

*Российская Академия Наук*

# ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

2/2013



- естественные и технические науки
- конференции, семинары
- новые книги
- юбиляры
- contents

2/2013 (13)

издается с декабря 2009 года

ISSN 2307-5228

ISBN

*Российская Академия Наук*

# ВЕСТНИК

## Кольского научного центра РАН

**Учредитель - Учреждение Российской академии наук Кольский научный центр РАН**

Главный редактор - академик В.Т. Калинин

Заместители главного редактора

д.г.-м.н. В.П. Петров,

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

Редакционный совет

академик Г.Г. Матишов., академик Н.Н. Мельников,

академик Ф.П. Митрофанов, чл.-корр. В.К. Жиров,

чл.-корр. А.И. Николаев, д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский,

д.т.н. Б.В. Ефимов, д.э.н. Ф.Д. Ларичкин,

д.т.н. В.А. Маслобоев, д.т.н. В.А. Путилов,

д.ф.-м.н. Е.Д. Терещенко,

к.г.-м.н. А.Н. Виноградов (ответственный секретарь)

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

**Реферируется в РЖ и базе данных ВИНТИ**

**Требования к оформлению статей см.:**

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

184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, д.14.

Кольский научный центр, редакция журнала 'Вестник Кольского научного центра РАН'

Тел.(81555)79226. Факс (81555)76425

E-mail: usov@admksk.apatity.ru

**ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

А.А. Предовский, И.В. Чикирёв, Д.А. Некипелов	О рифтах и рифтогенах в аспекте типизации коровых структур.....	3
Н.Е. Козлов, Е.В. Мартынов, Н.О. Сорохтин	Реконструкция обстановок формирования протолитов раннедокембрийских комплексов (новые подходы).....	8
А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Н.А. Калашник	Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища.....	13
П.В. Амосов	Численное моделирование распределения температуры излучающей пластины.....	17
Н.А. Калашник	О социально-экономических последствиях аварий при шельфовой нефтегазодобыче.....	22
Н.М. Адров	Морские биологи – химии океана.....	26
С.И. Бардан, Б.М. Долгонососов	Физические основы устойчивости слоистых структур области река–море и натурные данные по Кольскому заливу.....	36
А.А. Мартынова, С.В. Пряничников, В.В. Пожарская, Н.К. Белишева	Адаптация детей Заполярья к условиям средних широт (на примере оздоровительного комплекса «Эковит» КНЦ РАН в Воронежской области) при различном уровне геомагнитной активности.....	54
С.И. Печенюк	Изучение сорбции анионных комплексов платиновых металлов.....	64
В.К. Ролдугин	Об одной возможности исследования реакции магнитосферы на активные воздействия.....	75
В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, Е.Д. Рухленко, Е.Г. Веселова	Оценка флотационных свойств компонентов пробы питания основной нефелиновой флотации для вычислительного эксперимента.....	79
Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов, Е.В. Кабеев	Оценка качества уплотнения грунтовых дамб неразрушающим сейсмографическим методом.....	91
Е.П. Башмакова, В.С. Селин	Развитие экономического пространства Российской Арктики на основе модернизации нефтегазового комплекса.....	98
С.С. Туинова	Сценарный прогноз развития альтернативной энергетики Севера России.....	109
	<b>КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ</b> .....	115
	<b>НОВЫЕ КНИГИ</b> .....	124
	<b>ЮБИЛЯРЫ</b> .....	126
	<b>ПОТЕРИ НАУКИ</b> .....	129
	<b>CONTENTS</b> .....	130

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 (ответственный секретарь редколлегии).

Редактор: А.С. Менделева, информационная поддержка: Я.А. Стогова, Л.А. Тимофеева, З.А. Уланова.

Зав. издательством, художественный редактор М.С. Строков.

Верстка, фото В.Ю. Жиганов

## О РИФТАХ И РИФТОГЕНАХ В АСПЕКТЕ ТИПИЗАЦИИ КОРОВЫХ СТРУКТУР

А.А. Предовский<sup>1,2</sup>, И.В. Чикирёв<sup>1,2</sup>, Д.А. Некипелов<sup>2</sup>

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

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

### Аннотация

На основе морфоструктурного подхода и понятия о мантийно-коровом взаимодействии характеризуются рифтогенные системы континентального и океанического типа.

### Ключевые слова:

*рифтогены, мантийно-коровое взаимодействие, типизация коровых структур.*



В настоящее время серьезное значение приобретает выявление закономерных связей и взаимодействия различных по характеру геосистем, что выражается (или должно выражаться) в исследовании общей временной цепочки объектов и событий:

- 1) геотектонические (геодинамические) режимы;
- 2) типы региональных и более крупных структурных ансамблей;
- 3) системы эндогенного и экзогенного породообразования;
- 4) формационные породные ассоциации и генотипы пород.

В силу ретроспективного характера геологических наук, наиболее часто решаемые задачи носят обратную направленность и сводятся к выявлению количественно выраженного перехода от 4-й из указанных позиций ко 2-й и 1-й. Представляется необходимым четкое понимание ситуации по каждой из позиций. Однако на деле нередко используется упрощенный подход с применением трафаретных схем, базирующихся на гипотетических построениях.

Примером этого являются популярные методы распознавания былых геодинамических режимов по диаграммам состава тех или иных групп магматических образований в сравнении с эталонными полями, характерными для областей проявления современных или недавних эндогенных режимов, выделенных на основе тех или иных умозрительных концепций.

Рассматриваемая ситуация весьма трудна, особенно в связи с тем, что геология находится на историческом переходе от классического состояния к постклассическому, когда открывается действительная сложность взаимосвязей объектов, процессов и систем. Поэтому наиболее важна не взаимная острая критика сторонников разных направлений, а углубленное изучение фактической основы явлений. Авторам представляется, что наиболее актуальным сейчас является детальное и глубокое понимание позиций 2 и 3 приведенной выше цепочки. Это, во-первых, проблема выделения основных типов региональных и более крупных структур и структурных ансамблей, а во-вторых, проблема познания связанных с ними систем эндогенного и экзогенного породообразования.

Первая из названных проблем, в связи с существующими геотектоническими разногласиями, наиболее нуждается в объективной ревизии и совершенствовании номенклатуры. В этом аспекте данное сообщение – второе из задуманных авторами. Первое было опубликовано в 2012 году и содержало обоснование предлагаемого пути исследования: *формирование коровых структур Земли может быть эффективно проанализировано в плане морфоструктурного подхода как результат мантийно-корового взаимодействия* [1].

Необходимо напомнить здесь некоторые важные моменты данного подхода:

- в силу подтвержденной временем концепции Ю.А. Мещерякова, И.П. Герасимова и их последователей (например, В.Д. Дибнера) о тесной связи крупных элементов рельефа с

глубинными мантийно-коровыми тектоническими процессами и структурами, неизбежен учет этой связи при общей типизации крупных коровых структур и структурных ансамблей Земли;

- при анализе мантийно-корового взаимодействия важными обстоятельствами являются: роль долгоживущих глубинных линейных зон (ДЛЗ) как каналов подачи глубинных и сверхглубинных теплоносителей и сопровождающих веществ [2, 3], в свою очередь вызывающих развитие участков «аномальной» мантии, частично подплавленных и насыщенных флюидами. Эти участки, становящиеся более легкими по сравнению с исходной мантией и обретающие тенденцию к всплыванию, и являются главной непосредственной причиной тектонического мантийно-корового взаимодействия, которое можно считать «термогравитационным»;

- появление значительных по объему масс «аномальной» мантии может приводить и к мантийному диапиризму, а при нарастающей активности ДЛЗ и связанных с ними глубинных теплоносителей – к возникновению очагов более полного плавления и развитию собственно магматических явлений.

После приведенного необходимого вступления обратимся к заявленной в заголовке теме – о рифтах и рифтогенах. Но перед этим подчеркнем, что авторы не ставят себе задачи систематического обзора источников или анализа позиций многочисленных авторов. Наша задача – достаточно четкая формулировка наших позиций относительно рифтов и рифтогенов в духе высказанных ниже предложений.

Понятие о рифтах является географическим и геоморфологическим. Оно без больших вариаций воспроизводится в различных геологических и географических словарях. Однако сегодня совершенно недостаточно (как географам, так и геологам, и геофизикам) считать, что рифт есть линейная впадина, даже если объяснять его образование некими движениями блоков коры. Разные задачи, в том числе упоминавшиеся в начале данного сообщения, требуют рассмотрения понятия о рифтах на уровне полноценного морфоструктурного анализа. Попробуем это сделать.

Начнем с того, что понятие о рифтах влечет за собой понятие о рифтогенах. Рифтоген – это вся морфоструктурная система от форм рельефа земной поверхности до вызывающих их образование объектов и процессов в переходной зоне кора–мантия. Вопрос о переходной зоне был рассмотрен нами ранее, при обсуждении проблемы геосторического деления земной коры [3, 4].

В составе рифтогена могут быть выделены: ДЛЗ как каналы вертикального транспорта глубинных и сверхглубинных теплоносителей; возбужденная или «аномальная» верхняя часть верхней мантии, как правило, более широкая в плане, чем контролирующая ее ДЛЗ и обнаруживающая признаки «всплывания»; поднимающаяся в виде свода или вала кора, лежащая на всплывающей «аномальной» мантии; собственно рифтовые образования, возникающие в пределах свода или вала под влиянием их гравитационного расползания. В общем случае породные массы «аномальной» мантии не поднимаются в кору, проникая в нее и взаимодействуя с ней, а просто приподнимают ее. Возможно, это важный классификационный признак рифтогенов. В ходе длительного развития рифтогена в его пределах или обрамлении могут проявиться и процессы магматизма (вулканического и субвулканического типа). Их масштаб обычно ограничен по сравнению со структурами авлакогенных или синклинорных прогибов и тем более по сравнению с геосинклинальными системами.

