной проверки данного предложения представлено не было. Возможность разупрочнения породы каналами незавершенных разрядов, в том числе без ограничений на длительность импульсов напряжения, не вызывает возражений, но технологически вряд ли будет оправдано усложнение схемы средствами механического бурения разупрочненного массива породы.

В сравнении с выполнявшимися ранее исследованиями, на основе которых сложились представления об электроимпульсном бурении, в настоящее время подход к выбору промывочной жидкости существенно изменяется. Ранее в проектах электроимпульсного бурения скважин при выборе промывочной жидкости учитывались три главных фактора: влияние электрофизических свойств жидкости на эффективность внедрения разряда в горную породу, фактор пожаробезопасности и фактор стоимости жидкости. В диэлектрических жидкостях эффективность внедрения разряда в горную породу выше, процесс реализуется при менее жестких критериальных условиях пробоя (пробивные градиенты напряжения и крутизна фронта импульсов), в результате производительность процесса и эксплуатационная надежность изоляционных элементов систем передачи импульсов и бурового инструмента выше, чем в недиэлектрической среде. Фактор пожаробезопасности стал учитываться после двух случаев пожара на экспериментальных установках, использовавших в качестве промывочной жидкости дизельное топливо как самую дешевую диэлектрическую жидкость: на испытательном полигоне Научно-исследовательского института высоких напряжений (Томск) и на установке Кольского филиала АН СССР в подземном руднике комбината «Апатит». Однако при использовании альтернативного варианта промывочной жидкости, неогнеопасной и дешевой (по стоимости воды), существенно усложняются условия генерирования импульсов с параметрами (амплитудой и крутизной фронта импульса), обеспечивающими приемлемую эффективность внедрения разряда в горную породу. Это определяется электрическими параметрами электродного устройства бурения (сопротивление и емкость), которые непосредственно связаны с диаметром скважины. Для скважин диаметром 100–250 мм проблемы с генерированием высоковольтных импульсов решались применением схем обострения высоковольтных импульсов и деионизацией воды ионообменными смолами, и использование воды для промывки считалось обоснованным [19]. Применение диэлектрических жидкостей для бурения скважин большого диаметра со значительной металлоемкостью породоразрушающего устройства – вынужденная мера. Для преодоления этого фактора предложены растворы на нефтяной основе [20] со значительной долей воды – известково-битумный раствор. Его рецептура раствора разработана Институтом проблем нефти и газа им. И.М. Губкина РАН, исследования электрофизических свойств данного раствора подтвердили эффективность его применения для электроимпульсного бурения [21]. Позднее аналогичный раствор на углеводородной основе был разработан в Институте угля СО РАН [22]. К настоящему времени предложен большой набор негорючих и экологически безопасных растворов на диэлектрической основе, в том числе буровых растворов на масляной основе Versa Pro и Versa Clean, трансформаторной жидкости Midel 7131 и др. Определяющим становится понимание, что электроимпульсное бурение вне зависимости от диаметра скважин следует ориентировать на использование растворов на диэлектрической основе в качестве промывочной жидкости, что не только решает экологические проблемы бурения, но и упрощает электротехническое обеспечение технологии.

### Электротехнические аспекты бурения скважин большого диаметра

Главная причина, продолжительное время сдерживавшая производственное освоение электроимпульсных технологий, – это несовершенство электротехнического оборудования для реализации способа: ограниченный ресурс работы и неудовлетворительные удельные энергетические и массогабаритные характеристики элементной базы (конденсаторы, зарядные устройства, генераторы импульсов), во многих случаях не обеспечивавшие технико-экономическую эффективность процессов и достаточную эксплуатационную надежность работы установок [23–25]. Сейчас по основному перечню технических вопросов найдены решения этой проблемы. Выполненные исследования указывают на достижимость целей по существенному (в отдельных случаях на порядок и выше) улучшению массогабаритных параметров оборудования. Произошедший в последние два десятилетия революционный прорыв в выпрямительной технике, связанный с совершенствованием полупроводниковой элементной базы и переходом к схемам высокочастотного преобразования напряжения, позволяет более чем на порядок улучшить удельные энергетические характеристики зарядных устройств. Созданы импульсные конденсаторы, способные работать при частоте следования 20 имп/с с ресурсом в  $10^8$ – $10^9$  импульсов, что практически закрывает вопросы в проблеме экономической обоснованности многих технологических процессов.

В отношении средств генерирования высоковольтных импульсов имеется значительный пакет предложений, как предлагавшихся ранее, но не вовлеченных в использование, так и возможных для заимствования из смежных областей электрофизики и электротехники с адаптацией их к режимам, свойственным электроимпульсному разрушению материалов. С переходом к схемам импульсного трансформирования напряжения и использованию материалов с высокой магнитной проницаемостью удалось существенно уменьшить габариты и вес генераторов импульсов [26–28], что открывает путь к созданию компактных и энергетически эффективных технологических комплексов электроимпульсного разрушения геоматериалов повышенной производительности с оптимальной компоновкой электротехнической и технологической частей установки.

При проходке скважин большого диаметра (300–400 мм) требуется более рационально ставить задачу и добиваться решения скважинного исполнения генератора высоковольтных импульсов, включая в него зарядное устройство, генератор высоковольтных импульсов по схеме импульсного трансформатора (накопитель энергии – импульсный трансформатор и коммутирующие устройства). Расположение генератора импульсов непосредственно перед породоразрушающим устройством снимает проблемы, связанные с канализацией высоковольтных импульсов на забой и с ограничением мощности разряда индуктивностью передающей системы.

В проекте за основу схемы генерирования высоковольтных импульсов будет принята схема импульсного трансформирования (ИТ) с контуром обострения импульсов (рис. 2). Энергетическая оптимизация передачи энергии в ИТ прежде всего исходит из условия оптимального соотношения параметров ИТ ( $C_2 n^2 / C_1 = 1$ , где  $n$  – коэффициент трансформации), при котором обеспечивается максимальная передача энергии из накопителя  $C_1$  с первичной стороны ИТ в накопитель  $C_2$  на вторичной стороне ИТ (обостритель) к моменту времени первого максимума напряжения, когда срабатывает коммутирующее устройство подключения обострителя к разрядному промежутку породоразрушающего устройства (буровой коронке). В исследованиях на лабораторном образце ИТ класса 350 кВ на разомкнутом магнитопроводе из феррита КПД энергопередачи достигает значения 80 %.

Второе (и главное) условие энергетической оптимизации процесса электроимпульсного разрушения исходит из представления процесса двумя последовательными стадиями [5]. На стадии формирования пробоя твердого тела параметры импульсного напряжения определяют вероятность внедрения и глубину внедрения разряда в поверхностный слой твердого тела, т. е. потенциальный объем разрушения. На стадии формирования в твердом теле поля

напряжений и распространения трещин параметры энерговыделения в канале разряда (количество и мощность) определяют степень разрушения материала, КПД преобразования энергии канала разряда в работу разрушения, энергию новой поверхности. При этом критерии оптимизации параметров энерговыделения определяются физико-механическими свойствами материалов и условиями пробоя. Для хрупких материалов (при малой глубине внедрения разряда, при пробое фрагментов породы небольшой крупности) энергию следует выделять достаточно быстро: за время, ограниченное условиями разгрузки канала разряда через устья внедрения, и выходящие на свободную поверхность трещины. Для пластичных материалов при значительном расстоянии канала разряда до свободной поверхности энерговыделение следует затянуть во времени, обеспечивая максимально продолжительное время распространения трещин.

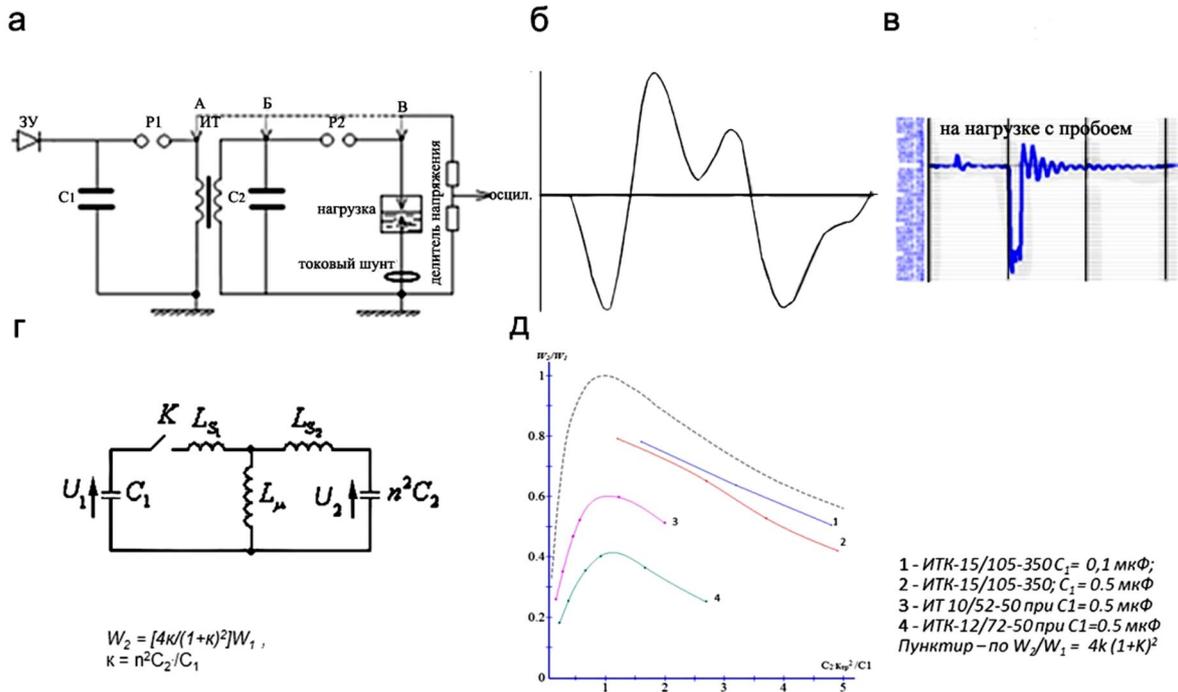


Рис. 2. Переходный процесс в генераторе импульсов с импульсным трансформатором: а – электрическая схема генератора; б – осциллограмма напряжения на обостряющей емкости в режиме холостого хода; в – осциллограмма напряжения на нагрузке; г – схема замещения; д – энергопередача в обостритель

В одноконтурной схеме генерирования импульсов (генератор Маркса) невозможно задать параметры генератора, чтобы они отвечали условиям оптимальности для обеих стадий процесса. Чтобы обеспечить оптимизацию процесса электроимпульсного разрушения на обеих стадиях процесса, необходимо применять комбинированные схемы генератора импульсов с двумя источниками разного уровня напряжения и энергии [4], когда энергией одного источника – (с высоким уровнем напряжения) обеспечивают электрический пробой породы, а энергией второго источника (с более низким уровнем напряжения) – непосредственное разрушение породы. В этом случае с большей энергетической эффективностью имеется возможность независимо оптимизировать формирование импульса напряжения на нагрузке для эффективного пробоя (с максимальной вероятностью и глубиной внедрения) и режим энерговыклада в канал разряда после пробоя, обеспечивая максимальный разрушающий эффект и минимальную энергоемкость процесса электроимпульсного разрушения в целом. Однако в действующей практике исследований электроимпульсного способа разрушения этим принципом пренебрегали, используя для генерирования импульсов более простую схему генератора Маркса. Создание

компактного погружного генератора высоковольтных импульсов (ПГВВИ) возможно только по схеме импульсного трансформирования. В выполняемом проекте предусматривается исполнение ПГВВИ по схеме с двумя источниками энергии: для формирования пробоя будет использоваться импульсный трансформатор с контуром обострения, а для разрушения породы – отдельный накопитель энергии (до 1 кДж). Будут рассмотрены различные схемы синхронизации срабатывания источников (трехэлектродные разрядники, магнитные ключи и др.). При использовании диэлектрических сред в качестве промывочной жидкости энергию, необходимую для формирования пробоя, можно ограничить величиной в несколько десятков джоулей. Столь незначительный уровень энергии снимает остроту проблемы теплового режима ИТ, ее можно будет решить охлаждением ИТ циркулирующей промывочной жидкостью.

По такой же схеме будет формироваться канал (контур) электрогидроимпульсного воздействия на нефтеносный пласт, но при существенно большем значении энергии второго источника (десятки килоджоулей) – за счет увеличения значения емкости. Канал генерирования высоковольтных импульсов будет настраиваться на пробой максимально возможного разрядного промежутка, чтобы повысить КПД передачи энергии из накопителя в канал разряда и усилить эффект воздействия.

При бурении скважин большого диаметра создаются предпосылки интенсификации процесса разрушения за счет увеличения межэлектродных промежутков буровой коронки. Ограничением этому является допустимый уровень рабочего напряжения, определяющий эксплуатационную надежность работы установки. Оптимизационные исследования по снижению пробивных градиентов будут исходить из возможности корректировки подходов к методике выбора критериальных условий эффективного электрического пробоя твердого тела (внедрение разряда в твердое тело), на основе изучения закономерностей пробоя в широком диапазоне параметров волн импульсного напряжения по форме (косо-, прямоугольные с наносекундным фронтом, апериодические, волны третьего порядка) и времени воздействия в интервале от нано- до микросекунд, в том числе с использованием различных дополнительных воздействий на процесс развития разряда. Ранее, при сопоставлении критериальных условий электроимпульсного разрушения на косо- и прямоугольных наносекундных импульсах [5], был поставлен вопрос о необходимости разработки универсальной методики, учитывающей закономерности пробоя на импульсах напряжения произвольной формы. В работах последнего времени представлены экспериментальные данные об электроимпульсном пробое и разрушении на хвосте апериодических волн напряжения (см., например, [29]). Показано, что в этом случае уровни напряжения пробоя породы значимо снижаются в сравнении с косоугольными импульсами. Разработка универсальной методики выявления критериальных условий эффективного электрического пробоя твердого тела будет иметь большое практическое значение для оптимизации электроимпульсного процесса, так как позволит при технически приемлемом уровне рабочих напряжений оптимально увеличить разрядные промежутки в породоразрушающих инструментах и за счет этого существенно повысить производительность и снизить энергоемкость электроимпульсного разрушения.