В общем плане рифтогены – это обычно длительно или даже весьма длительно развивающиеся системы, управляемые глубинными и сверхглубинными областями активизации. Активизация характеризуется перерывами во времени, иногда значительными, что будет видно из приводимых ниже примеров.

В крупных рифтогенах, связанных с областями сопряжения и пересечения ДЛЗ, могут возникать явления интрузивного и вулкано-плутонического магматизма, в том числе достаточно масштабные, что по существу не противоречит всему сказанному выше.

Можно говорить о внутриконтинентальных и океанических рифтогенах. Первые представлены овальными сводами с рифтами на поверхности и обширными полями «аномальной» мантии на глубине. Представительным примером является Байкальский рифтоген с одноименным сводом, главным рифтом оз. Байкал (рис. 1), огромным полем «аномальной» мантии и серией второстепенных рифтов, в том числе контролирующих неоген-четвертичный субщелочной базальтовый вулканизм [5, 6].

На рис. 1 отчетливо видно, что область преимущественного проявления базальтовых покровов и потоков (обозначение 4) занимает секущее, субмеридиональное положение по отношению к главному северо-восточному направлению байкальских структур. Вместе с другими фактическими данными это свидетельствует о возможно имеющем здесь место взаимном пересечении крупных долгоживущих глубинных линейamentных зон.

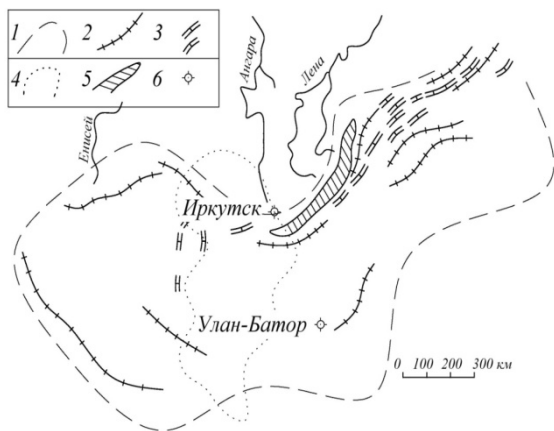


Рис. 1. Размещение и некоторые особенности строения внутриконтинентального Байкальского рифтогена в пределах геоантиклинального поднятия южной окраины Сибирской платформы по [8]:

1 – граница распространения на глубине «аномальной» мантии; 2 – осевые линии главных возвышенностей и хребтов; 3 – положение основных рифтовых впадин, в том числе контролирующих распространение неоген-четвертичных субцелочных оливиновых базальтов; 4 – область преимущественного проявления базальтовых покровов и потоков; 5 – рифт оз. Байкал; 6 – города

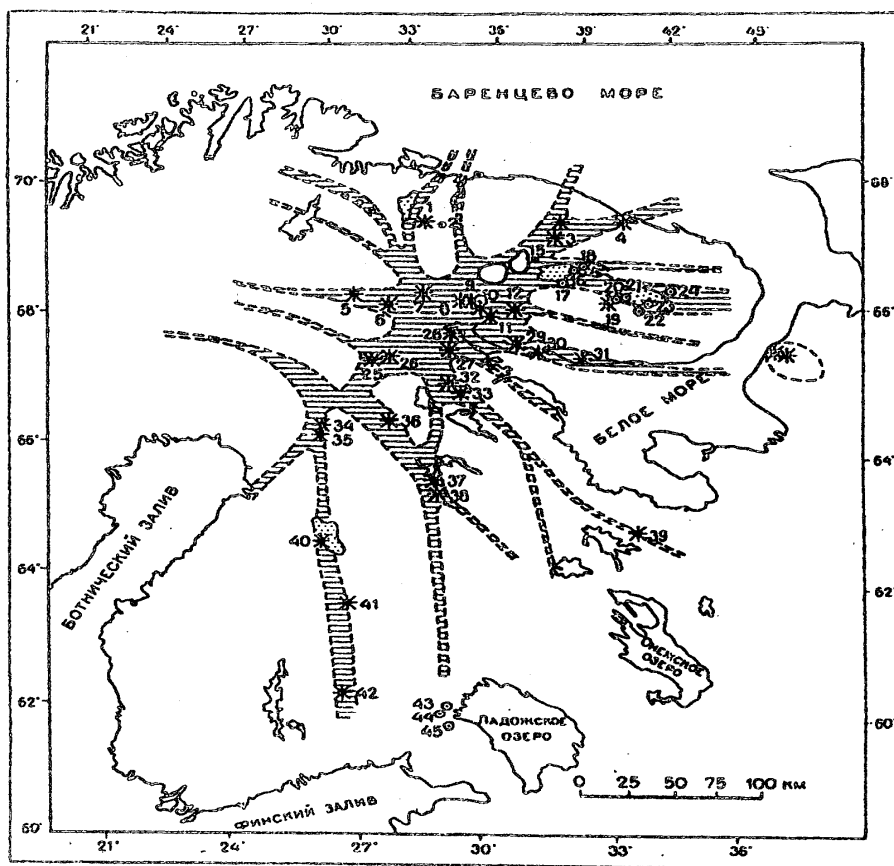


Рис. 2. Схема размещения дизъюнктивных зон внутри континентального Кольского (или Карело-Кольского) рифтогена – долгоживущей области глубинной активизации по [9]:

1 – щелочные граниты; 2 – кислые и средние субцелочные и щелочные вулканиты и метавулканиты; 3 – щелочные и субцелочные базиты (плутониты и вулканиты); 4 – щелочные гипербазиты и базит-гипербазиты; 5 – нефелиновые сиениты; 6 – приближенные границы дизъюнктивных зон рифтогена. Цифрами на схеме обозначены проявления щелочного магматизма

В одной из важных работ по сейсмическому моделированию основных геоструктур литосферы территории СССР [7], мощность «аномальной» мантии верхов подкорового слоя Байкальского региона оценивается в 17 км при глубине его верхней и нижней границ соответственно в 38 и 55 км. Причиной развития «аномальной» мантии авторы этой работы (1980 г.) считают подъем разогретого и частично расплавленного вещества из астеносферного слоя. Представляется, что на уровне современных фактических и теоретических материалов предпочтительнее выглядит предлагаемое нами решение о существенной роли подъема флюидных теплоносителей по ДЛЗ, о чем уже говорилось выше.

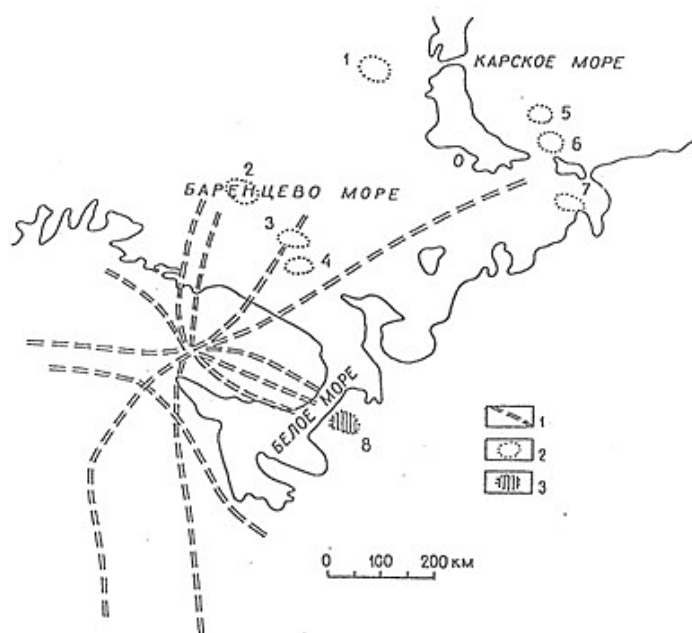
Примером более древней внутриконтинентальной рифтогенной структуры является Карело-Кольский рифтоген, выделенный в 1984 г. А.А.Предовским [9] в развитие идей В.А.Токарева, что было поддержано в региональной литературе. Этот рифтоген (рис. 2) характеризуется весьма большой длительностью формирования. Входящие в него наиболее ранние образования включают щелочные граниты позднеархейской формации щелочных гранитоидов–нефелиновых сиенитов с возрастом 2.70–2.65 млрд лет.

Наиболее четко рифтоген оформился в девонское время, когда контролировал размещение широкого спектра пород вулкано-плутонической формации нефелиновых сиенитов и ультраосновных щелочных магматитов, в том числе в виде весьма крупных комплексов.

Пространственно рифтоген связан с куполовидными поднятиями, входящими в ансамбль сводовой структуры Балтийского щита. Его разломные линии в определенной мере подчинены пересекающимся долгоживущим глубинным зонам северо-восточного и северо-западного направления глобальной системы ДЛЗ (рис. 3) и отражают развитие долгоживущей области глубинной активизации, которая в литературе рядом авторов рассматривается как проявление плюмовых процессов.

Наиболее яркий пример рифтогенов океанических областей – это структуры срединно-океанических хребтов, описанные в большом количестве современных публикаций. Их главными особенностями являются:

- приуроченность к океаническим областям, оформившимся в эпоху океанизации Земли (т.е. в мезо-кайнозой);
- принадлежность к единой глобальной системе ДЛЗ, заложенной в архее, но пережившей эволюционные преобразования;
- обычно значительная протяженность (до тысяч километров);
- связанное с предыдущим пунктом присутствие поперечных трансформных разломных зон;
- пространственно-временные неоднородности состава и характера связанных с ними магматитов.



*Рис. 3. Схема расположения основных дизъюнктивных зон Карело-Кольского рифтогена, их продолжения и некоторых площадей, продуктивных на полезные ископаемые по [9]:*

- 1 – дизъюнктивные зоны рифтогена;  
 2 – уже известные месторождения энергоносителей (цифры на схеме 1 – газоконденсатное Штокмановское, 2–4 соответственно Северо-Кильдинское, Северо-Мурманское и Мурманское газовые, 5–6 соответственно Русановское и Ленинградское и газоконденсатные; 7 – нефтяное Приразломное);  
 3 – алмазоносные кимберлиты и лампроиты Зимнего берега (№8 на схеме)*

Наиболее общие модельные черты мантийно-коровых рифтогенных систем континентов и океанов (в поперечном сечении) отражены на рис. 4.