При рассмотрении проекта в качестве нового этапа в развитии электроимпульсных технологий нельзя оставлять в стороне проблему разработки методов и аппаратных средств для оценки эффективности разрядного процесса (внедрения в твердое тело) в условиях непрерывного технологического процесса с возможностью оперативного управления, том числе автоматического, работой установки путем корректировки параметров генерирования импульсов для обеспечения максимальной эффективности процесса, с отключением установки в случае нештатной ситуации. Острота этой проблемы возрастает из-за удаленности технических средств реализации технологии – бурового снаряжения с погружным генератором импульсов – от пункта управления электротехнологическим комплексом. В электроимпульсной технологии достоверно интерпретируется лишь единственный критерий оценки эффективности разрядного процесса – сопротивление канала разряда. В сопоставимых условиях пробоя в промежутках одинаковой

величины сопротивления канала разряда в твердом теле (горная порода) выше, чем в жидкости, тем более в газовой среде [30]. Учитывая многообразие причин, вызывающих нештатные режимы работы установки, этого недостаточно, чтобы разрабатывать аппаратные комплексы для оперативного автоматического управления работой установки. Должны быть исследованы и другие методы, основанные, например, на использовании характеристик светового, звукового и электромагнитного излучения, волн давления в рабочей жидкости и др., чтобы по совокупности регистрируемых параметров обрабатывались команды на управление электроимпульсной установкой.

### Технологические схемы электроимпульсного бурения

Бурение скважин можно осуществлять сплошным забоем, способом последовательного расширения скважины (опробовано в исследовательской практике, см. рис. 1), кольцевым забоем с подрезкой керна и его крупноблоковым удалением (предложение). Для шламоудаления применимы способы, свойственные механическим способам бурения: промывка, эрлифт, шнековые транспортеры, с призабойными шламособорниками и без них. Варианты проходки вертикальных скважин представлены на рис. 3.

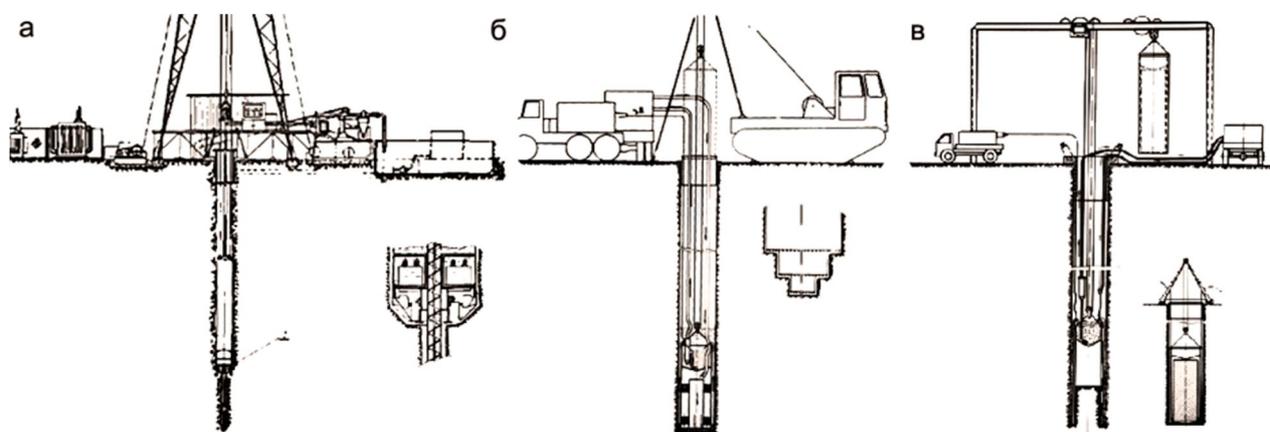


Рис. 3. Схемы проходки скважин большого диаметра:

а – сплошным забоем с погружным источником импульсов, шнековый транспортер шлама, б – сплошным забоем с призабойным шламособорником и удалением шлама эрлифтом, в – кольцевым забоем с подрезкой и отрывом керна

Способы и средства электроимпульсного бурения позволяют управлять направлением скважины вне связи с геологическими причинами их искривления – анизотропия, слоистость, перемежаемость, трещиноватость пород. Управляемое формирование забоя разрушения обеспечивается перераспределением плотности энергии электрических разрядов по площади забоя электротехническими приемами и за счет конструктивных особенностей породоразрушающего инструмента. В электроимпульсном бурении такая задача ставится впервые. Повышение маневренности бурового снаряда, если задать направление его продвижения по наиболее продуктивным залежам и меандрам, будет способствовать наиболее эффективному вскрытию продуктивных пластов.

С помощью электроимпульсных породоразрушающих устройств имеется возможность создания в толще породы «котлов» и выработок различного профиля как оперативного рабочего пространства для решения различных технологических задач, контроля и геофизического мониторинга. Применительно к электроимпульсному бурению известно предложение по созданию котлового расширения скважин с помощью раздвижных электродов [7]. Для создания оперативного рабочего пространства многофункционального назначения этого

недостаточно, будут исследованы другие способы и средства. Использование выработки для формирования куста наклонных и горизонтальных скважин обеспечит максимально полный охват нефтеносных пластов (рис. 4а).

Вариант бурения на шельфе представлен на рис. 4б. Поскольку электроимпульсное бурение не требует энергоемких средств вращения бурового инструмента и значительной высоты буровой вышки, а ограничивается лишь спуско-подъемным механизмом бурового снаряда и системой шламаудаления, компактный технологический комплекс для электроимпульсного бурения с роботизированной системой управления установкой имеет смысл размещать

в закрепляемой на морском дне камере (эллинге) со снабжением комплекса электрической энергией от блока, размещаемого на поверхности океана (платформа, корабль) или под слоем льда. При необходимости возможен вариант заполнения эллинга диэлектрической жидкостью, используемой для промывки скважины. Предлагаемое решение не экзотичнее того, что предлагается Ове Гудместадом (Ove Gudmestad), Университет Ставангера, Норвегия, – прокладка с материка к месторождению протяженного подземного тоннеля (длиной до 30 км на глубине 200–300 м) с камерой для размещения бурового оборудования [31].

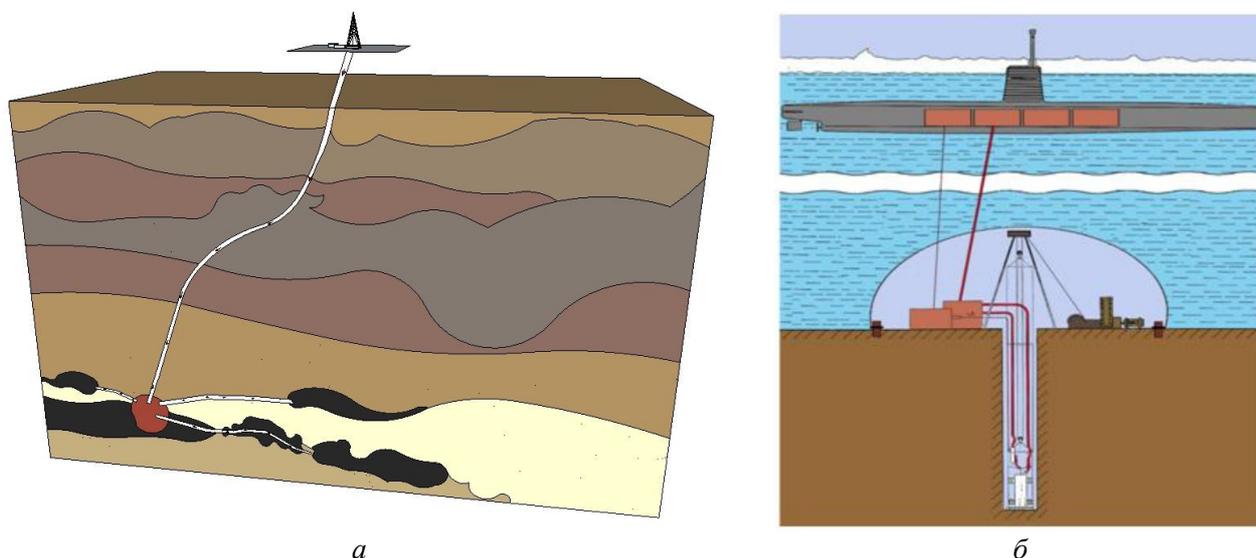


Рис. 4. Схема электроимпульсного бурения скважин для вскрытия нефтеносного месторождения (а) и на шельфе (б)

### Заключение

Технологии на основе электроимпульсного способа разрушения материалов открывают множество возможностей повышения нефтеотдачи и полноты использования месторождений углеводородов, прежде всего тяжелой нефти.

Частные разработки по проекту в отношении техники генерирования импульсов, разработки технических средств разрушения, аппаратных методов контроля процесса разрушения и управления работой установки могут найти применение: для бурения скважин большого диаметра для термальной энергетики; для бурения котловых скважин большого диаметра с целью создания хранилищ ядерных отходов; для бурения скважин для свайных оснований инженерных объектов в зоне вечной мерзлоты, в том числе хранилищ СПГ; в модульных установках для разработки месторождений особо ценного сырья в сложных географических и климатических условиях Севера и др.

Выполнение проекта предоставляет широкие возможности совместной творческой работы электро- и геофизиков, электротехников, разработчиков буровой техники, подводных аппаратов и робототехнических комплексов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Челиков А. Т. Электрические разряды обрабатывают материалы, разрушают твердые тела // Изв. Томск. политехн. ин-та. Томск: Изд-во ТГУ, 1958. Т. 95. С. 315–339.
2. Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе разряда с жидким диэлектриком при воздействии импульса напряжения: свидетельство на открытие № 122 РФ. Приоритет от 14.12.1961; Опубл. 27.07.1999.
3. Воробьев А. А. Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. Томск: Изд-во ТГУ, 1961. 150 с.
4. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л., 1987. 179 с.
5. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 276 с.
6. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
7. Брылин В. И. Бурение скважин специального назначения: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. 255 с.
8. Шуляков А. Д., Лупал С. Д., Таракановский Э. Н. Установка избирательной дезинтеграции геологических проб (ДИК1 М) // Обогащение руд. 1989. № 4. С. 45–46.
9. Selfrag. High voltage pulse power fragmentation. URL: <http://www.selective-fragmentation.com>
10. Ившина О. «Тяжелая нефть» России: отрасль на пороге кризиса. URL: [http://www.bbc.com/russian/business/2014/11/141127\\_oil\\_russia\\_salym](http://www.bbc.com/russian/business/2014/11/141127_oil_russia_salym)
11. Наши нефтегазовые технологии порой самые революционные, но...: интервью акад. А. Н. Дмитриевского. URL: <http://teknoblog.ru/2015/03/14/35031>
12. Николин И. В. Методы разработки тяжелых нефтей и природных битумов // Наука – фундамент решения технологических проблем развития России. 2007. № 2. С. 54–68.
13. Усов А. Ф. Полувековой юбилей электроимпульсному способу разрушения материалов // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 4. С. 165–192.
14. Важов В. Ф. Развитие научно-технологических основ электроимпульсного бурения и резания горных пород: дис. ... докт. техн. наук. Томск, 2014.
15. Кривко В. В. Исследование импульсных характеристик пробоя различных сред и разрушения горных пород при повышенных давлениях и температурах: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1964. 253 с.
16. Усов А. Ф., Ракаев А. И. Электроимпульсное дробление и разупрочнение руд и материалов // Обогащение руд. 1989. № 4. С. 42–43.
17. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В. А. Чантурия [и др.] // ДАН. 1999. Т. 366, № 5. С. 680–683.
18. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями / Ю. А. Котов [и др.] // ДАН. 2000. Т. 372, № 5. С. 654–656.
19. Усов А. Ф. Исследование и расчет ГИН и условий использования электропроводящих сред в электроимпульсной технологии: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1966.
20. Усов А. Ф., Симонов В. Я. К вопросу об использовании воды и водных растворов в качестве промывочной среды при электроимпульсной технологии // Электроимпульсные методы разрушения горных пород: сб. науч. ст. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1967. С. 44–45.
21. О применении известково-битумных и эмульсионных растворов при электроимпульсной бурении скважин / Р. Э. Клейн [и др.] // Электроимпульсное разрушение горных пород: сб. науч. ст. Апатиты: КФАН СССР, 1969. Вып. 2. С. 156–160.
22. Абрамов И. Л. Исследование структурированных растворов на углеводородной основе при разрушении горных пород электроимпульсным способом: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 1996.
23. Усов А. Ф. Перспективы технологий электроимпульсного разрушения горных пород и руд // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 1. С. 54–62.
24. Усов А. Ф., Гладков В. С. Вопросы электротехнического обеспечения технологий электроимпульсного разрушения материалов источниками высоковольтных импульсов // Вестник НТУ "ХПИ". Харьков, 2004. Вып. 35. С. 143–154.
25. Усов А. Ф., Бородулин В. В. Проблема улучшения удельных массогабаритных и энергетических характеристик технических средств электроимпульсного разрушения материалов // Горн. информ.-аналит. бюл. 2010. № 9. С. 375–379.
26. Усов А. Ф., Потокин А. С. Импульсное трансформирование напряжения и энергии для электроимпульсного разрушения материалов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2014. Вып. 9 (26). С. 40–49.
27. Усов А. Ф., Потокин А. С., Ильин Д. В. Исследование теплового режима импульсного трансформатора в технологическом режиме электроимпульсного разрушения. // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. Вып. 11 (34). С. 46–54.
28. Usov A. F., He Mengbing, Potokin A. S. Prospects in creation technological systems electric pulse fracture ores based on new electrical base // XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC-2014), Santiago Chile, 20–24 October 2014: Conference Proceedings. 2014. P. 33–44.
29. Кузнецов Ю. И., Важов В. Ф., Журков М. Ю. Электрический пробой твердых диэлектриков и горных пород на спаде импульса напряжения // Известия вузов. Физика. 2011. № 4. С. 17–22.
30. Семкин Б. В. Электрический взрыв в конденсированных средах: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ин-та, 1979. 88 с.
31. Норвежский ученый предлагает альтернативный метод добычи нефти в Арктике: [заголовок с экрана монитора]. URL: <http://www.dw.com/ru/норвежский-ученый-предлагает-альтернативный-метод-добычи-нефти-в-арктике/a-15490339>.

#### Сведения об авторах

Усов Анатолий Федорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-организационного отдела КНЦ РАН, старший научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

E-mail: usov@admksk.apatity.ru

*Ху Менбинг* – кандидат технических наук, доцент Университета науки и технологии, Хуаджонг, Китай  
E-mail: pulhmb@hust.edu.cn

**About the authors**

*Anatoly F. Usov* – PhD (Eng.), Head of Department for Organization & Planning of Scientific Research at the Kola Science Centre of the RAS

E-mail: usov@admksk.apatity.ru

*Mengbing He* – PhD (Eng.), Associate Professor at Huazhong University of Science and Technology, China

E-mail: pulhmb@hust.edu.cn

**Библиографическое описание статьи**

*Усов А. Ф.* Арктические перспективы электроимпульсного способа разрушения материалов и задачи их научно-технического обеспечения / *А. Ф. Усов, М. Ху* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 111–123.

**Reference**

*Usov A. F.* Arctic Prospects of Electric Pulse Method for Materials Destruction and Tasks of Their Scientific and Technical Support / *A. F. Usov, M. He* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 111–123.

УДК 574.2+576.08

**РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ ПО МИКРОЯДЕРНОМУ ТЕСТУ  
НА КЛЕТКАХ ЧЕЛОВЕКА****Д. А. Петрашова<sup>1</sup>, А. В. Бурцев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН<sup>2</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН**Аннотация**

Обоснована необходимость разработки специализированной базы данных при проведении многопараметровых цитогенетических исследований с выборками большого объема. Представлен опыт разработки многопользовательской базы данных, ориентированной на решение конкретных задач микроядерного теста. Продемонстрированы возможности и перспективы созданной информационной модели.

**Ключевые слова:**

*база данных, система управления базой данных, структура базы данных, микроядерный тест, цитогенетика, клетки букального эпителия, лимфоциты.*

**DEVELOPMENT OF A DATABASE FOR THE MICRONUCLEUS TEST UPON HUMAN CELLS****Dina A. Petrashova, Anton V. Burtsev**<sup>1</sup>R&D Centre for Human Adaptation in the Arctic of the KSC of the RAS<sup>2</sup>Center of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of the KSC of the RAS**Abstract**

The necessity to develop a specialized database for maintaining multiparameter cytogenetic studies with large sample volume is grounded. Experience in designing a multi-user database focused on specific tasks of the micronucleus test is presented. Some results of people questionings, buccal and peripheral blood lymphocytes micronucleus tests (including microphotography of nucleus and cell pathologies), blood pictures and immunology status have been inserted into this database. Potentials and perspectives of the created information model are demonstrated.

**Keywords:**

*database, database management system, database structure, micronucleus test, cytogenetics, buccal cells, lymphocytes.*

**Введение**

Микроядерный тест на соматических клетках человека и животных – один из относительно новых и перспективных методов определения генетических повреждений, которые широко используются в настоящее время для оценки генотоксических эффектов факторов среды, производственной экспозиции, отдельных соединений и их смесей в эколого-гигиенических исследованиях [1]. Данный метод характеризуется надежностью получаемых результатов, универсальностью объектов исследования, простотой по сравнению с другими методами определения повреждения ДНК, например, метафазным анализом, методом комет и т. д., в то же время не уступает им по чувствительности [2–4]. Он позволяет судить о нарушениях, произошедших во время митоза [5]. При исследовании генетических нарушений

в клетках человека наибольшее применение нашел микроядерный тест на лимфоцитах периферической крови и клетках буккального эпителия. Микроядерный тест на лимфоцитах крови с применением цитохалазина Б выгодно отличается тем, что имеется возможность накапливать клетки, содержащие генетические повреждения [1].

При проведении же массовых исследований благодаря нетравматичности, легкости получения достаточного количества клеток, неограниченным возможностям повторных анализов и возможности оценить не только общее, но и местное действие факторов окружающей среды, широко применяется микроядерный тест на буккальном эпителии [6]. В процессе комплексного обследования людей для анализа воздействия канцерогенных факторов интерес представляет одновременное применение двух методов исследования, поскольку между буккальным эпителием и регионарными лимфатическими узлами возможен перенос канцерогена за счет клеток Лангерганса. Данные клетки являются антигенпредставляющими внутриэпидермальными макрофагами и встречаются в составе буккального эпителия. Они способны мигрировать из эпидермиса в дерму и регионарные лимфатические узлы, перенося канцерогены, проникшие в буккальный эпителиальный слой, в регионарные лимфатические узлы. Эти канцерогены в лимфатических узлах могут оказывать деструктивные и мутагенные действия [7].

Однако получаемые результаты подвержены влиянию таких факторов, как пол [8–11], возраст [11–13], иммунологический и психологический статус обследуемых людей [14], а также диета [15–18], вредные привычки [19] и прием медикаментов. Их следует учитывать как при формировании групп для обследования, так и при статистической обработке данных и трактовке результатов [20].

Комплексное обследование людей, проводимое сотрудниками Научно-исследовательского центра медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН (НИЦ МБП), наряду с применением микроядерного теста на лимфоцитах периферической крови и буккальных эпителиоцитах человека [21–23], включает в себя интервьюирование по специально разработанному опроснику на наличие вредных привычек и медикаментозного лечения, определение лейкоцитарной формулы крови [24] и ее энтропии [25]; в некоторых исследованиях оценивается иммунный статус обследуемого, его кардиогемодинамика [26], проводится ряд психологических тестов на адаптивность, тревожность, депрессивное состояние и стресс [27], определяется социально-экономический статус [28].

При небольших выборках систематизация и обработка данных по такому количеству факторов не представляет труда. Согласно А. К. Нерсисян и А. И. Ильину [29], выборки, включающие менее 50 человек, составляют 68 % от 27 проанализированных публикаций из стран СНГ, 50–100 человек – 22 % и более 100 человек – 10 %. В цитогенетических исследованиях НИЦ МБП выборки, как правило, превышают 50 человек и в некоторых случаях достигают 250 человек. В связи с довольно большими объемами выборок в проводимых исследованиях мы столкнулись с проблемой структуризации и обработки получаемых данных. К тому же при обмене данными по своему блоку исследования между сотрудниками возрастает вероятность накопления ошибок в процессе копирования. Поэтому возникла необходимость в разработке базы данных по цитогенетическим показателям для оперативного и удобного обмена информацией между специалистами. Такая база должна обеспечивать выполнение следующих требований: многопользовательский и сетевой режимы; разделение привилегий и прав пользователей, контроль их действий; удобный интерфейс ввода и вывода данных для пользователя; гибкая и универсальная форма запроса, соответствующая требованиям каждого конкретного пользователя; возможность начальной математической обработки (нормирования) при формировании результатов запроса; экспорт сформированных запрошенных данных в таблицу Excel; минимум стороннего программного обеспечения; минимальные финансовые затраты на разработку и поддержку; совместимость с операционной системой семейства Windows.

### Используемое программное обеспечение

Основными компонентами прикладного программного обеспечения, удовлетворяющими техническим требованиям, выбраны следующие программные продукты:

- веб-сервер Apache для реализации локального веб-сервера базы данных;
- интерпретатор языка программирования PHP для формирования веб-интерфейса и обработки запросов пользователя;
- система управления базами данных MySQL для создания и управления разрабатываемой реляционной базой данных.

Указанное программное обеспечение полностью соответствует всем предъявленным требованиям, является полностью бесплатным решением и позволяет разработать интуитивно понятный интерфейс [30–32].

### Структура базы данных

Цитогенетическое исследование начинается с интервьюирования обследуемых по специально разработанному опроснику на наличие вредных привычек и медикаментозного лечения. Далее у испытуемого берутся мазки буккального эпителия, венозная и капиллярная кровь для приготовления цитологических и цитогенетических препаратов. Полученным препаратам присваивается порядковый номер. Поскольку для буккального эпителия на протяжении нескольких лет ведется сквозная нумерация и этот анализ проводится чаще всего, то номер, присвоенный образцу буккального эпителия, вносится в опросник и присваивается образцам крови и другим анализам.

Таким образом, за каждым испытуемым закреплено конкретное исследование, в которое входят следующие данные: опросный лист, результаты микроядерного теста на клетках буккального эпителия и лимфоцитах периферической крови, результаты клинического анализа крови (лейкоформула) и иммунологического статуса. Поэтому за основу базы данных (БД) взяты следующие таблицы: «Объекты», «Исследование», «Опросник», «Буккальный эпителий», «Лейкоформула», «Лимфоциты», «Иммунология».

По перечисленным таблицам выведена иерархическая модель отношений в разрабатываемой базе данных (рис. 1).

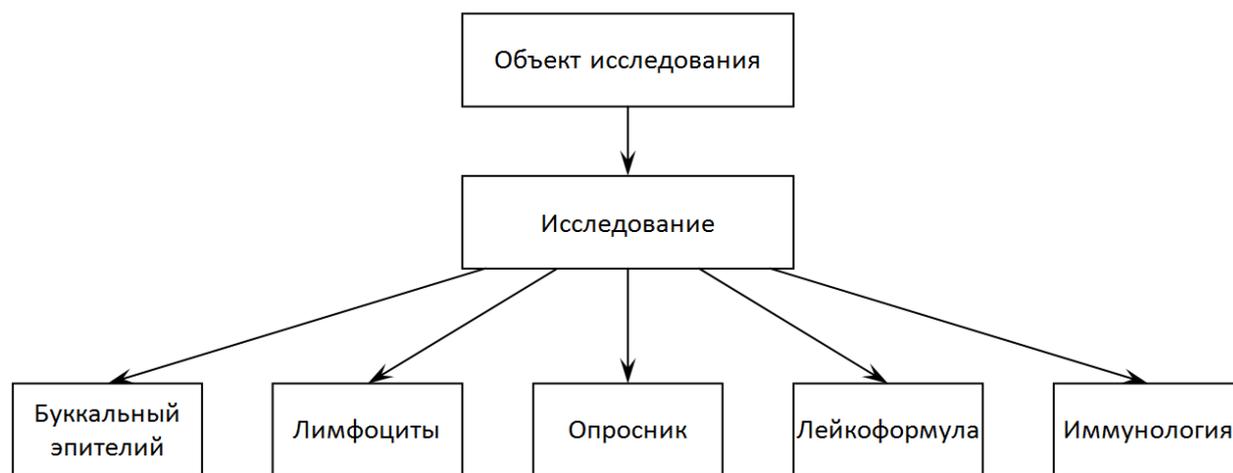


Рис. 1. Начальная иерархическая модель отношений

Для создания многопользовательской системы с контролем действий и прав доступа в базу данных добавлены следующие таблицы:

- 1) пользователь базы данных;
- 2) история действий пользователя.

Вспомогательные таблицы описывают новые связи и позволяют построить окончательную иерархическую модель отношений (рис. 2).

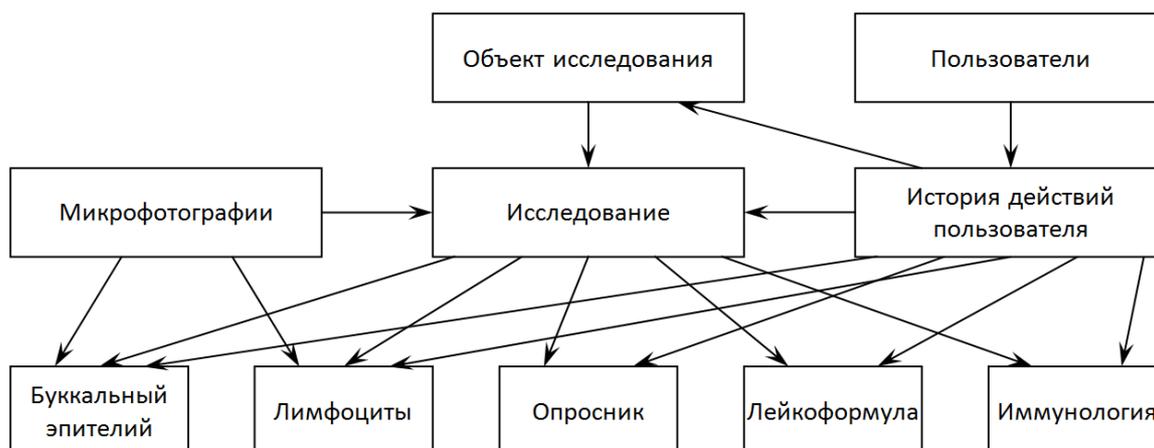


Рис. 2. Окончательная иерархическая модель отношений

### Ввод данных в базу данных

Объектом исследования служит испытуемый. Для иллюстрации возможностей базы данных и соблюдения законодательства РФ в таблицы внесена информация по персонам, не имеющим отношения к реальным людям. Поиск испытуемого в базе данных осуществляется тремя способами: по фамилии или ее части, дате рождения (полной или неполной) и по номеру образца буккального эпителия, присвоенному при проведении исследования (рис. 3).