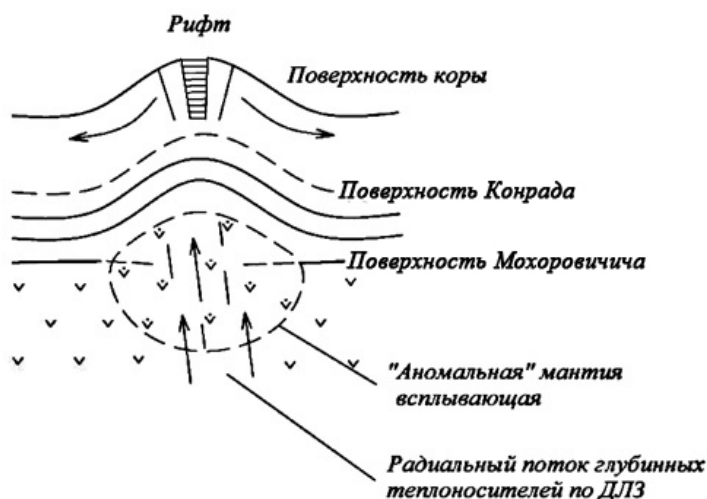


Рис. 4. Обобщенная модельная схема рифтогенных мантийно-коровых структурных систем (поперечное сечение)

Необходимы некоторые пояснения:

1) на рисунке граница Конрада традиционно показана внутри коры, в ее нижней части, хотя по нашим предложениям и мнению ряда предшественников, поверхность Конрада должна считаться нижней границей земной коры;

2) рисунок 4 показывает момент активизации вещества верхов верхней мантии и связанный с этим «размыв»

поверхности М и всплывание «аномальной» мантии под корой;

3) более совершенный вариант данного модельного рисунка должен содержать указания на присутствие и границы переходной зоны мантия–кора, являющейся ареной активных тектонических событий.

Приведенный модельный рис. 4 подчеркивает наиболее важные классификационные черты рифтогенов:

- присутствие в основании системы ДЛЗ, как глубинного канала радиального транспорта теплоносителей;
- прерывание отчетливого проявления поверхности М в зоне «аномальной» мантии;
- сводовый характер как верхней границы зоны «аномальной» мантии, так и параллельной ей выпуклости земной коры;
- отсутствие признаков проникновения аномальной мантии в кору;
- осевое положение рифта в зоне гравитационного расползания земной коры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Предовский А.А.* Существенные особенности мантийно-корового взаимодействия как важного фактора морфоструктурного процесса / *А.А. Предовский, И.В. Чикирёв* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1 (8). С. 159–166.
2. *Предовский А.А.* Об одной проблеме геологического сознания: насколько же важна разломная тектоника? // Тиетта. 2009. №2 (8). С. 15–19.
3. *Предовский А.А.* Формационный анализ супракустальных толщ (введение в проблему стратисферы Земли). Мурманск: Изд-во МГТУ, 2011. 190 с.
4. *Предовский А.А.* Вариант геосторического деления земной коры и возможности его согласования с традиционным геофизическим / *А.А. Предовский, А.О. Полушкина* // Тиетта. 2010. №2 (12). С. 12–16.
5. *Бородин Л.С.* Главнейшие провинции и формации щелочных пород. М.: Наука, 1974. 376 с.
6. *Милановский Е.Е.* Геология России и ближнего зарубежья. М.: МГУ, 1996. 446 с.
7. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. М.: Наука, 1980. 184 с.
8. *Киселев А.И.* Вулканизм Байкальской рифтовой зоны и проблемы глубинного магмообразования / *А.И. Киселев, М.Е. Медведев, Г.А. Головки*. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1979. 197 с.
9. Новые аспекты прогнозирования крупных нефтегазоносных областей / *Ф.П. Митрофанов, А.А. Предовский, В.В. Любцов и др.* Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1998. 58 с.

#### Сведения об авторах

*Предовский Александр Александрович* – д.г.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник;

e-mail: kafgeol@afmgtu.apatity.ru

*Чикирёв Игорь Владимирович* – к.г.-м.н., доцент, заместитель директора МГТУ;

e-mail: kafgeol@afmgtu.apatity.ru

*Некипелов Дмитрий Александрович* – студент; e-mail: kafgeol@afmgtu.apatity.ru



## РЕКОНСТРУКЦИЯ ОБСТАНОВОК ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОЛИТОВ РАННЕДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ (НОВЫЕ ПОДХОДЫ)

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

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

<sup>2</sup>АФ ФБГОУ ВПО МГТУ;

<sup>3</sup>Институт Океанологии РАН

### Аннотация

Рассмотрены проблемы реконструкции протоприроды и условий формирования протолитов древнейших комплексов. Обращено внимание на то, что процессы эволюции Земли развиваются нелинейно, что накладывает ограничения на использование принципа актуализма. Предложен новый метод обработки данных и их интерпретации с учетом изменения химического состава мантии. Приведен пример использования поправки на эволюцию вещества при реконструкции первичной природы и условий формирования протолитов раннедокембрийских комплексов.

### Ключевые слова:

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



Геология докембрия имеет свои особые черты, связанные со специфичностью этого периода. Можно полагать, что иными были атмосфера, состав и строение оболочек Земли, объемы и распределение континентальных и океанических масс, температура, давление и т.д. Кроме того, в кристаллических щитах сегодня

обнажены разноглубинные срезы расслоенной литосферы, отдельные элементы которых могли даже не проходить полных геологических циклов, включая экзогенные процессы эрозии и осадконакопления. Геологическая расшифровка сложноорганизованных ансамблей докембрия требует привлечения не только традиционных, апробированных на фанерозойских объектах методов, но и иных подходов, иногда различных даже при исследовании отдельных периодов длительной докембрийской истории.

Проблемами реконструкции первичной природы и геодинамических условий формирования протолитов супракрустальных комплексов, основанных на создании и использовании различных диаграмм, занимались многие авторы: М.Р. Бхатиа, А.Ф. Грачев, Н.А. Домарацкий, А.С. Керр, В.А. Макрыгина, А.Н. Неелов, Дж. А. Пирс, А.А. Предовский, О.М. Розен, Х. Рош, А.В. Сидоренко, А. Симонен и многие другие. Геохимические и изотопно-геохимические данные [1–4 и др.] позволили разработать критерии для соотнесения геохимических характеристик магматических пород с геодинамическими обстановками их образования, при этом в основу разрабатываемых диаграмм закладывалась информация о содержании тех или иных элементов в объектах фанерозоя, что потом использовалось при исследовании супракрустальных комплексов докембрия. В целом этот подход известен как принцип актуализма.

Вместе с тем, данные ряда исследователей позволяют предполагать, что процессы эволюции Земли развивались нелинейно, а следовательно, названный принцип нельзя в полной мере, без внесения каких-либо поправок, применять при исследовании геодинамических обстановок раннего докембрия. Как нам представляется, при проведении параллелей между докембрийскими и фанерозойскими породными комплексами, генетически связанными с определенными режимами, целесообразно исходить из предположения о специфичности докембрийского периода развития планеты, с одной стороны, и некоторой общности в характере

реализации геодинамических обстановок на всем протяжении геологической истории – с другой. Данный подход был сформулирован ранее [5] как положение о гомологичных рядах геодинамических режимов. Необходимо также отметить, что в последнее время для решения задач реконструкции многими исследователями привлекаются данные о содержании малых и в первую очередь редкоземельных элементов. Не отрицая важности и правомерности такого подхода, авторы настоящей работы подчеркивают, что наиболее важной отличительной чертой разрабатываемых ими методов остается исследование содержания и распределения в породах петрогенных элементов. Информация об их содержании в породе является ее фундаментальным свойством и должна лежать в основе петрогеохимических реконструкций (так же как это делается при разработке разного рода петрогеохимических классификаций пород). Кроме того, использование при создании эталонов данных о содержании малых элементов, в силу различающегося качества определения этого содержания в различных лабораториях, создает порой пока непреодолимые трудности. Сведения о содержании малых элементов и их изотопов крайне важны (а иногда и приоритетны) для решения частных задач, в общем же случае эта информация является лишь дополнительной и должна использоваться на фоне изучения закономерностей содержания петрогенных элементов.

Ниже описан метод обработки данных о составе докембрийских комплексов, позволяющий в некоторой степени учитывать геохимические особенности ранних этапов развития Земли при проведении различного рода реконструкций первичной природы породных ассоциаций либо поиске аналогов фанерозойских геодинамических режимов в раннем докембрии. Настоящая работа продолжает исследования, первые результаты которых были опубликованы ранее [6].

Необходимо отметить, что на ранних этапах работы авторы, так же как и другие ученые, при проведении реконструкций условий формирования раннедокембрийских комплексов использовали прямые аналогии с фанерозоем, что порой приводило к неоднозначным результатам. Отчетливо видно, что близость фанерозойских объектов (п/п 1, 2 и 3 в табл. 1) к эталонным выборкам, соответствующим им по геодинамическим режимам, практически идеальная – «коэффициент близости» приближается к нулю, что означает их практическую идентичность.

Таблица 1

Результаты реконструкции обстановок формирования некоторых комплексов фанерозоя и докембрия (с использованием данных [8–12])

п/п*	Комплексы, пояса, районы	Юные дуги	Развитые дуги	Зрелые дуги	СОХ	Континент. рифты	Траппы
1	Грабен, о. Северный, Новая Зеландия	0.76	2.53	2.61	1.38	<b>0.12**</b>	2.72
2	Рифт, о. Исландия	0.98	2.01	2.22	<b>0.24</b>	1.34	2.84
3	М. Антильская дуга	1.17	<b>0.36</b>	1.28	2.5	2.03	2.78
4	Северопеченгский, Кольский п-ов	3.13	3.87	3.51	3.1	<u>2.21</u>	<u>2.39</u>
		3.09	3.68	3.44	2.98	<b>2.18</b>	2.35
5	Ольхонский, Прибайкалье	<u>2.24</u>	3.27	3.17	<u>2.26</u>	<u>2.32</u>	<u>2.39</u>
		<b>2.18</b>	3.13	3.08	2.23	2.26	2.31
6	Лапландский гранулитовый, Кольский п-ов	<u>2.67</u>	<u>2.68</u>	3.16	3.53	3.26	3.5
		<b>2.52</b>	2.65	3.04	3.22	3.12	3.11

7	Анабарский щит	<u>2.25</u>	2.81	<u>2.19</u>	<u>2.21</u>	2.28	2.36
		<b>2.08</b>	2.73	2.15	2.14	2.22	2.18
8	Гранулиты, С.-В. Азии	<u>3.08</u>	<u>2.88</u>	<u>2.96</u>	3.92	3.12	3.17
		<b>2.63</b>	2.77	2.84	3.12	2.87	3.01
9	Олекмо-курультино-зверевская зона (Алдан)	<u>2.46</u>	2.75	<u>2.32</u>	<u>2.3</u>	<u>2.28</u>	<u>2.44</u>
		<b>2.14</b>	2.71	2.26	2.21	2.2	2.2
10	С.-В. часть Сино-Корейского щита, Китай	<u>2.44</u>	2.78	<u>2.57</u>	3.22	2.61	<u>2.57</u>
		<b>2.38</b>	2.74	2.53	3.06	2.54	2.49
11	Шарьжалгайский, Прибайкалье	<u>2.84</u>	3.49	3.08	<u>2.75</u>	<u>2.78</u>	<u>2.82</u>
		<b>2.63</b>	3.28	2.97	2.74	2.76	2.8
12	Гранулиты Побужья, Украина	<u>2.58</u>	2.96	2.9	<u>2.52</u>	<u>2.79</u>	<u>2.64</u>
		<b>2.13</b>	2.92	2.87	2.24	2.63	2.33
13	Гранулиты, Ю. Индии	<u>3.16</u>	3.75	<u>3.39</u>	3.46	<u>3.25</u>	<u>3.14</u>
		<b>2.71</b>	3.24	3.21	3.32	3.01	2.97

*Примечание.* \* – 1-3 – фанерозойские комплексы, 4-13 – докембрийские комплексы с возрастом формирования протолиты 2.7 млрд лет и менее (4-6), 2.7–3.3 млрд лет (7-11), 3.4 млрд лет, возможно, более (12-13). \*\* – «расстояние» выборки до соответствующих эталонных групп, условно названное «коэффициентом близости».

В то же время для докембрийских объектов результаты реконструкций (для каждого изученного объекта – верхняя строка п/п 4–13 в табл. 1) свидетельствуют о том, что без учета специфики докембрия во многих случаях мы получаем неоднозначный результат. Это выражается в одновременной близости исследуемых объектов к нескольким эталонам.

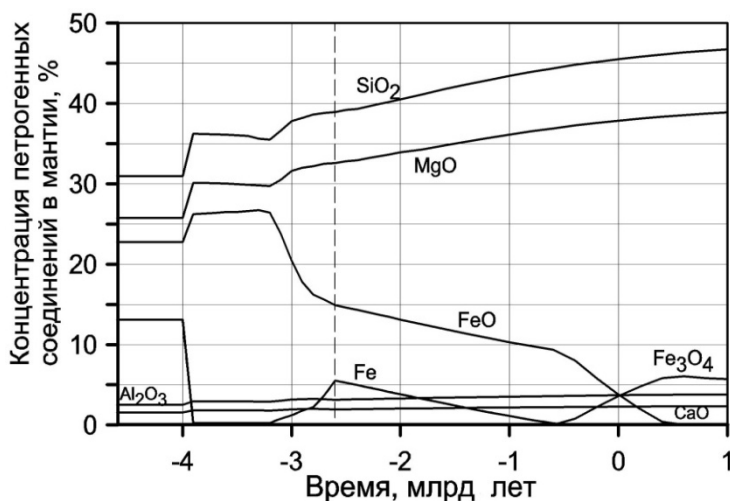
Чем меньше значения приведенных коэффициентов, тем ближе сравниваемые объекты. Жирным шрифтом выделены значения минимального отличия, если они значимо отличаются от ближайшего по величине значения. Подчеркнуты минимальные коэффициенты, если они незначимо отличаются от близких по величине значений. Для докембрийских комплексов верхняя строка – значение «коэффициентов близости» без учета химической эволюции мантии, нижняя строка – с ее учетом.

Поскольку для целей реконструкции нами были использованы метабазиты как наиболее узнаваемый среди метаморфических образований тип пород, столь неоднозначная картина результатов реконструкций может быть удовлетворительно объяснена установленным ранее устойчивым отличием химического состава базальтов фанерозоя и метабазитов докембрия [7]. Таким образом, в ряде случаев невозможно напрямую использовать данные о составе пород фанерозоя при исследовании докембрийских образований, то есть процессы химической эволюции вещества в ходе геологического времени накладывают некоторые ограничения на использование принципа актуализма при изучении раннедокембрийских комплексов.

По мнению авторов, для получения достоверных результатов при сопоставлении состава древнейших породных ассоциаций с фанерозойскими гомологами необходим учет системных отличий состава докембрийских образований относительно фанерозойских эталонов. То есть в данном случае – «смещения» состава докембрийских метабазитов в многомерном пространстве относительно базальтов фанерозоя и только после этого поиск эталона, максимально сходного с исследуемым объектом. В этой связи значительный интерес при решении задач реконструкции представляют теоретические данные, количественно описывающие эволюционные процессы.

С учетом первично мантийного генезиса базитов возможным представляется описать эволюцию состава этих пород с использованием данных об эволюции состава мантии (рис.), приведенные в работе О.Г. Сорохтина с соавторами [13]. В этих целях удобно воспользоваться понятием эволюционного параметра, отражающего относительную массу ядра Земли, введенного В.П. Кеонджаном и А.С. Мониным [14, 15] для описания эволюции химического состава мантии Земли:  $x = \frac{M_c}{C_0 * M}$ , где  $M = 5.977 * 10^{27}$ ;  $g$  – масса Земли;  $C_0 = 0.376$  – суммарная концентрация «ядерного» вещества в Земле ( $Fe + FeO + FeS + Ni$ ) и  $M_c$  – масса ядра. Эволюционный параметр в фанерозое и протерозое можно вычислить одним из следующих способов.

Во-первых, из уравнения:  $\dot{x} = \frac{1}{\tau} \left( C_0 * \frac{1-x}{1-C_0*x} - C^* \right) * x$ , где  $\tau=0.635$  – постоянная с размерностью времени и  $C^*=0.027$  – значение предельной концентрации насыщения окислами железа твердых силикатных растворов на подошве мантии. Во-вторых, с помощью квадратичной аппроксимации решения вышеуказанного уравнения:  $x = -0.0203 * t^2 + 0.0719 * t + 0.8644$  с коэффициентом адекватности  $R^2=0.9999$ . В-третьих, с помощью аппроксимации решения вышеуказанного уравнения многочленом 3-й степени:  $x = -0.0026 * t^3 - 0.0306 * t^2 + 0.0613 * t + 0.8622$  с коэффициентом адекватности  $R^2=1.0$ . Исследуемый объект  $X^* = \{x_i + \beta * v(t) + \xi_i\}_{i=1}^n$ , где  $v(t)$  – вектор «смещения» химического состава мантии во времени,  $\xi$  – вектор смещения химического состава под воздействием не поддающихся учету в данном эксперименте факторов и  $\beta$  – некоторый коэффициент, поиск которого осуществляется на основе использования принципа устойчивости решения задачи. Т.е. процесс увеличения  $\beta$  от 0 к 1 должен быть остановлен в случае первого изменения в выборе соответствующего аналога исследуемого объекта.



*Эволюция химического состава конвектирующей мантии по главным петрогенным элементам и соединениям, по [13]*

Предложенный подход был проверен на примере реконструкции геодинамического режима формирования ряда докембрийских комплексов, исследованных ранее (табл. 1). При введении поправки на химическую эволюцию мантии интерпретация становится более определенной (табл. 1, значения, приведенные для докембрийских

объектов, в нижней строке). При этом результат реконструкций совпадает с полученным ранее в ходе независимых геолого-петрогеохимических исследований [5, 16, 17], что подтверждает возможность применения разработанной для реконструкции геодинамических режимов раннедокембрийских объектов. Далее данный метод был использован при изучении обстановок формирования протолитов некоторых раннедокембрийских комплексов северо-востока Балтийского щита (табл. 2), для метабазитов которых ранее было установлено максимальное подобие с базальтами трапповых формаций [18].

Первые результаты таких сопоставлений показывают, что при введении поправки на химическую эволюцию вещества мантии проявляется существенно большее разнообразие в результатах реконструкций (табл. 2). При этом они не противоречат полученным ранее выводам о более «океанических» характеристиках Беломорского подвижного пояса по сравнению с породами Кольско-Норвежского и Мурманского доменов [5] и специфичности вещественного состава и геодинамики формирования протолитов пород Кейвского домена в сравнении с другими структурами Кольского региона [18].

Таким образом, предложенный метод реконструкции протоприроды обстановок формирования протолитов раннедокембрийских комплексов, учитывающий поправку на химическую эволюцию вещества Земли, повышает достоверность выводов. Авторы подчеркивают, что приведенные результаты исследования древнейших образований северо-востока Балтийского щита (табл. 2) являются предварительными и могут быть серьезно уточнены при доработке метода. Они приведены в настоящей статье лишь для иллюстрации перспективности нового подхода к реконструкции обстановок формирования протолитов древнейших пород. Необходимо также напомнить, что при проведении реконструкций с помощью данного метода мы делаем вывод лишь о близости состава изученных нами метаморфитов с составом магматических пород, сформированных в определенных геодинамических условиях фанерозоя, не проводя полных аналогий между обстановками этого периода развития Земли и докембрия.