Рис. 3. Поиск испытуемого (интерфейс пользователя)

Если поле с фамилией оставить пустым и произвести поиск по фамилии, то результатом поиска будет список всех испытуемых, проходивших обследование и, соответственно, занесенных в базу данных (рис. 4). При поиске по дате рождения пользователь может запросить точную дату или ее часть, например год или месяц рождения, в ответ будет выдан список испытуемых с указанной датой. Поиск по номеру буккального эпителия выдаст результат с конкретным испытуемым, имеющим заданный номер буккального эпителия.



Рис. 4. Результат поиска испытуемого (интерфейс пользователя)

В случае отсутствия испытуемого в результате поиска его можно добавить в базу данных. В таблице «Объекты» заносится ФИО обследуемого, дата рождения и пол (рис. 5). При добавлении объекта в базу данных ему автоматически присваивается идентификационный номер, который используется для закрепления за объектом исследований в дальнейшем.

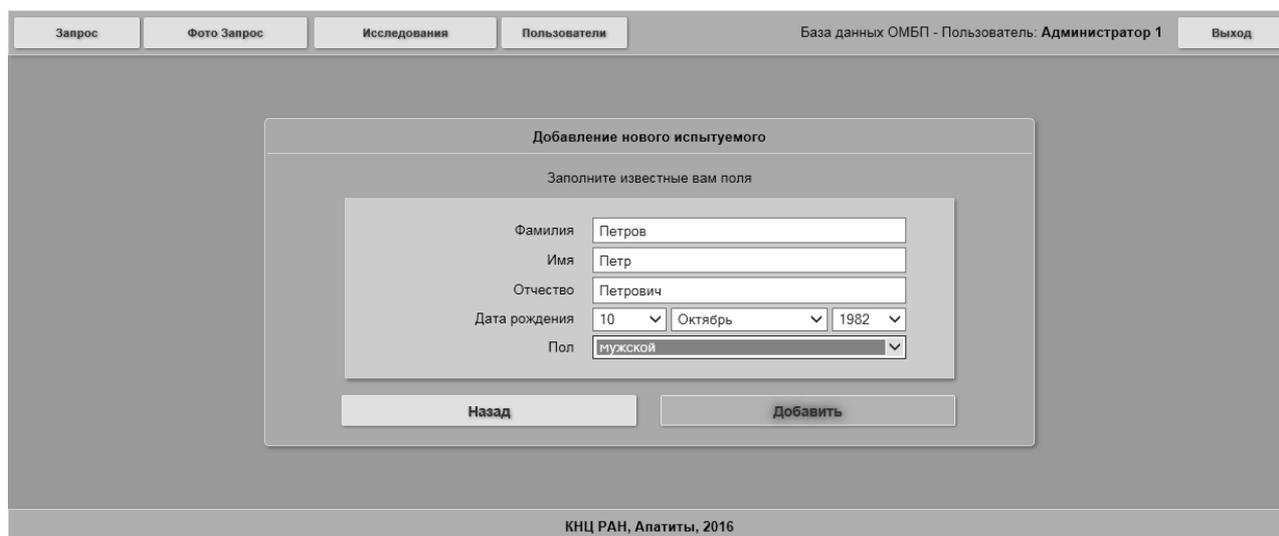


Рис. 5. Добавление нового испытуемого (интерфейс пользователя)

После добавления объекта в БД необходимо добавить информацию о каждом проведенном исследовании. Таблица «Исследование» содержит сведения о дате проведения исследования, принадлежности определенного объекта к этому исследованию, а также идентификационные номера результатов анализов из таблиц «Опросник», «Буккальный эпителий», «Лейкоформула», «Лимфоциты» и «Иммунология», которые принадлежат данному исследованию. Пользователю предлагается ввести лишь дату проведения исследования (рис. 6), а все остальные значения добавятся через систему отношений по мере заполнения таблиц с результатами анализов.

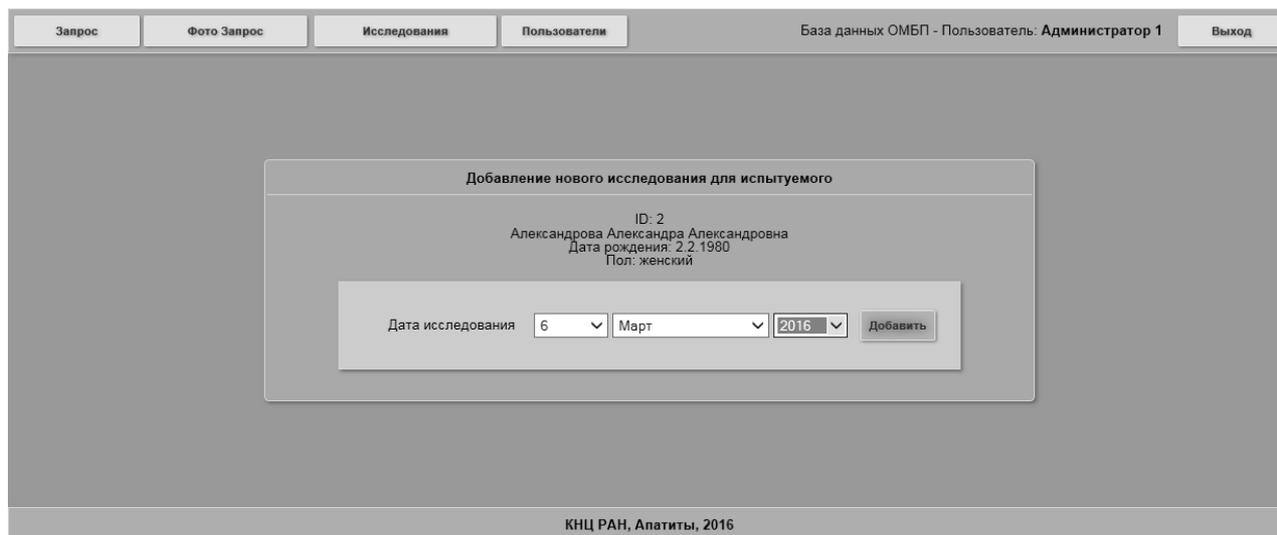


Рис. 6. Добавление нового исследования (интерфейс пользователя)

После добавления исследования у пользователя появляется возможность вносить информацию о результатах анализов и опросного листа (рис. 7). Ранее введенную информацию можно изменить, если обнаружена ошибка или какое-либо несоответствие в данных.

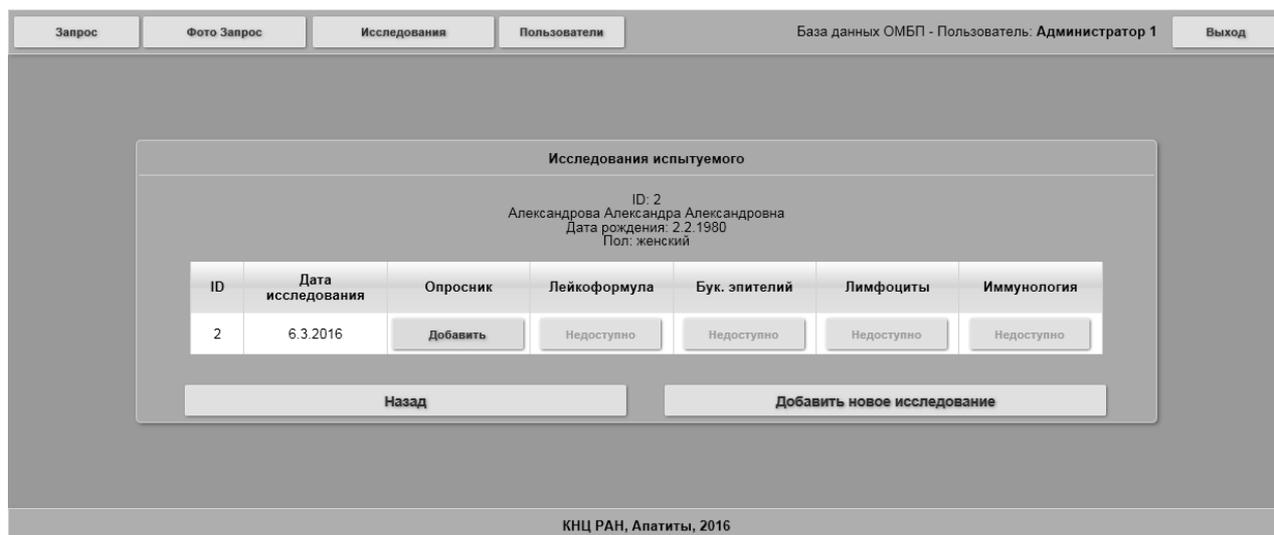


Рис. 7. Список исследований испытуемого (интерфейс пользователя)

Таблица «Опросник» содержит следующую информацию об обследуемом: город проживания, место работы, занимаемая должность, стаж работы, вредные привычки (курение, алкоголь), информация о перенесенных за последние две недели простудных заболеваниях, о приеме антибиотиков или витаминов за тот же период времени, а также о прохождении рентгено- и флюорографического исследований в течение последнего полугодия. В таблицу «Опросник» вносятся и результаты тестов на стресс и тревожность. Все эти данные пользователь должен ввести самостоятельно (рис. 8), при этом необходимо обратить особое внимание на номер образца буккального эпителия – основного идентификатора исследования для сотрудника, проводящего анализы. При добавлении опросника в базу данных ему автоматически присваивается идентификационный номер, который закрепляется за конкретным исследованием. Без заполнения опросника невозможно внесение данных в остальные таблицы.

Запрос	Фото Запрос	Исследования	Пользователи	База данных ОМБП - Пользователь: Администратор 1	Выход
--------	-------------	--------------	--------------	--	-------

**Добавление нового опросника**

ID: 2  
 Александра Александра Александровна  
 Дата рождения: 2.2.1980  
 Пол: женский  
 Дата исследования: 6.3.2016  
 № исследования: 2

№ бук. эпителия	<input type="text" value="2"/>
Город	<input type="text" value="Апатиты"/>
Место работы	<input type="text" value="КНЦ"/>
Должность	<input type="text" value="МНС"/>
Стаж работы	<input type="text" value="7"/>
Курение	<input type="text" value="Не курит"/>
Алкоголь	<input type="text" value="Редко"/>
Простуда (2 нед.)	<input type="text" value="Нет"/>
Антибиотики (2 нед.)	<input type="text" value="Нет"/>
Витамины (2 нед.)	<input type="text" value="Нет"/>
Рентген (6 мес.)	<input type="text" value="Да"/>
Стресс год	<input type="text"/>
Стресс текущий	<input type="text"/>
Тест 1	<input type="text"/>
Тест 2	<input type="text"/>
Тест 3	<input type="text"/>

КНЦ РАН, Апатиты, 2016

Рис. 8. Добавление нового опросника (интерфейс пользователя)

Таблица «Буккальный эпителий» содержит результаты анализа препаратов буккального эпителия, где определяются клетки с нормальным ядром, кариолизисом, кариопикнозом, кариорексисом, конденсацией хроматина, вакуолизацией ядра, фрагментацией ядра, гиперхроматозом, краевым гиперхроматозом, атипичным ядром, микроядром, двумя ядрами, тремя ядрами, множеством ядер, ядерной почкой, насечкой на ядре, перетяжкой ядра, протрузией ядра, круговой насечкой ядра, проторзией ядра по типу «разбитое яйцо», клетки с перинуклеарной вакуолью и вакуолизацией цитоплазмы, а также количество инфицированных клеток. Все данные вводятся пользователем вручную.

Информация, получаемая при анализе препаратов лимфоцитов периферической крови человека, заносится в таблицу «Лимфоциты». Определяются следующие виды клеток и их патологий: 2-ядерный лимфоцит, 2-ядерный лимфоцит с микроядром, 1-ядерный лимфоцит с микроядром, 3-ядерный лимфоцит с микроядром, 4-ядерный лимфоцит с микроядром, 3-ядерный лимфоцит, 4-ядерный лимфоцит, 2-ядерный лимфоцит с протрузией на одном из ядер, 2-ядерный лимфоцит с почкой на одном из ядер, 2-ядерный лимфоцит с насечкой на одном из ядер, 1-ядерный лимфоцит, неравномерное деление в 2-ядерном лимфоците по времени, неравномерное деление в 2-ядерном лимфоците по объему и иммунобласт. Также все данные вводятся пользователем вручную.

При анализе препаратов буккального эпителия и лимфоцитов периферической крови человека часто выполняются микрофотографии клеток с какими-либо особенностями или патологиями. Эти микрофотографии необходимы для иллюстрации научных публикаций, стендовых докладов и мультимедийных презентаций или для консультаций, а также для дополнительного анализа в том случае, если тип патологии вызывает сомнение. Поэтому, помимо ввода данных в таблицы «Буккальный эпителий» и «Лимфоциты», реализована возможность прикрепления микрофотографий, на которых отображены выявленные

цитогенетические нарушения. Форма добавления нового образца буккального эпителия с возможностью прикрепления микрофотографий клеток с определенными особенностями или патологиями приведена на рис. 9.

Изменение буккального эпителия			
ID испытуемого: 2 Александрова Александра Александровна Дата рождения: 2.2.1980 Пол: женский Дата исследования: 6.3.2016 ID исследования: 2 № Бук. эпителия: 2			
Нормальное ядро	<input type="text" value="373"/>	Фото: 2	<input type="button" value="Обзор..."/>
Кариолизис	<input type="text" value="414"/>	Фото: 1	<input type="button" value="Обзор..."/>
Кариопикноз	<input type="text" value="3"/>	Фото: 0	<input type="button" value="Обзор..."/>
Кариорексис	<input type="text" value="51"/>	Фото: 0	<input type="button" value="Обзор..."/>
Конденсация хроматина	<input type="text" value="0"/>	Фото: 0	<input type="button" value="Обзор..."/>
Вакуолизация ядра	<input type="text" value="0"/>	Фото: 0	<input type="button" value="Обзор..."/>
Фрагментация ядра	<input type="text" value="0"/>	Фото: 1	<input type="button" value="Обзор..."/>
Гиперхроматоз	<input type="text" value="0"/>	Фото: 0	<input type="button" value="Обзор..."/>
Краевой гиперхроматоз	<input type="text" value="0"/>	Фото: 0	<input type="button" value="Обзор..."/>

Рис. 9. Изменение данных по образцу буккального эпителия с возможностью прикрепления микрофотографий (интерфейс пользователя)

После добавления микрофотографий имеется возможность их просмотра во всплывающем окне (рис. 10).

Рис. 10. Просмотр микрофотографий во всплывающем окне (интерфейс пользователя)

При подсчете лейкоцитарной формулы крови учитываются палочко- и сегментоядерные, эозино- и базофилы, моно- и лимфоциты. Полученные данные заносятся в таблицу «Лейкоформула».

Для контроля корректности ввода данных и чтобы исключить ошибки ввода в таблицы «Буккальный эпителий», «Лимфоциты» и «Лейкоформула», автоматически подсчитывается сумма введенных клеток (рис. 11).

База данных ОМБП - Пользователь: Администратор 1

Выход

Добавление новой лейкоформулы

ID испытуемого: 2  
 Александра Александра Александровна  
 Дата рождения: 2.2.1980  
 Пол: женский  
 Дата исследования: 6.3.2016  
 ID исследования: 2  
 № бук. эпителия: 2

Палочки: 100  
 Сегменты: 90  
 Эозинофилы: 50  
 Моноциты: 70  
 Базофилы: 110  
 Лимфоциты: 80

Сумма: 500

Назад      Добавить

КНЦ РАН, Апатиты, 2016

Рис. 11. Добавление новой лейкоформулы (интерфейс пользователя)

В таблицу «Иммунология» заносится информация по результатам иммунологического анализа крови, позволяющего судить об иммунном статусе данного испытуемого. При добавлении результатов в базу данных запись также автоматически получает идентификационный номер, закрепляемый за конкретным исследованием.

### Формирование запроса в базе данных и вывод данных

**Формирование запроса и вывод числовых и текстовых данных.** Для формирования запроса по ранее введенной информации существует специальная форма, вызываемая нажатием кнопки «Запрос» (рис. 12). Для удобства использования запрос разделен на пять разделов, каждый из которых соответствует основным таблицам базы данных. В запросе представлено более ста различных параметров, и в развернутом виде форма запроса занимает очень большое пространство. Поэтому для экономии места на экране разделы представлены в свернутом виде. Если есть необходимость выбрать какой-либо параметр из этого раздела, достаточно нажать на название раздела, и он раскроется. Выборка осуществляется даже при отсутствии выбранных параметров. В таком случае результатом запроса будет таблица с указанием порядкового номера, номера буккального эпителия и фамилии испытуемого.

При формировании запроса по ряду параметров осуществляется предварительная математическая обработка результатов согласно международным протоколам и общепринятым правилам представления цитогенетических данных. Так, по данным микроядерного теста на лимфоцитах периферической крови человека производится нормирование показателей на 1 тыс. клеток и данные выводятся в промилле [33–36]. По данным микроядерного теста на буккальном эпителии человека производится нормирование патологий ядра клеток на 1 тыс. дифференцированных клеток буккального эпителия и данные выводятся в промилле, а параметры, характеризующие различные этапы клеточной гибели, выводятся в процентах относительно общего числа подсчитанных клеток [37]. По данным лейкоцитарной формулы определяется процентное соотношение всех элементов [38] и производится расчет энтропии лейкоцитарной формулы крови [39–40].

Массив данных, полученных в ходе формирования запроса, можно экспортировать в файл формата Microsoft Excel (рис. 13).

Рис. 12. Частичная форма запроса (интерфейс пользователя)

№	Бук.Эпит.	Фамилия	Пол	Курение	Алкоголь	Простуда	Город	Место работы	Должность
1	1	Иванов	Мужской	Неизвестно	Редко	Нет	Апатиты	КНЦ	МНС
2	2	Александрова	Женский	Не курит	Редко	Нет	Апатиты	КНЦ	МНС
3	3	Сергеев	Мужской	Курит	Редко	Да	Апатиты	КНЦ	Инженер
4	4	Евгеньева	Женский	Не курит	Не пьет	Нет	Кировск	КНЦ	медсестра

Рис. 13. Результат запроса (интерфейс пользователя)

**Формирование запроса и вывод микрофотографий.** Для формирования запроса по загруженным микрофотографиям существует специальная форма, вызываемая нажатием кнопки «Фото Запрос» (рис. 14). Для удобства использования запрос разделен на три раздела: «Параметры выборки», «Буккальный эпителий» и «Лимфоциты». Как и в случае с запросом данных, разделы на экране представлены в свернутом виде (для экономии места).

Выборку можно осуществлять даже при отсутствии выбранных параметров. В таком случае результат запроса – таблица с указанием порядкового номера, номера буккального эпителия, фамилии испытуемого и всеми загруженными микрофотографиями. Пример результата запроса по микрофотографиям, где были указаны параметры выборки, но не выбран тип клетки или патологии, приведен на рис. 15. Таким образом, данная функция позволяет быстро находить и использовать необходимый иллюстрационный материал.

База данных ОМБП - Пользователь: Администратор 1

Выход

Запрос по фотографиям  
При запросе обрабатываются ТОЛЬКО ЗАПОЛНЕННЫЕ опросники!!

Параметры выборки

- Период измерений
- Возраст
- Пол
- Стаж
- Курение
- Город
- Место работы

Буккальный эпителий

Лимфоциты

Назад      Запрос

КНЦ РАН, Апатиты, 2016

Рис. 14. Форма запроса микрофотографий (интерфейс пользователя)

База данных ОМБП - Пользователь: Администратор 1

Выход

Результат запроса

№	Дата исследования	Бук.Эпит.	Фамилия	Возраст	Пол	Стаж	Курение	Город	Место работы	Все фотографии без выборки
1	6.3.2016	2	Александрова	36	Женский	7	Не курит	Апатиты	КНЦ	
2	6.3.2016	2	Александрова	36	Женский	7	Не курит	Апатиты	КНЦ	

Рис. 15. Результат запроса микрофотографий (интерфейс пользователя)

### Апробация базы данных

Разработанная база данных установлена на сервере внутренней сети КНЦ РАН с доступом для сотрудников НИЦ МБП. На данный момент в нее внесены данные 480 обследуемых людей, более 500 опросных листов, 236 результатов микроядерного теста на буккальном эпителии, 126 результатов микроядерного теста на лимфоцитах периферической крови человека, 385 результатов анализа лейкоцитарной формулы крови, 39 результатов иммунограммы, 144 фотографии клеток буккального эпителия и 100 фотографий лимфоцитов периферической крови человека.

### Заключение

Таким образом, разработана и апробирована реляционная база данных по цитогенетическим показателям для оперативного и удобного обмена информацией между специалистами КНЦ РАН. База данных поддерживает многопользовательский и сетевой режимы, в ней осуществлено разделение привилегий и прав пользователей, проводится контроль действий пользователей, она обладает удобным для пользователя интерфейсом ввода и вывода данных,

форма запроса является гибкой и универсальной и при этом удовлетворяет требованиям каждого конкретного пользователя, имеется возможность начальной математической обработки (нормирования) при формировании результатов запроса, совместимость с операционной системой Windows, а также возможность экспорта запрошенных данных в таблицу Excel. База данных разработана с привлечением минимума стороннего программного обеспечения и полностью удовлетворяет всем предъявленным к ней требованиям.

В разработанную базу данных планируется добавить ряд аналитических функций, таких как определение соответствия распределения выбранного параметра нормальному, вывод основных статистических характеристик (среднее, ошибка, мода и т. д.). Они позволят исследователям экономить время на статистической обработке результатов в сторонних программах.

В качестве долгосрочной перспективы развития базы данных авторы видят разработку алгоритма комплексного анализа результатов микроядерного теста, показателей иммунного и психологического статуса испытуемых с целью выявления лиц с повышенным онкологическим риском.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ингель Ф. И. Микроядерный тест на лимфоцитах периферической крови человека // Полиорганный микроядерный тест в эколого-гигиенических исследованиях. М.: Гениус, 2007. С. 168–219.
2. Garaj-Vrhovac V., Zeljezic D. Cytogenetic monitoring of croatian population occupationally exposed to a complex mixture of pesticides // *Toxicology*. 2001. Vol. 165, No 2–3. P. 153–162.
3. Горовая А. И., Климкина И. И. Использование цитогенетического тестирования для оценки экологической ситуации и эффективности оздоровления детей и взрослых природными адаптогенами // *Цитология и генетика*. 2002. Т. 36, No 5. С. 21–25.
4. Zeljezic D., Garaj-Vrhovac V. Chromosomal aberrations, micronuclei and nuclear buds induced in human lymphocytes by 2,4-dichlorophenoxyacetic acid pesticide formulation // *Toxicology*. 2004. Vol. 200. P. 39–47.
5. Rosin M. P. The use of the micronucleus test on exfoliated cells to identify anticlastogenic action in humans: a biological marker for the efficacy of chemopreventive agents // *Mutat. res*. 1992. Vol. 287. P. 265–276.
6. Генотоксические и цитотоксические эффекты в буккальных эпителиоцитах детей, проживающих в экологически различающихся районах Кузбасса / А. В. Мейер [и др.] // *Цитология*. 2010. Т. 52, № 4. С. 305–309.
7. Данилов Р. К., Клишов А. А., Боровая Т. Г. Гистология человека в мультимедиа: учебник. СПб.: ЭЛБИ-СПб., 2004. 362 с.
8. Ghose U. R., Parida B. V. Cytological study of exfoliated buccal mucosa cells of tribes in Orissa State (India) with high risk for oral cancer // *Indian J. Cancer*. 1995. Vol. 32, No. 3. P. 95–99.
9. Генотоксический эффект формальдегида в соматических клетках *in vivo* / Л. В. Китаева [и др.] // *Генетика*. 1996. Т. 32, № 9. С. 1287–1290.
10. Цитогенетические нарушения в соматических клетках у детей, проживающих в районах с различной интенсивностью загрязнения окружающей среды / В. Г. Маймулов [и др.] // *Цитология*. 1998. № 40(7). С. 686–689.
11. Микроядерный тест на буккальных эпителиоцитах человека / В. В. Юрченко [и др.] // Полиорганный микроядерный тест в эколого-гигиенических исследованиях. М.: Гениус, 2007. С. 220–267.
12. Буторина А. К., Калаев В. Н., Карлова С. С. Влияние пола и возраста детей на частоту встречаемости микроядер в буккальном эпителии ротовой полости // *Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология*. 2000. № 2. С. 143–145.
13. Sex chromosome loss, micronuclei, sister chromatid exchange and aging; a study including 16 centenarians / N. Bukvic [et al.] // *Mutat. Res*. 2001. Vol. 498, No. 12. P. 159–167.
14. Соболев М. В., Афанасьева Е. С., Безруков В. Ф. Частота микроядер и уровень тревожности у школьников // *Вестник Украинского товарищества генетиков и селекционеров*. 2008. Т. 6, № 1. С. 131–136.
15. Micronuclei in peripheral blood lymphocytes and buccal epithelial cells of Polish farmers exposed to pesticides / S. Pastor [et al.] // *Mutat. Res*. 2001. Vol. 495, No. 1–2. P. 147–156.
16. Cytogenetic analysis of Greek farmers using the micronucleus assay in peripheral lymphocytes and buccal cells / S. Pastor [et al.] // *Mutagenesis*. 2001. Vol. 16. P. 539–545.
17. Лейтина Б. И., Ингель Ф. И., Кривцова Е. К. Влияние витаминизированных напитков на спонтанный и индуцированный мутагенез *in vivo* и *in vitro*. Модификация противоопухолевой активности // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2003. № 5. С. 90–91.
18. Юрченко В. В. Аномалии ядра эпителиоцитов слизистой оболочки щеки в исследованиях по экологии человека // Тез. 2-го съезда токсикологов России (10–13 ноября 2003, г. Москва). М., 2003. С. 300–301.
19. Агбалян Е. В., Шинкарук Е. В. Характеристика генотоксических и цитотоксических эффектов малых доз кадмия // *Международ. журн. прикл. и фунд. исследований*. 2015. № 6. С. 427–451.
20. Ингель Ф. И. Перспективы использования микроядерного теста на лимфоцитах человека, культивируемых в условиях цитокинетического блока. Ч. 2: Факторы среды и индивидуальные особенности в системе оценки нестабильности генома человека. Дополнительные возможности теста. Методика проведения экспериментов и цитогенетического анализа // *Экологическая генетика*. 2006. № 4. С. 38–53.
21. Генотоксические эффекты в буккальном эпителии горняков, работающих в условиях облучения природными источниками ионизирующего излучения / Д. А. Петрашова [и др.] // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13, № 1(7). С. 1792–1796.
22. Цитогенетические эффекты воздействия природных источников ионизирующего излучения на работников горнорудного производства Мурманской области / Д. А. Петрашова [и др.] // *Вестник Уральской медицинской академической науки*. 2014. Т. 48, № 2. С. 40–42.
23. Биоиндикация генотоксических эффектов природных источников ионизирующей радиации на основе микроядерного теста / Д. А. Петрашова [и др.] // Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование: тр. Четвертой междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых