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

Объекты сопоставления	Юные дуги	Развитые дуги	Зрелые дуги	СОХ	Континент. рифты	Траппы
Мурманский домен	3.43*	3.72	3.21	3.31	2.94	<b>2.37</b>
	2.26	1.99	1.86	2.17	<b>1.82</b>	1.88
Центрально-Кольский сегмент Кольско-Норвежского домена	4.68	7.06	4.89	6.10	5.28	<b>3.38</b>
	2.56	2.97	2.58	1.98	<b>1.95</b>	2.07
Кейвский домен	3.72	4.34	3.74	4.03	3.90	<b>3.36</b>
	3.31	<b>2.96</b>	3.03	3.55	3.02	3.27
Беломорский подвижный пояс	3.68	4.34	3.75	3.72	3.88	<b>3.00</b>
	2.12	2.43	2.51	<b>1.84</b>	2.12	2.02

*Примечание.\** – числитель (результаты, полученные ранее [18]), знаменатель – результат реконструкций с использованием нового метода. Жирным шрифтом выделены минимальные значения «коэффициентов близости». Значимость отличия этих значений от ближайших по величине на данном этапе исследований не рассчитывалась, что позволяет говорить о результатах, приведенных в данной таблице, как предварительных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев А.Ф. Рифтовые зоны Земли. М.: Недра, 1987. 285 с. 2. Kerr A.C. LIP reading: recognizing oceanic plateau in the geological record / A.C. Kerr, R.V. White, A.D. Saunders // J.Petrol. 2000. Vol. 41, №7. P. 1041–1056.
3. Pearce J.A. Statistical analysis of major element patterns in basalts // J.Petrol. 1976. Vol. 17, № 1. P. 15–43.
4. Pearce J.A. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks / J.A. Pearce, N.B.W. Harris, A.G. Tindle // J. Petrol. 1984. Vol. 25, № 4. P. 956–983.
5. Козлов Н.Е. Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере Лапландских гранулитов): автореф. дисс. ... д.г.-м.н. СПб.: ИГГД, 1995. 36 с.
6. Моделирование условий формирования и эволюции докембрийских комплексов на основе изучения геологии вещественного состава слагающих их породных ассоциаций / Н.Е. Козлов, А.А. Иванов, Е.В. Мартынов, А.А. Преодовский // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т. 3. Новые идеи и подходы к изучению геологических образований. Апатиты: Изд-во «Полиграф», 2002. С. 96–110.
7. Козлов Н.Е. Черты петрогеохимических различий основных пород энсиалических и энсиматических комплексов (сравнительный анализ фанерозоя и докембрия) / Н.Е. Козлов, Е.В. Мартынов, А.А. Иванов. Геохимия. 1999. № 6. С. 582–588.
8. Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М.: Недра, 1976. 275 с.
9. Богатилов О.А. Магматическая эволюция островных дуг / О.А. Богатилов, А.А. Цветков. М.: Наука, 1988. 248 с.
10. Козлов Н.Е. К вопросу о первичной природе метаморфитов Лапландского гранулитового пояса (Балтийский щит) / Н.Е. Козлов, Е.В. Мартынов // Геохимия. 1992. № 1. С. 128–133.
11. Розен О.М. Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // Геотектоника. 2003. № 3. С. 3–21.
12. Левицкий И.В. Геохимия гранулитовых и зеленокаменных комплексов присаянского выступа фундамента Сибирской платформы: автореф. дисс. ... к.г.-м.н. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2012. 23 с.
13. Теория развития Земли (происхождение, эволюция и трагическое будущее) / О.Г. Сорохтин, Дж.В. Чилингар, Н.О. Сорохтин. М.; Ижевск: Изд-во «Институт компьютерных исследований», 2010. 751 с.
14. Кеонджян В.П. Модель гравитационной дифференциации недр планет / В.П. Кеонджян, А.С. Монин // ДАН СССР. 1975. Т. 220, № 4. С. 825–828.
15. Кеонджян В.П. Расчет эволюции недр планет / В.П. Кеонджян, А.С. Монин // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 4. С. 3–13.
16. Смолькин В.Ф. Коматитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. СПб.: Наука, 1992. 272 с.
17. Козлов Н.Е. Гранулитовые пояса докембрия и некоторые аспекты петрогеохимической эволюции протосубдукционных зон в ходе развития Земли / Н.Е. Козлов, Е.В. Мартынов // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 12. С. 105–112.
18. Геология Архей Балтийского щита / Н.Е. Козлов, Н.О. Сорохтин, В.Н. Глазнев, Н.Е. Козлова, А.А. Иванов, Н.М. Кудряшов, Е.В. Мартынов, В.А. Тюремнов, А.В. Матюшкин, Л.Г. Осипенко. СПб.: Наука, 2006. 329 с.

## Сведения об авторах

*Козлов Николай Евгеньевич* – д.г.-м.н., профессор, зав. лабораторией ГИ КНЦ РАН, директор АФ МГТУ; e-mail: kozlovne@afmgtu.apatity.ru

*Мартынов Евгений Васильевич* – к.г.-м.н., старший научный сотрудник ГИ КНЦ РАН; e-mail: mart@afmgtu.apatity.ru

*Сорохтин Николай Олегович* – д.г.-м.н., главный научный сотрудник Института Океанологии РАН, ведущий научный сотрудник ГИ КНЦ РАН; профессор кафедры геологии и полезных ископаемых АФ МГТУ; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

УДК 622'17:627.514(470.21)

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕЛЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

**А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Н.А. Калашник**

Горный институт КНЦ РАН

### Аннотация

Выполнены режимные георадарные исследования структуры дамбы хвостохранилища в целях идентификации фильтрационно-деформационных процессов в ее теле. За период наблюдений, составивший около двух месяцев, выделено три типа состояния и различной фильтрационной неоднородности грунтов дамбы: незначительного понижения уровня воды; значительного понижения уровня воды и практически без изменения. Выявлена и прослежена в динамике зона подпочвенного суффозионного размыва грунтов.

### Ключевые слова:

*георадарные исследования, дамба, фильтрационно-деформационные процессы, суффозионный размыв.*



Основные гидротехнические сооружения на горно-обогатительных предприятиях являются их обязательным компонентом и представляют собой систему хвостохранилищ и ограждающих их дамб. По мере накопления отходов в хвостохранилищах происходит заполнение их емкостей, и предприятия вынуждены создавать новые. Вместе с

тем, «старые» хвостохранилища представляют собой конгломерат полезного компонента и являются, по-сути дела, рукотворными или техногенными месторождениями. Так, первое поле хвостохранилища Ковдорского ГОКа, куда складировались хвосты обогащения с 1962 г., начиная с 1995 г. разрабатывается комбинатом с определенным экономическим дивидендом. Были разработаны специальные технологии и схемы добычи и переработки хвостов, и к настоящему времени отработка поля №1 подходит к завершающей стадии. Но в последнее время проявились серьезные проблемы, среди которых особое место занимает высокая влажность разрабатываемых хвостов вследствие попадания сюда части стока ручья Можель, а также усилившейся фильтрации воды через тело дамбы [1].

Было принято решение усилить внимание и исследовать фильтрационные процессы через тело дамбы, разделяющей 1-е и 2-е поля хвостохранилища, т.к. к концу 2012 г. фильтрация значительно усилилась и даже локально привела к размывам нижнего склона. Более того, возникла опасность сильных протечек, перетекания содержимого поля №2 в поле №1 и затопления добычных участков. В этих целях выполнены исследования состояния дамбы и фильтрационных процессов в ее теле методами георадиолокационного зондирования и профилирования [2–4].

На рис. 1 представлена схема дамбы, на которой отмечены зоны размыва и протечек, выявленные на основе визуального обследования дамбы. Опасная зона охватывает нижний склон дамбы в интервале от 3ПК до 6ПК и, локально, в районе 8ПК. Следует заметить, что этому предшествовало поднятие уровня грунтовых вод, зафиксированное пьезометрическими измерениями (местоположения пьезометров указаны на схеме рис. 1). Поэтому георадарные определения производились в интервале от 2ПК до 8ПК по продольному профилю длиной 540 м, а в зонах интенсивных протечек – дополнительно поперечными профилями, исходя из доступной ширины полки уступа, от 6 до 15 м.

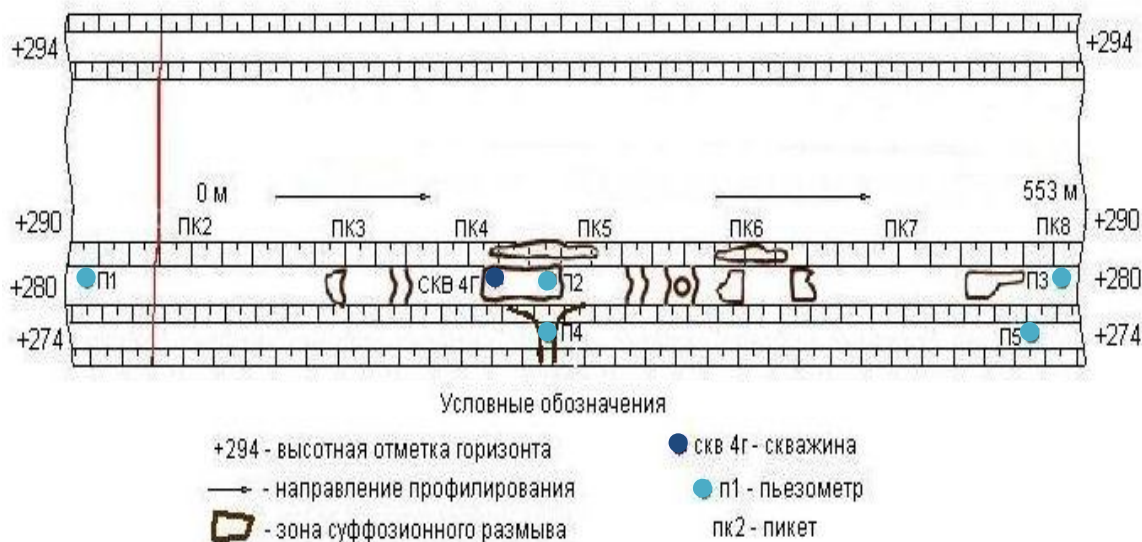


Рис. 1. Схема дамбы, разделяющей поля № 1 и 2 хвостохранилища

На рис. 2 приведена радарограмма, полученная по результатам продольного профилирования, на которой в результате ее интерпретации условными обозначениями показаны выявленные дислокации и неоднородности, а также уровень грунтовых вод в теле дамбы. Для сохранения одинакового вертикального и горизонтального масштабов радарограмма представлена в виде узкой ленты, что в целом позволило сохранить общую информативность картины. Из радарограммы следует, что глубина уровня грунтовых вод на период измерений составляла около 5–6 м (на разных участках), в теле дамбы имеется ряд дифрагирующих объектов (резко отличающихся по физико-механическим характеристикам от слагающих дамбу грунтов) и выделяются несколько зон неоднородностей и суффозионного размыва.