(Москва, 16–18 апреля 2015 г.). М.: Буки-Веди, 2015. С. 45–47. **24.** *Завадская Т. С., Белишева Н. К.* Динамика функционального состояния периферической крови в зависимости от вариаций гелиогеофизических агентов // Человек и окружающая среда: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Уфа, 18 сентября 2013 г.). Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. С. 53–55. **25.** Психофизиологическое состояние подростков на Севере в условиях минимума солнечной активности / *Д. А. Петрашова [и др.]* // Адаптация человека к экологическим и социальным условиям Севера. Сыктывкар, 2012. С. 83–89. **26.** *Мартынова А. А., Прянчиников С. В., Белишева Н. К.* Особенности психофизиологического состояния горняков, занятых в подземных разработках руды // Вестник Уральской медицинской академической науки. 2014. Т. 48, № 2. С. 76–78. **27.** *Мартынова А. А., Пожарская В. В., Петрашова Д. А.* Психоэмоциональное состояние подростков на отдыхе в средней полосе // Человек и окружающая среда: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Уфа, 18 сентября 2013 г.). Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. С. 55–57. **28.** Функциональное состояние организма различных возрастных групп населения села Краснощелья как индикатор здоровья в комплексной оценке качества жизни / *Н. К. Белишева [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2 (17). С. 19–33. **29.** *Nersesyan A. K., Ilin A. I.* The micronucleus assay in exfoliated human cells: A mini-review of papers from the CIS // *Cytology and genetics*. 2007. Vol. 41, No. 2. P. 56–66. **30.** *Кириллов В. В.* Основы проектирования реляционных баз данных: учеб. пособие [IT-портал CITForum.ru] / *сост. В. В. Кириллов*; Санкт-Петербург. гос. ин-т точной механики и оптики. СПб., 2005. URL: <http://citforum.ru/database/dbguide/> (дата обращения 10.08.2015). **31.** *Хокинс С.* Администрирование Web-сервера Apache и руководство по электронной коммерции. М.: Вильямс. 2001. 336 с. **32.** *Бенкен Е. С.* PHP, MySQL, XML: программирование для Интернета. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 304 с. **33.** *Fenech M., Morley A.* Solutions to the kinetic problem in the micronucleus assay // *Cyto-bios*. 1985. Vol. 43, No. 172–173. P. 233–246. **34.** *Kocisova J., Sram R.J.* The micronucleus test in human peripheral lymphocytes // *Cesk Farm*. 1990. Vol. 39, № 3. Pp.131–133. **35.** *Pascoe S. A., Stemp G.* A modified method and staining technique for the in vitro micro-nucleus test in human lymphocytes using cytochalasin B // *Mutat. Res*. 1990. Vol. 234, No. 3–4. P. 253–255. **36.** Human Micro Nucleus project. Intra- and inter-laboratory variation in the scoring of micronuclei and nucleoplasmic bridges in binucleated human lymphocytes. Results of an international slide-scoring exercise by the HUMN project / *M. Fenech [et al.]* // *Mutat. Res*. 2003. Vol. 534, No. 1–2. P. 45–64. **37.** Buccal micronucleus cytome assay / *Ph. Thomas [et al.]* // *Nature protocol*. 2009. Vol. 4, No. 6. P. 825–837. **38.** *Кишкун А. А.* Руководство по лабораторным методам диагностики. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 760 с. **39.** Влияние темпа старения на вегетативный статус и энтропию лейкоцитарной формулы крови у пожилых больных с артериальной гипертонией / *Т. В. Осипова [и др.]* // Клиническая геронтология. 2005. № 2. С. 12–16. **40.** Пат. 2466402 Российская Федерация. Способ оценки энтропии лейкоцитарной формулы крови человека / *Горелов А. В., Кириличева Г. Б., Плоскирева А. А.* № 2011116487/15; заявл. 27.04.11; опубли. 10.11.12, Бюл. № 31.

### Сведения об авторах

*Петрашова Дина Александровна* – кандидат биологических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского центра медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН  
E-mail: [petrashova@admksk.apatity.ru](mailto:petrashova@admksk.apatity.ru)

*Бурцев Антон Владимирович* – младший научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН  
E-mail: [a.burtsev@tehtonord.ru](mailto:a.burtsev@tehtonord.ru)

### Author Affiliation

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

E-mail: [petrashova@admksk.apatity.ru](mailto:petrashova@admksk.apatity.ru)

*Anton V. Burtsev* – Junior Researcher of the Center of Physical and Technical Problems of the Northern Energetics of KSC of the RAS

E-mail: [a.burtsev@tehtonord.ru](mailto:a.burtsev@tehtonord.ru)

### Библиографическое описание статьи

*Петрашова Д. А.* Разработка базы данных по микроядерному тесту на клетках человека / *Д. А. Петрашова, А. В. Бурцев* // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 2 (25). – С. 124–136.

### Reference

*Petrashova D. A.* Development of a Database for the Micronucleus Test upon Human Cells. / *D. A. Petrashova, A. V. Burtsev* // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. – 2016. – Vol. 2 (25). – P. 124–136.

**VIII Международная научно-практическая конференция «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2016»**

*Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН, 14–16 апреля 2016 г.*

Конференция проведена при финансовой поддержке гранта РГНФ (проект №16-02-14025). Как видно из самого названия, это традиционное для научного учреждения мероприятие, которое проходит уже в 8-й раз, начиная с 2001 г.

Посвящена конференция 80-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН, доктора экономических наук, профессора, депутата Государственной думы РФ Геннадия Павловича Лузина, трагически погибшего в 2000 г., и 30-летию Института экономических проблем КНЦ РАН, организатором и первым директором которого он являлся.

Лузинские чтения давно уже обрели международное признание, как и «экономика северного измерения», право на жизнь которой дал в свое время именно Геннадий Павлович. Участниками конференции стали более 230 человек, в число которых вошли представители правительства Мурманской обл., Общественной палаты Российской Федерации, ученые России, Норвегии, Финляндии, Швеции, представители образовательных учреждений, бизнеса, аспиранты и студенты.

Прошедшая конференция – наглядный пример растущего внимания российских и зарубежных научных и деловых кругов к проблемам Арктического региона. Происходящие здесь динамичные изменения, новые угрозы и вызовы требуют солидарного подхода и учета интересов всех заинтересованных сторон. Следует отметить, что конференция дала возможность экспертному сообществу на основе всестороннего обсуждения, обобщения национального и международного опыта арктических стран внести свой вклад в формирование научного и практического видения будущего Российской Арктики.

Семь тематических секций были организованы по следующим направлениям:

- глобализация и экономические процессы в Арктике;
- рациональное природопользование, охрана окружающей среды и особо охраняемые территории в Арктике: управление, экономика, технологии, изменение климата;
- социальная политика в Арктике: национальный, региональный, муниципальный, корпоративный аспекты;
- инновационное развитие экономики Севера и Арктики;
- регионы и муниципалитеты Севера и Арктики России: тенденции, стратегии, перспективы социально-экономического развития;
- тенденции государственной и корпоративной финансовой политики в Арктике в новых геоэкономических условиях;
- будущее Севера и Арктики России глазами молодых исследователей: «Школа молодых ученых».

По результатам конференция принята резолюция, в которой участники конференции приглашают Правительство РФ и Федеральное собрание РФ, Российскую академию наук, администрации северных регионов, объединения предпринимателей, отраслевые союзы и ассоциации, экспертное сообщество продолжить диалог по ключевым проблемам развития Севера и Арктики России.

**XI Всероссийская конференция**

**«Методологические проблемы управления макросистемами»**

*Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, 28 марта – 1 апреля 2016 г.*

Организатор конференции – Исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (в лице Института системного анализа РАН (ИСА РАН), г. Москва). Конференция проводится с 1985 г., с 2004 г. – в г. Апатиты на базе Института информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, один раз в два года.

Тематика конференции включает в себя общие вопросы развития методологии системного подхода и системного анализа. Большое внимание уделяется как теоретическим вопросам макросистем, так и практическим проблемам разработки информационных технологий управления

макросистемами. Одно из направлений работы конференции – исследования социально-экономических и технологических макросистем.

В работе конференции приняли участие более 40 чел., в т. ч. ученые из ИСА РАН, Института проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова (ИПУ РАН), Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН), Института проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН). В работе школы-семинара активно участвовали молодые ученые и аспиранты.

Всего представлено 27 докладов по четырем секциям:

- теоретические вопросы управления макросистемами;
- информационные технологии управления макросистемами;
- модельно-информационные аспекты исследований региональных и технологических проблем;
- основы методологии междисциплинарных системных исследований.

К началу конференции изданы материалы докладов. По рекомендации Программного комитета ряд представленных на конференции работ будет опубликован в сборнике «Труды ИСА РАН», входящем в перечень ВАК.

В 2016 г. традиционный график конференции был расширен молодежной секцией «Информационные технологии и математическое моделирование», которая ежегодно проводится в рамках XIX Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в КФ ПетрГУ. Предваряя выступления студентов и аспирантов, перед аудиторий с научно-популярными докладами выступили ведущие ученые ИСА РАН: чл.-корр. РАН, проф. Ю. С. Попков («Основы макросистемного подхода») и к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Ю. А. Ростопшин («Основы методологии общего системного подхода»).

#### **Конференция «Полярные процессы в атмосферах Земли и планет»**

*Полярный геофизический институт КНЦ РАН, 11 апреля 2016 г.*

В конференции приняли участие 9 человек (4 – из Института космических исследований РАН и 5 – из Полярного геофизического института).

Конференция посвящена исследованиям физических процессов в полярных областях атмосфер Земли, Марса, Венеры и спутника Сатурна Титана. Обсуждались экспериментальные методы дистанционного изучения физических процессов атмосфер и ионосфер Земли, а также планет Солнечной системы и их спутников, рассматривались последние данные наблюдений о динамических процессах в атмосферах и ионосферах Земли, планет Солнечной системы и их спутников, результаты и методы численного моделирования динамики атмосфер ионосфер. Кроме этого, обсуждались химические и фотохимические процессы в атмосферах и ионосферах Земли и планет, а также последние достижения экспериментальных и теоретических исследований этих процессов.

Конференция организована совместно с Институтом космических исследований РАН и МФТИ.

#### **X Всероссийская молодежная научно-практическая конференция**

**«Проблемы недропользования»**

*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург,*

*Горный институт КНЦ РАН, 28–30 марта 2016 г.*

Конференция проведена Институтом горного дела УрО РАН совместно с Горным институтом КНЦ РАН. Между городами Апатиты и Екатеринбург был организован телемост.

В конференции участвовали молодые ученые из Апатитов, Екатеринбурга, Ковдора («Ковдорский ГОК»), Самары, Санкт-Петербурга, Перми, Хабаровска.

Заслушаны 43 доклада по секциям: геотехнология, геоэкология, геоэкономика; геомеханика, разрушение горных пород; 6 лучших докладов отмечены дипломами, 2 из них – доклады сотрудников Горного института КНЦ РАН: О. Г. Журавлевой «Кластеризация сейсмических событий в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива» и И. А. Аленичева «Обоснование параметров взрывной отбойки обводненных апатит-нефелиновых руд».

Новый формат конференции вызвал большой интерес со стороны как представителей академических и учебных институтов, так и специалистов горнодобывающих предприятий.

**Вебинар на тему «Садовая и экологическая терапия: потенциал для лиц с ограниченными возможностями здоровья»**

*Полярно-альпийский ботанический сад-институт, 18 февраля 2016 г.*

Вебинар проводили: Оксана Борисовна Гонтарь – кандидат биологических наук, доцент, заместитель директора по научной работе ПАБСИ КНЦ РАН, зав. лабораторией экотерапии и образовательных программ; Ирина Владимировна Калашникова – младший научный сотрудник лаборатории экотерапии и образовательных программ; Екатерина Андреевна Марус – лаборант-исследователь лаборатории экотерапии и образовательных программ, магистрант.

Программа вебинара включала обсуждение следующих вопросов:

- понятия и классификация садовой и экологической терапии;
- садовая и экологическая терапия в реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья (опыт ПАБСИ);
- оценка эффективности реабилитационных программ (методы функциональной диагностики).

**Васильев А. М. Концептуальные направления инновационного развития рыбохозяйственного комплекса Европейского Севера России: монография / А. М. Васильев, Ю. Ф. Куранов.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 132 с.

Исследованы ключевые параметры функционирования рыбной отрасли Европейского Севера России: природные факторы промысловой деятельности, институциональные и экономические механизмы регулирования, влияние биологических, конъюнктурных и антропогенных факторов на финансовые результаты, тарифная политика и другие внешнеэкономические факторы функционирования рыбохозяйственного комплекса в условиях ВТО.

Рассмотрены факторы и условия участия рыбной отрасли в обеспечении продовольственной безопасности страны. Показаны количественные и структурные изменения в составе промыслового флота, основные направления его модернизации. Предложены дополнения к историческому методу наделения пользователей долями квот биоресурсов в целях повышения эффективности использования водных биологических ресурсов.

Разработаны программные предложения по интеграционному развитию береговой переработки и промысловой деятельности в Северном бассейне. Выполнен анализ внешнеэкономической деятельности, и обоснованы меры для улучшения управления этой сферой в целях повышения уровня народнохозяйственной и коммерческой эффективности экспорта рыбной продукции. Рассмотрены теоретические основы интегрированного управления морехозяйственной деятельностью на морском шельфе арктического и атлантического направлений.

Предназначается работникам органов власти и управления регионального и федерального уровней, руководителям предприятий и организаций, научным работникам, преподавателям, аспирантам.

**Казаков Л. А. Технологии опытных фитомелиоративных работ по облесению Кузоменских песков / Л. А. Казаков, Г. В. Вишняков, С. Н. Панов.** Апатиты: КНЦ РАН, 2016. 30 с.

Представлены практические рекомендации по проведению новых опытных работ на Кузоменских песках, разработанные в соответствии с накопленным опытом по облесению. Они содержат как ранее испытанные эффективные методы, так и вновь предлагаемые способы создания лесных культур. Выполнение данной программы позволит выбрать наиболее результативные приемы при осуществлении работ в промышленных масштабах.

**Локшин Э. П. Разработка технологий извлечения редкоземельных элементов при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения / Э. П. Локшин, О. А. Тареева.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 268 с.

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 радиоактивных отходов, требующих специальных методов обращения.

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 ее 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, будет полезно студентам вузов, работающим и обучающимся по соответствующим направлениям.

**Серова Н. А. Инвестиционный климат северных территорий: региональный и муниципальный уровни: монография / Н. А. Серова, Е. Е. Емельянова; под науч. ред. д. э. н. Т. П. Скуфьиной.** Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 164 с.

В монографии рассматриваются теоретико-методологические вопросы формирования инвестиционного климата как основы социально-экономического развития России. Авторами систематизируется практика реализации политики по совершенствованию инвестиционного климата. Особое внимание уделено анализу современного состояния инвестиционной сферы и особенностей инвестиционной политики регионов и муниципальных образований Севера РФ, для которых характерны экстремальные природно-климатические условия жизнедеятельности и ярко выраженная специфика социально-экономического развития.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в области экономики и управления, научных работников, аспирантов, студентов и преподавателей высших и средних специальных учебных заведений.



### ГЕРАСИМОВА Лидия Георгиевна

д. т. н., главный научный сотрудник, с 2009 г. возглавляет сектор функциональных материалов из природного титаносодержащего сырья и техногенных отходов Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, где работает с 1969 г.

После окончания в 1969 г. Новомосковского филиала химико-технологического института им. Д. И. Менделеева поступила на работу в ИХТРЭМС. В 1980 г. защитила кандидатскую диссертацию, в 2005 г. – докторскую. В 2004 г. решением ВАК РФ ей присвоено ученое звание доцента.

С 2009 г. Лидия Георгиевна возглавляет сектор функциональных материалов из природного титаносодержащего сырья и техногенных отходов.

Л. Г. Герасимова – известный ученый, специалист в области химии и технологии нетрадиционного титанового и титано-редкометалльного сырья, а также техногенных отходов (сложного минерального и химического состава) химических и горнопромышленных предприятий региона и страны. Ее работы связаны с разработкой и обоснованием процессов извлечения титана из сырья и конверсией его в полезные продукты, в том числе: нетоксичные дубители кож, пигменты, наполнители различного назначения, сорбенты и другие титаносодержащие материалы с широким спектром функциональных свойств. Ее исследования получили заслуженное признание отечественной и зарубежной научной общественности, а также на предприятиях.

Полученные результаты служат научной основой для разработки принципиально новых технологий и усовершенствования существующих промышленных процессов, связанных с пигментной, лакокрасочной, кожевенной, авиакосмической и другими отраслями промышленности, техникой, атомной и водородной энергетикой, порошковой металлургией. Ряд разработанных Лидией Георгиевной технологических процессов нашли практическое применение на предприятиях страны.

Она представляла итоги своей работы на российских и международных форумах, конференциях, выставках. Неоднократно награждалась дипломами лауреата и победителя международных конкурсов, работала по международным программам, входила в состав оргкомитета российских и международных конференций.

Л. Г. Герасимова активно занимается подготовкой кадров высшей квалификации для Мурманской обл. Профессор Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета, где читает курс «Химическая технология», руководит работой выпускных квалификационных работ студентов. Член ученого и диссертационного советов



*Юбилеи*



Юбилеи

ИХТРЕМС им. И. В. Тананаева КНЦ РАН. Осуществляет научное руководство аспирантами, итогом которого стала защита трех кандидатских и одной докторской диссертаций. Автор более 500 научных работ, в том числе 6 монографий, свыше 200 статей, более 80 авторских свидетельств и патентов. Результаты ее научных работ включались в число важнейших достижений Российской академии наук.

Удостоена почетного звания «Заслуженный изобретатель Российской Федерации».

Поздравляем Лидию Георгиевну с юбилеем и желаем здоровья, счастья, радости и новых творческих свершений на благо российской науки.

80



#### **ОРЛОВ Вениамин Моисеевич**

д. т. н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией. В Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН работает с 1958 г., после окончания Ленинградского горного института.

В. М. Орлов – признанный специалист в области металлургии редких металлов, технологии и свойств материалов, используемых в анодах танталовых и ниобиевых объемно-пористых конденсаторов.

Им выполнены исследования по получению конструкционных титановых сплавов путем алюмотермического восстановления перовскитового концентрата с последующим электрорафинированием чернового сплава, разработан эффективный процесс получения тугоплавких редких металлов высокой чистоты из электролитических порошков тантала и ниобия методами вакуумной металлургии, проведен комплекс работ по определению влияния примесей в тантале и ниобии на свойства анодных оксидных пленок и предложен механизм влияния примесей в металле на свойства анодного оксида, что значительно для применения этих металлов в электронной промышленности, исследован механизм разрушения слитков тантала, ниобия и ванадия при взаимодействии с водородом и предложен режим гидрирования, значительно интенсифицирующий этот процесс.

Под его руководством разработан способ получения порошков методом гидрирования-дегидрирования с использованием водорода в замкнутом цикле, реализованный в промышленном масштабе на двух предприятиях, выполнены физико-химические исследования процессов металлотермического восстановления соединений тантала и ниобия, твердофазного рафинирования порошков этих металлов и спекания прессовок из порошков с большой величиной удельной поверхности. Это позволило создать научные основы технологии конденсаторных порошков

тантала и ниобия для анодов объемно-пористых конденсаторов, что определило высокую практическую эффективность разработок. Способ высокоскоростного спекания анодов используется в производстве цельнотанталовых электролитических конденсаторов. Технология танталовых конденсаторных порошков: агломерированных осколочных с зарядом до 8 тыс. мкКл/г, а также высокоемких натриетермических с зарядом до 30 тыс. мкКл/г, не имеющих аналогов в РФ и СНГ, освоена в опытном производстве ИХТРЭМС. Опытно-промышленные партии таких порошков используют для разработки новых и изготовления серийных изделий все предприятия РФ, выпускающие танталовые конденсаторы. ПО «Маяк» принята к внедрению технология пиррофорных натриетермических циркониевых порошков. В последние годы В. М. Орлов активно работает над созданием перспективных функциональных материалов на основе мезопористых магнетермических порошков металлов V–VI групп.

В. М. Орлов – автор 365 научных работ, 25 авторских свидетельств и патентов, член ученого и диссертационного советов ИХРЭМС, экспертного совета РФФИ по конкурсу «Север», Научно-технического совета г. Апатиты, включен в Федеральный реестр экспертов научно-технической сферы Министерства образования и науки Российской Федерации ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ.

На протяжении многих лет Вениамин Моисеевич ведет преподавательскую работу в Кольском филиале Петрозаводского государственного университета, является членом совета Научно-образовательного центра функциональных материалов Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН. Под его руководством подготовлены и защищены три кандидатские диссертации.

За успешную научную работу он неоднократно награждался почетными грамотами АН СССР, Президиума КНЦ РАН и Почетной грамотой РАН, результаты его исследований много раз включались в число важнейших достижений Отделения химии и наук о материалах РАН. В 1985 г. ему присвоено звание «Ветеран труда». За выдающиеся успехи в области металлургии в 2008 г. удостоен почетного звания «Заслуженный металлург РФ».

Поздравляем Вениамина Моисеевича со славным юбилеем, желаем здоровья, счастья, новых творческих свершений на благо российской науки.



*Юбилей*



Юбилей



### ТОЛСТИХИН Игорь Нестерович

д. х. н., главный научный сотрудник, возглавляет группу изотопии благородных газов в лаборатории поисковых исследований Геологического института КНЦ РАН. В Кольском научном центре с 1978 г.

Окончил Ленинградский горный институт в 1959 г. В 1966 г. становится кандидатом наук, а в 1975 г. – доктором химических наук, защитив диссертацию «Изотопы гелия в природе».

Область научных интересов – фундаментальные и прикладные проблемы изотопной геохимии: исследование изотопии благородных газов в породах континентальной земной коры, изучение распространенности благородных газов и родительских элементов в подземных водах и вмещающих их горных породах и минералах с целью определения времени жизни радиоактивных изотопов в подземной геосфере. Руководит темой научно-исследовательских работ «Происхождение и эволюция летучих компонентов в древних горных породах по данным изотопии благородных газов». Автор более 200 научных статей, большинство которых опубликовано в ведущих зарубежных научных журналах,

и 7 книг. Одна из последних его работ – монография в соавторстве с Дж. Д. Крамерсом «Эволюция материи от Большого Взрыва до настоящего времени» (Tolstikhin I. N., Kramers J. D. The evolution of matter: from the Big Bang to the present. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2008. 532 p.). Активно участвует в научно-исследовательских программах зарубежных университетов: Бернского, Кембриджского, Французской академии наук CRPG (Нанси), Института химии Макса Планка (Майнц). Участник и координатор нескольких российско-швейцарских и ИНТАС-проектов, а также грантов РФФИ. Его деятельность получила широкое признание международной научной общественности. За успешную работу в Кембриджском университете он избран почетным членом Клэр-Холл колледжа. В 2000 г. ему присуждено почетное звание Dr. Honoris Causa Philosophiae Бернского университета, в 2001 г. избран почетным членом Международного геохимического общества и Европейской геохимической ассоциации. В 2007 г. издательство Elsevier присудило И. Н. Толстихину почетный диплом за наиболее часто цитируемую работу в области физики Земли и планетарных недр (Physics of the Earth and Planetary Interiors Most Cited Paper 2004 – 2007 Award). В 2013 г. ученому вручена медаль имени нобелевского лауреата Гарольда Юри за работы в области геохимии изотопов.

Поздравляем Игоря Нестеровича со славным юбилеем и желаем здоровья, радости, бодрости и новых творческих свершений на благо российской науки.



### **ГРИШИН Николай Никитович**

д. х. н. заведующий отделом технологии строительных материалов, заведующий сектором огнеупоров. В Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева с 1995 г.

Николай Никитович ведет работы по расширению сырьевой базы Северо-Западного региона России путем вовлечения в переработку руд цветных и черных металлов, кианитов, оливинитов, дунитов, хромитов, руководит темами по разработке научных основ получения строительных и технических материалов из природного и техногенного сырья, а также проектами по программам фундаментальных научных исследований РАН, связанными с рациональным использованием ресурсов для создания новых металлических, керамических, стекло-, полимерных и композиционных материалов. Установил основные параметры системы, определяющие условия теплопроводности и термического разрушения огнеупорных футеровок, исходя из представлений неравновесной термодинамики предложил модель влияния неравновесных процессов, протекающих в огнеупорных материалах, на формирование их структуры и свойств. С его участием разработано экстракционное оборудование для гидromеталлургических производств редких, рассеянных и цветных металлов. Оно опробовано и успешно работает на ОАО «Кольская ГМК». Авторский коллектив разработки отмечен дипломом и бронзовой медалью Всемирного салона инноваций, научных исследований и новых технологий «Иннова/Эврика» 2007 г. в Брюсселе.

Н. Н. Гришин разрабатывает новые эффективные технологические процессы и схемы комплексной переработки кианитовых руд. Исследование металлогенического потенциала кианитовых сланцев Больших Кейв в отношении редких металлов и редкоземельных элементов включено в отчетный доклад Президиума РАН в 2012 г. как научное достижение.

Н. Н. Гришин – автор ряда работ по получению конструкционно-теплоизоляционных материалов на основе вермикулита и использованию их в многослойных футеровках для высокотемпературного оборудования. Им опубликовано 235 научных работ, получено 15 патентов.

Николай Никитович – член ученого и диссертационного советов ИХТРЭМС, в 2003–2007 гг. осуществлял педагогическую деятельность в качестве профессора Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета, входил в состав государственной экзаменационной комиссии.

Успехи в научной и педагогической деятельности отмечены Благодарностью и Почетной грамотой губернатора Мурманской области, дипломами II степени IX Международной выставки «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.) и выставки «ЭКСПО Дом» (Мурманск), золотой медалью Петербургской технической ярмарки (Санкт-



*Юбилей*



Юбилеи

Петербург, 2013), бронзовой медалью международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2013» (Москва, 2013 г.), результаты исследований неоднократно включались в число важнейших достижений Отделения химии и наук о материалах РАН.

Поздравляем Николая Никитовича со славным юбилеем, желаем здоровья, счастья, новых творческих свершений на благо российской науки.

70



**МИНГАЛЕВ Виктор Степанович**

д. ф.-м. н. (1990), профессор, заведующий сектором вычислительного эксперимента Полярного геофизического института КНЦ РАН. В Кольском научном центре РАН с 1969 г.

После окончания математико-механического факультета Ленинградского государственного университета им. А. А. Жданова (1969) Виктор Степанович начал свою трудовую деятельность в Кольском филиале Академии наук СССР. Прошел путь от старшего лаборанта до заведующего вычислительным сектором (центром) Кольского филиала Академии наук.