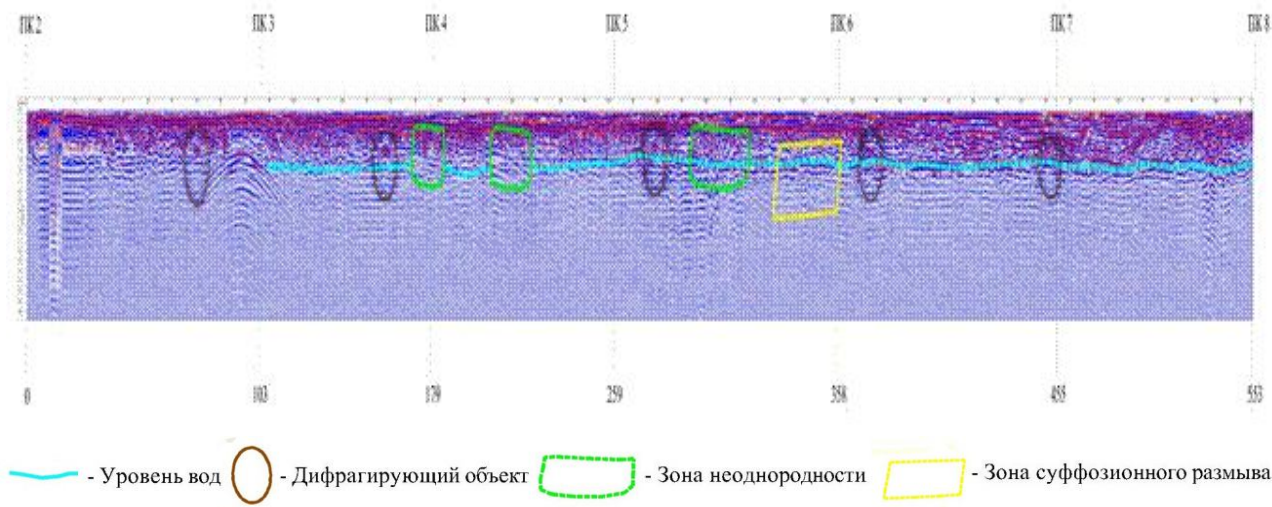


Рис. 2. Интерпретированная радарограмма продольного профиля дамбы

На графиках, построенных по данным еженедельных георадарных определений (рис. 3), выделены 3 типа состояния и различной фильтрационной неоднородности грунтов:

1-й – зоны, в которых произошло понижение уровня воды на 0.2–0.6 м;

2-й – зоны, в которых произошли понижения уровня воды на 0.6–1.0 м и более (возможно, связанные с зонами размыва);

3-й – зоны, в которых уровень воды понизился незначительно или даже повысился (возможно, вследствие наличия или искусственно созданных водоупоров (подсыпка грунта на гор. +272м). Удельный вес общей протяженности таких зон для участков измерений (ПК2–ПК8) составляет: 1-го – 49%, 2-го – 34%, 3-го – 17%.

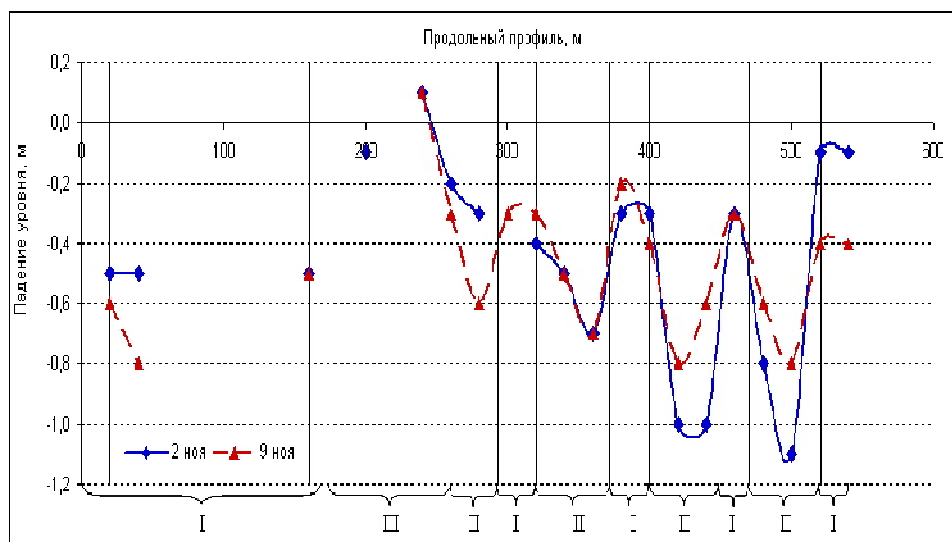


Рис. 3. Изменение уровня вод в теле дамбы со 2 (9) ноября по 24 декабря 2012 г.

Для анализа динамики уровня подземных вод в выделенных зонах 1 и 2 построены графики изменения глубины уровня по наиболее характерным интервалам продольной оси дамбы за двухмесячный период наблюдений (рис. 4 а). Анализ этих графиков позволяет утверждать, что, по всей видимости, эти зоны сформировались фактически в первую половину ноября. В последующем, до начала декабря, уровень воды в зонах 1 и 2 изменялся практически на одну и ту же величину, как в сторону понижения, так и поднятия, затем изменения уровня воды в зоне 2 стали более интенсивными. Об этом также свидетельствует график скорости изменения положения уровня (рис. 4 б).

а

б

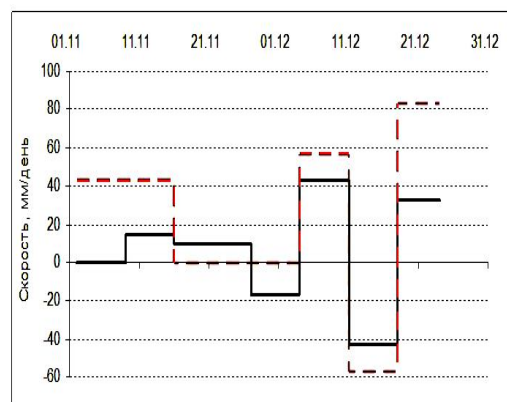
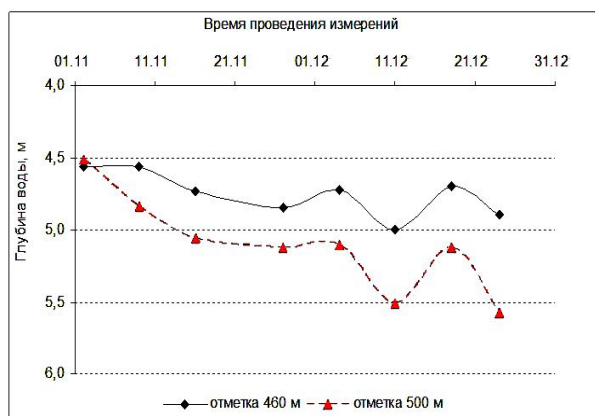


Рис. 4. Динамика уровня грунтовых вод по наиболее характерным отметкам продольной оси дамбы



Георадарными определениями были определены несколько зон неоднородностей в теле дамбы (см. рис. 1). На рис. 5 приведены радарограммы, на которых идентифицирована и прослежена в динамике развития зона суффозионного размыва. Первоначальными измерениями 2 ноября (рис. 5 а) было определено, что структура данного участка дамбы является относительно однородной и уровень грунтовых вод располагался на глубине 4.5–5.0 м. Спустя неделю, 9 ноября (рис. 5 б), измерениями выявлено изменение картины ниже уровня грунтовых вод, а 16 ноября (рис. 5 в) установлено общее изменение волновой картины, к наиболее существенным отличиям которой следует отнести «прерывистость» или «размытость» уровня грунтовых вод на интервале около 10 м. Последующими определениями (рис. 5 г-з) была прослежена общая динамика формирования суффозионного размыва, протяженностью до 10 м и захватывающего участок дамбы фактически от поверхности до глубины около 8 м.

Таким образом, выполненные режимные георадарные исследования позволили выявить в теле дамбы зоны неоднородности, в том числе связанные с фильтрационно–деформационными процессами, и проследить динамику формирования суффозионного размыва.

За период наблюдений, составивший практически 2 месяца, глубина уровня воды как повышалась (до 0.3 м), так и понижалась (до 1.0 м и более) с общей тенденцией к понижению. По состоянию на 24 декабря (восьмой цикл измерений (рис. 5 з) глубина уровня воды понизилась: на 0.5 м на интервале 0–160 м (от ПК2), на 0.1–0.2 м на интервале 160–260 м, на 0.3 м на интервале 280 м, на 0.4 – на 320 м, на 0.5 –на 340 м, на 0.7 –на 360 м. На интервале 380–400 м понижение составило всего 0.3 м, а на 420–440 м и 480–500 м – скачкообразно, 1.0 м. На остальных интервалах от 460 до 540 м уровень понизился на 0.1–0.3 м. Это свидетельствует о зональной фильтрационной неоднородности слагающих грунтов дамбы.