В настоящее время В. С. Мингалев – известный специалист в таких областях, как математическое моделирование поведения высокоширотной ионосферы и средней атмосферы Земли, процессов переноса в частично ионизованной многокомпонентной химически реагирующей плазме, исследования распространения коротких радиоволн в полярной ионосфере методом вычислительного эксперимента. Им самим и при его участии были выведены системы уравнений различного уровня сложности, пригодные для описания поведения околоземных газовой и плазменной оболочек.

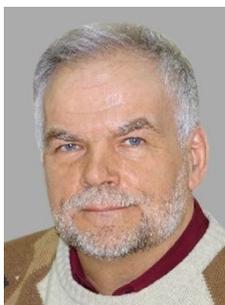
При помощи разработанных им математических моделей выявлены механизмы и объяснены особенности ряда процессов, протекающих в высокоширотной верхней атмосфере и ионосфере в спокойных и естественно возмущенных условиях, а также при искусственном нагреве ионосферы мощными короткими радиоволнами. Под его руководством и при активном участии разработаны программы для ЭВМ, позволяющие рассчитывать характеристики распространения коротких радиоволн в пространственных двух- и трехмерных областях неоднородной высокоширотной ионосферы. С их помощью исследованы особенности прохождения коротких радиоволн через высокоширотную ионосферу, в частности, поглощение энергии

радиоволн на трансавторальных радиотрассах за счет столкновений ионосферных электронов с нейтральными молекулами.

Постоянный член ученого совета Полярного геофизического института.

Научную работу Виктор Степанович совмещает с педагогической деятельностью. Под его руководством выросли несколько кандидатов наук и подготовлены десятки молодых специалистов.

Поздравляем В. С. Мингалева со славным юбилеем, желаем крепкого здоровья, благополучия, новых научных открытий и достижений.



### **КАЛИНКИН Александр Михайлович**

д. х. н., заведующий лабораторией Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, где работает с 1979 г.

Область научных интересов – механохимия минералов, механохимический синтез, применение механоактивации для получения вяжущих, керамических и других материалов, в т. ч. нанокристаллических, термодинамическое моделирование процессов с участием минералов. В 1998–1999 гг. работал в Технологическом университете г. Лулео (Швеция) в рамках совместного проекта по изучению техногенных изменений свойств минералов. В ходе выполнения проекта был обнаружен эффект глубокой механосорбции углекислого газа силикатами и сложными оксидами. Результаты этих исследований совместно с Институтом химии твердого тела и механохимии СО РАН вошли в число важнейших достижений РАН (2000), поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (2003, 2006) и отмечены премией МАИК «Наука/Интерпериодика» (2004).

Соавтор более 200 научных работ, включая 1 монографию, 70 статей в рецензируемых журналах, в т. ч. международных.

В 2010–2013 гг. являлся руководителем с российской стороны российско-индийского проекта «Использование шлаков цветной металлургии в геополимерных материалах» с участием Национальной металлургической лаборатории Индии.



*Юбилеи*



*Юбилей*

Александр Михайлович – член ученого и диссертационного советов ИХТРЭМС КНЦ РАН, эксперт Российского научного фонда, член редколлегии «Журнала общей химии», профессор Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета. Под его руководством защищена кандидатская диссертация и три выпускных квалификационных работы студентов.

Награжден грамотами Российской академии наук, Почетной грамотой губернатора Мурманской области.

Поздравляем Александра Михайловича с юбилеем, желаем бодрости, отличного настроения и новых творческих свершений на благо российской науки.



#### **КАСИКОВ Александр Георгиевич**

к. х. н., заведующий сектором гидрометаллургии Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН им. И. В. Тананаева, где работает с 1979 г.

Специалист в области комплексной переработки медно-никелевого и вторичного кобальтсодержащего сырья, а также процессов сорбции платиновых металлов и экстракции цветных и редких элементов. Под его руководством проводятся химико-технологические исследования, которые направлены на совершенствование и разработку новых технологических процессов комплексной переработки медно-никелевого и редкометалльного сырья.

Александр Георгиевич предложил и испытал в промышленном масштабе смешанные сорбенты на основе феррогеля для извлечения платиновых металлов из оборотных растворов медно-никелевого производства. Участвовал в разработке технологии дополнительных никелевых концентратов, проводимой совместно с фирмой «Оутокумпу».

При его непосредственном участии на комбинате «Североникель» внедрены гидрохлоридная технология кобальтового концентрата с получением солей кобальта и электролитного кобальта высокой чистоты, технология получения медного купороса из отходов, технология регенерации серной кислоты, а также усовершенствована технология получения осмата калия, что позволило предприятию получить значительный экономический эффект. В частности, экономический эффект от внедрения только технологии чистых солей кобальта составил около 2 млн долл. в год.

В своих работах А. Г. Касиков развивает новый подход к технологии переработки минерального сырья, основанный на максимально возможном вовлечении отходов производства в хозяйственный оборот с получением новых видов продукции.

Он был одним из ответственных исполнителей ФЦП «Создание авиационно-космических материалов и развитие специальной металлургии России с учетом восстановления производства стратегических материалов и малотоннажной

химии». За результаты исследований в этой области стал лауреатом конкурса, посвященного 100-летию со дня рождения академика

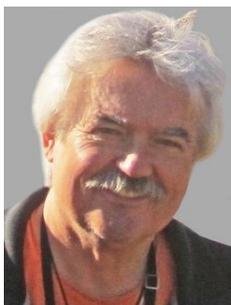
С. Т. Кишкина, награжден золотой медалью (2006).

Активно участвует в подготовке студентов-химиков Мурманского государственного технического университета. Под его руководством выполнены и защищены 4 кандидатские диссертации и 8 дипломных работ.

Автор более 400 научных работ, 28 авторских свидетельств и патентов, 4 из которых внедрены в производство.

Достижения А. Г. Касикова отмечены дипломами, грамотами и наградами, результаты исследований неоднократно включались в число основных достижений РАН. За большой научный вклад и внедрение разработок в промышленность отмечен почетными грамотами Президиума РАН и Профсоюза работников РАН (1999 г.) и губернатора Мурманской области (2005 г.), удостоен почетного звания «Заслуженный химик РФ» (2008).

Поздравляем Александра Георгиевича с юбилеем, желаем бодрости, счастья и новых творческих успехов.



#### **САФАРГАЛЕЕВ Владимир Ваисович**

д. ф.-м. н. (2011), заместитель директора по научной работе Полярного геофизического института с 2004 г.

Свою научную карьеру в институте начал в 1984 г. в группе теоретических исследований, возглавляемой В. Б. Ляцким, где под его руководством защитил кандидатскую диссертацию (1997 г.).

За время работы в институте прошел путь от младшего научного сотрудника до заместителя директора по научной работе. На посту заместителя директора курировал международную деятельность. При его активном участии инициированы три наблюдательных кампании по исследованию динамики дневных полярных сияний в контексте ионосферной конвекции, проведенные международной ассоциацией EISCAT на архипелаге Шпицберген с участием ПГИ.

Координатор двух крупных международных грантов (грант Совета министров Северных стран на создание сети оптических наблюдений и грант Исследовательского совета Норвегии, направленный на активизацию российско-норвежского сотрудничества на арх. Шпицберген). В течение нескольких лет входил в состав российско-норвежской комиссии, действующей в рамках Соглашения по научно-техническому сотрудничеству в Арктике и исследованиям Севера между Федеральным агентством по науке и инновациям Министерства образования и науки РФ и Исследовательским советом Норвегии. Наиболее значимым результатом международной деятельности института стал грант Европейской комиссии SIOS на создание единой наблюдательной платформы на арх. Шпицберген. Владимир Ваисович представлял институт в международном Консорциуме SIOS, где, кроме



*Юбилей*



*Юбилей*

Полярного геофизического института, представляющего Российскую академию наук, с правом решающего голоса участвовал только Институт Арктики и Антарктики Роскомгидромета.

Несмотря на большую занятость административной работой, Владимир Ваисович не прекращал научные исследования и в 2011 г. защитил докторскую диссертацию на тему «МГД-возмущения в неоднородной магнитосферной плазме и задачи мониторинга космической погоды».

Известный специалист в таких областях, как физика магнито-и ионосферы, полярные сияния, геомагнитные пульсации. Постоянный член ученого совета ПГИ.

На протяжении многих лет являлся доцентом кафедры высшей математики КФ ПетрГУ, где подготовил немало молодых специалистов. В последние годы возглавляет государственную комиссию по приему госэкзаменов и защите дипломных проектов на кафедре теплофизики КФ ПетрГУ.

От всей души поздравляем Владимира Ваисовича со славным юбилеем, желаем крепкого здоровья, успехов в работе, новых научных достижений.



### Юрий Масумович Невретдинов

04.06.1947 – 26.04.2016

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН понес тяжелую утрату. 26 апреля на 69-м году ушел из жизни ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук Юрий Масумович Невретдинов.

Вся его жизнь связана с Заполярьем. После окончания в 1975 г. Ленинградского политехнического института он вернулся домой и поступил на работу в Кольский филиал Академии наук.

Его профессиональная деятельность была посвящена решению проблем высоковольтной электроэнергетики. В Центре физико-технических проблем энергетики Севера прошел путь от инженера до заведующего лабораторией. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию, посвященную молниезащите оборудования подстанций. Ю. М. Невретдинов являлся специалистом в области обеспечения надежной работы высоковольтного электроэнергетического оборудования предприятий не только Мурманской области, но и всего Северо-Запада России. У него был большой опыт организации и проведения теоретических и экспериментальных исследований. Он разработал каскадный принцип ограничения атмосферных перенапряжений, создал универсальную математическую модель для анализа переходных процессов в участках сети с возникновением различных видов перенапряжений – от дуговых до феррорезонансных, разработал методы расчетного выявления источника высокочастотных помех в каналах контроля и управления электропередачами. Юрий Масумович непосредственно участвовал в подготовке и проведении экспериментальных исследований по использованию ЛЭП в качестве источников крайне низкочастотных электромагнитных полей для целей дальней связи и зондирования земли. Руководил комплексными исследованиями в системах электроснабжения промышленных предприятий, включающих контроль условий функционирования оборудования и качества электроэнергии. Разработки Ю. М. Невретдинова в области защиты электрооборудования подстанций от перенапряжений используются в энергосистемах Северо-Запада России и включены в один из разделов «Электротехнического справочника».

Своими знаниями и опытом Юрий Масумович щедро делился со студентами-электроэнергетиками, совмещая научную работу с преподавательской деятельностью в Кольском филиале ПетрГУ и Апатитском филиале МГТУ.

Он также принимал активное участие в общественной жизни коллектива, много лет руководил работой профсоюзного комитета, награжден Почетной грамотой РАН.

Светлая память о Юрии Масумовиче навсегда сохранится в наших сердцах.

Выражаем искренние соболезнования родным и близким покойного.



### Николай Павлович Тузов

19.03.1935 – 02.04.2016

С глубоким прискорбием извещаем, что 2 апреля 2016 г. в Санкт-Петербурге на 82-м году жизни после тяжелой и продолжительной болезни скончался Н. П. Тузов.

После окончания в 1962 г. Криворожского горнорудного института поступил на работу в Горнометаллургический институт Кольского филиала Академии наук (КФАН) СССР, где проработал около 10 лет в лаборатории электрофизических методов разрушения горных пород. Николай Павлович способствовал становлению нового научного направления в работе лаборатории, являлся автором 30 научных работ, в т. ч. 11 авторских свидетельств на изобретения СССР. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование генератора высоковольтных импульсов для разрушения горных пород».

С 1972 по 1990 гг. возглавлял Патентный отдел Кольского научного центра РАН, а с 1990 по 1994 гг. – Патентный отдел Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС). За этот период времени под его методическим руководством и при непосредственном участии была проведена большая работа по правовой охране изобретений, организации патентных исследований, экспертизе объектов техники на патентную чистоту, зарубежному патентованию и продаже лицензий. Только в ИХТРЭМС было получено около 420 авторских свидетельств СССР и патентов РФ, 21 изобретение было защищено в 29 зарубежных странах 106 заявками и патентами, заключено 7 лицензионных соглашений на общую сумму около 3.5 млн долл. США.

Николай Павлович принимал активное участие в общественной жизни КФАН СССР и Мурманского региона, неоднократно избирался в состав парткома Филиала, на протяжении 10 лет руководил ревизионной комиссией Кировской городской партийной организации.

Н. П. Тузов являлся председателем первичной организации общества «Знание» КФАН СССР, был членом областного совета ВОИР, лектором по патентно-лицензионной работе при Мурманском учебно-консультационном пункте Курсов патентоведения и изобретательства ВГКПИ.

Награжден медалью «За доблестный труд» (1970 г.), бронзовой медалью ВДНХ СССР (1983 г.), Почетной грамотой ЦС ВОИР и нагрудным знаком «Отличник изобретательства и рационализации».

Мы помним Николая Павловича Тузова как энергичного, честного, отзывчивого человека, готового прийти на помощь в трудную минуту.

Выражаем глубокое соболезнование родным и близким покойного. Светлая память о Николае Павловиче навсегда останется в наших сердцах.

Научное издание

**ВЕСТНИК КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН**

**2/2016(25)**

**Требования к оформлению статей:**

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

Редактор А. С. Менделева

Информационная поддержка: И. Г. Савчук, Л. А. Тимофеева

Художественный редактор Е. Т. Мартынова

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Корректор С. А. Шарам

Подписано к печати 19.05.2016.

Формат бумаги 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times/Cyrillic

Усл. печ. л. 17,9. Заказ № 23. Тираж 500 экз.

---

*Российская Академия Наук*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Кольский научный центр Российской академии наук  
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14