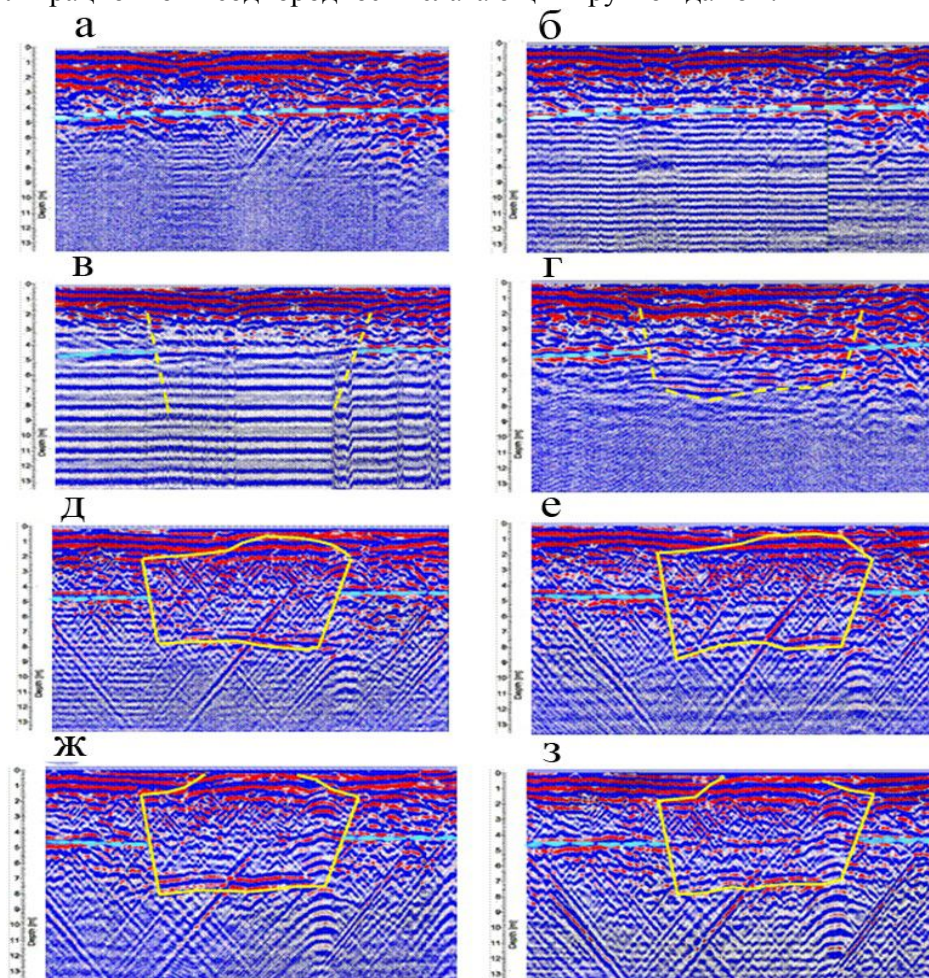


Рис. 5. Фрагменты продольных профилей на интервале от ПК6-35 до ПК6:  
а – 2 ноября; б – 9 ноября; в – 16 ноября; г – 27 ноября; д – 4 декабря; е – 11 декабря;  
ж – 18 декабря; з – 24 декабря 2012 г.

По результатам исследований выделено 3 типа состояния и различной фильтрационной неоднородности грунтов дамбы: 1-й – зоны, в которых произошло понижение уровня воды на 0.2–0.6 м; 2-й – зоны, в которых произошло понижение уровня воды на 0.6–1.0 м и более (возможно, вследствие локальных протечек); 3-й – зоны, в которых уровень воды понизился незначительно или даже повысился (возможно, вследствие наличия или искусственно созданных водоупоров (подсыпка грунта на гор. +272м). Удельный вес общей протяженности таких зон для участков измерений (ПК2–ПК8) составляет: 1-го – 49%, 2-го – 34%, 3-го – 17%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт проектирования усреднительно-осушительных складов при добыче лежалых хвостов на ОАО «Ковдорский ГОК» / С.П. Решетняк, А.В. Архипов, Э.Б. Красносельский, А.А. Данилкин // Глубокие карьеры: сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. 18–22 июня 2012г. Апатиты. СПб., 2012. С. 259–263. 2. Подповерхностное георадарное зондирование горно-геологических сред Кольского полуострова / А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, А.Ю. Дьяков, А.Ю. Демахин // Вестник МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. университета. 2009. Т.12, № 4. С. 576–583. 3. Мельников Н.Н. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 3. С.4–8. 4. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.

#### Сведения об авторах

Калашник Анатолий Ильич – к.т.н., зав. лабораторией; e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Запорожец Дмитрий Владимирович – ведущий инженер; e-mail: zaporojec@goi.kolasc.net.ru

Калашник Надежда Анатольевна – научный сотрудник; e-mail: nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

УДК 536.322

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

П.В. Амосов

Горный институт КНЦ РАН

#### Аннотация

Методами численного моделирования анализируется известный способ сброса тепловыделений с борта космического аппарата посредством холодильников-излучателей. Представлены примеры численного решения тепловой задачи с определенным набором варьируемых параметров (материал, размеры, коэффициент черноты поверхности). Для минимальной температуры пластины выполнено сравнение результатов численного моделирования и оценок по аналитической зависимости при удовлетворительном согласии. Для железной пластины продемонстрированы влияния длины, толщины, коэффициента черноты на величину минимальной температуры.

#### Ключевые слова:

излучение в вакуум, численное моделирование, теплофизические параметры.



#### Введение

Методами численного моделирования анализируется известный способ сброса тепловыделений с борта космического аппарата посредством холодильников-излучателей. До сих пор, с повышением бортовой энерговооруженности, внимание к обеспечению энергетического баланса не ослабевает [1–4].

#### Постановка задачи

В отличие от работы [1], где анализируются методы аналитического расчета распределения температуры для плоской излучающей пластины, в настоящем исследовании продемонстрированы возможности методов численного моделирования для решения следующей тепловой задачи.

Рассматривается элемент конструкции холодильника-излучателя [1], состоящего из трубки с плоскими ребрами, по которой циркулирует теплоноситель (рис. 1). Так же, как и в работе [1],

не учитывается влияние на температурное распределение лучистого потока со стороны небесных тел. Используется двухмерная модель (характерные поперечные размеры указаны, например, в работе [5]). Левая граница излучающей в вакуум поверхности поддерживается при постоянной температуре  $T_0$  (900 К), а для правой границы принято условие нулевого потока (в силу симметрии инженерной конструкции и малой толщины излучающей пластины [1]). На верхней и нижней поверхностях пластины «работает» условие радиационного теплообмена в вакуум.

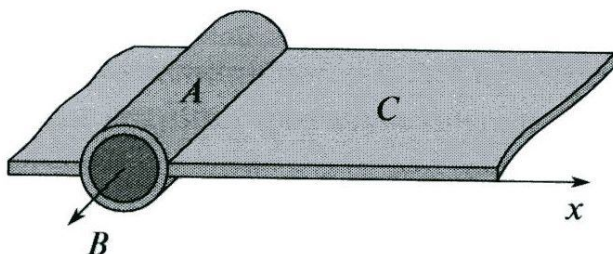


Рис. 1. Элемент конструкции холодильника-излучателя: *A* – трубка, по которой циркулирует теплоноситель *B*; *C* – плоское ребро [1]

Все приведенные решения получены для стационарной задачи с учетом зависимостей теплофизических параметров материалов пластины от температуры, заложенных

разработчиками программного продукта COMSOL.

### Результаты расчетов и их анализ

Исследования выполнены в 2 этапа. На первом этапе для пластины длиной  $L$  (1 м) и толщиной  $d$  (0.004 м) проварьирован материал. Коэффициент черноты  $\varepsilon$  поверхностей пластины (верхней и нижней) принят равным единице. Рассмотрены материалы, которые при комнатной температуре попарно имеют близкие значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ : алюминий и магний, железо и платина, цирконий и титан. Численные эксперименты выполнены на нормальных сетках с использованием стандартного прямого решателя UMFPACK.

В табл. 1 и на рис. 2 представлены некоторые результаты численных экспериментов. В частности, в табл. 1 приведены минимальные значения температуры  $T_{\min}$  на правой границе пластины из разных материалов. Поведение кривых пространственного распределения температуры  $T(x)$  вдоль продольной оси (рис. 2) качественным образом хорошо соответствует характерному распределению температуры на пластине, приведенному в работе [1] (см. рис. 3).

Таблица 1

Значения минимальных температур в излучающей пластине из разных материалов

Материал	алюминий	магний	железо	платина	цирконий	титан
Температура, К	218	212	174	167	121	119

Естественно, что каждая кривая может быть описана наиболее подходящей аналитической зависимостью. Например, для железа (именно для него будут выполнены все дальнейшие расчеты на втором этапе) пунктирная кривая может быть аппроксимирована с коэффициентом достоверности 0.982 посредством степенной функции типа:

$$T(x) = 1668x^{-0.386} \quad (0 < x \leq 1 \text{ м}).$$

Значение минимальной температуры на правой границе пластины может быть количественно проверено посредством формулы (1), полученной авторами работы [1]:

$$T_0 = T_{\min} \left( 1 + kT_{\min}^3 L^2 / 2 + k^2 T_{\min}^6 L^4 / 6 + 13k^3 T_{\min}^9 L^6 / 180 + 23k^4 T_{\min}^{12} L^8 / 720 + \dots \right), \quad (1)$$

где  $k = 2\sigma\varepsilon / (\lambda d)$ ,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Здесь возникает вопрос о значении коэффициента теплопроводности, который следует принимать в оценках. Дело в том, что согласно Справочнику [6] значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов, обозначенных на рис. 2, существенно зависят от

температуры (см. табл. 2), а в оценках авторов работы [1] значение коэффициента теплопроводности принимается постоянным.

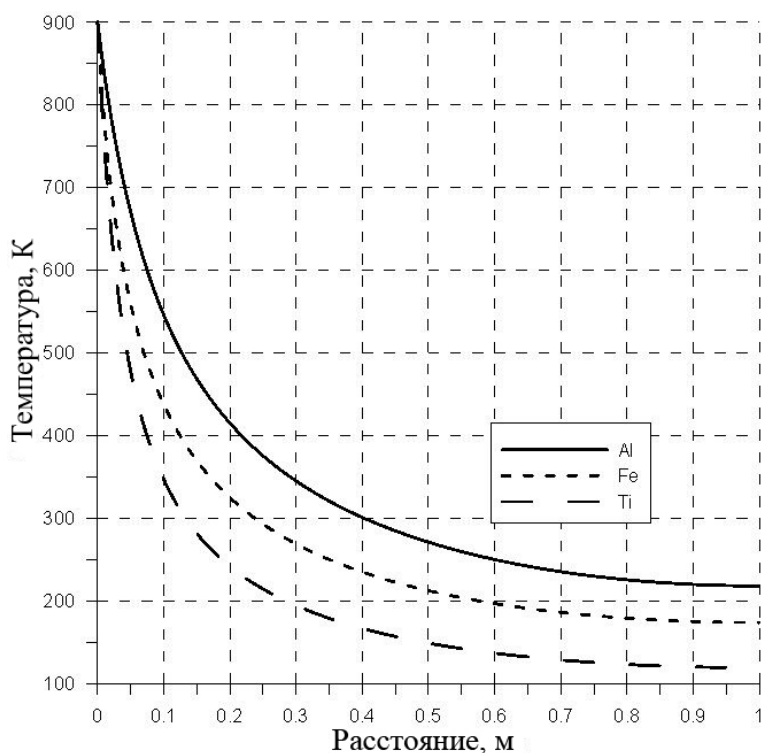


Рис. 2. Пространственное распределение температуры в излучающих пластинах

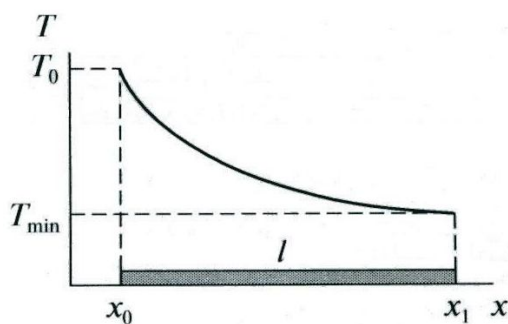


Рис. 3. Характерное распределение температуры на пластине [1]

Таблица 2

Зависимость теплопроводности материалов от температуры, Вт/(мК) [6]

Материал	Температура, К					
	200	300	400	600	800	1000
алюминий	237	237	240	230	220	жидкость
железо	94	80	70	55	43	32
титан	25	22	20	19	20	21

Примечание. Выполнены оценки для двух значений температуры: 300 К и 800 К.

Результаты решения приведенного выше уравнения с пятью членами ряда формулы (1) и расчетные значения численной модели сведены в табл. 3.

Значения минимальных температур пластины,  
полученные посредством аналитического и численного решения, К

Материал	Аналитическая оценка по формуле (1)		Численный эксперимент
	300 К	800 К	
алюминий	253	248	218
железо	187	156	174
титан	129	125	119

По мнению автора, имеются все основания полагать, что определенная согласованность результатов аналитических оценок и результатов численного моделирования прослеживается. Например, для алюминия максимальное различие в оценках составляет  $\sim 30$  К ( $\sim 15\%$ ), для железа и титана разница в минимальной температуре уже меньше ( $\sim 10\%$ ). Причем для железа имеем разнознаковое отклонение. Напомним, что при численном моделировании учтены зависимости значений теплофизических параметров материалов от температуры.

На втором этапе исследований в качестве параметров варьирования для дальнейшего анализа минимальной температуры  $T_{\min}$  только железной пластины выбраны следующие:

толщина пластины – 0.004, 0.002 и 0.001 м (длина 1 м и коэффициент черноты 1);

длина пластины – 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 и 1.50 м (толщина 0.004 м и коэффициент черноты 1);

коэффициент черноты поверхности – 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 и 1.0 (длина 1 м и толщина 0.004 м).

Результаты расчетов сведены в таблицы 4–6. Оказалось, что представленные численные значения удачно (значение  $R^2$  близко к единице) описываются квадратичными зависимостями:

для толщины пластины  $d$ , м:

$$T_{\min}(d) = -4 \cdot 10^6 d^2 + 36500d + 84, (0,001 \leq d \leq 0,004 \text{ м});$$

для коэффициента черноты  $\varepsilon$ , -:

$$T_{\min}(\varepsilon) = 58,93\varepsilon^2 - 159,82\varepsilon + 275, (0,5 \leq \varepsilon \leq 1,0);$$

для длины пластины  $L$ , м:

$$T_{\min}(L) = 88L^2 - 288,4L + 373,8, (0,50 \leq L \leq 1,50 \text{ м}).$$

Таблица 4

Значения минимальных температур в железной пластине при вариации ее толщины

Толщина, м	0.004	0.002	0.001
Температура, К	174	143	117

Таблица 5

Значения минимальных температур в железной пластине  
при вариации коэффициента черноты поверхности

Коэффициент черноты	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Температура, К	174	179	185	192	200	210

Таблица 6

Значения минимальных температур в железной пластине при вариации ее длины

Длина, м	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
Температура, К	253	204	174	153	138

Представляется, что определенный интерес может иметь информация о тепловом потоке  $q(x)$  с поверхности пластины. На рис. 4 изображены кривые, описывающие пространственное распределение полного теплового потока на нижней границе пластины (ось ординат выбрана в

логарифмическом масштабе). Очевидно, что такие же распределения должны иметь место и на верхних границах. Как видно из приведенных на рис. 4 кривых, диапазон изменения теплового потока по длине пластины существенный (от  $10$  до  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>). С достоверностью аппроксимации 0.9212 кривая плотности потока для железной пластины описывается экспоненциальной функцией вида  $q(x) = 2,12 \cdot 10^5 \exp(-5,086x)$  ( $0,0 \leq x \leq 1,0$  м). Можно отметить также весьма слабое влияние на величину теплового потока параметра толщины пластины (за исключением области вблизи левой границы).

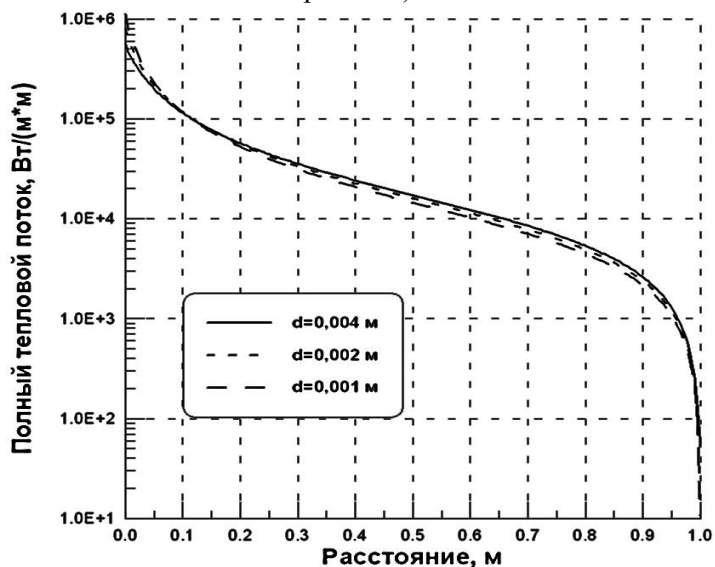


Рис. 4. Пространственное распределение полного теплового потока на нижней границе пластины при вариации ее толщины

В заключение автор хотел бы отметить широкие возможности численного моделирования для исследования тепловых процессов применительно к описываемой задаче. Результаты численных экспериментов не противоречат законам физики и достаточно хорошо описываются простыми аналитическими соотношениями, которые, возможно, будут полезны конструкторам в инженерных расчетах. Переход к трехмерным моделям, на взгляд автора, не

должен привести к существенным трудностям в их реализации.

Относительно предложенного в работе [1] аналитического решения можно заметить, что в Справочнике по обыкновенным дифференциальным уравнениям [7] в п. 6.58 указаны пути решения аналогичного дифференциального уравнения при соответствующем выборе коэффициентов, что, в принципе, можно использовать для сравнения.

## Выводы

Представлены примеры численного решения тепловой задачи для излучающей пластины с определенным набором варьируемых параметров (материал, размеры, коэффициент черноты поверхности). Для минимальной температуры пластины выполнено сравнение результатов численного моделирования и оценок по аналитической зависимости. Согласие с учетом особенностей методов исследования вполне удовлетворительное. Для железной пластины продемонстрированы влияния длины, толщины, коэффициента черноты на величину минимальной температуры, а также пространственное распределение теплового потока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаева Ю.О. Аналитический расчет распределения температуры излучающей пластины / Ю.О. Ермолаева, Р.Н. Ризаханов, С.К. Сигалаев // Известия РАН. Энергетика. 2012. №5. С. 138–143.
2. Ядерные ракетные двигатели / А.С. Коротеев, Ю.Г. Демянко, Г.В. Конюхов и др. М., 2001. 416 с.
3. Ракетные двигатели и энергетические установки на основе газозатопленного ядерного реактора / А.С. Коротеев, А.Б. Пришлецов, В.М. Мартишин, А.А. Павельев. М., 2002. 431 с.
4. Коротеев А.А. Капельные холодильники-излучатели космических энергетических установок. М., 2008. 184 с.
5. Фаворский О.Н. Вопросы теплообмена в космосе / О.Н. Фаворский, Я.С. Каданер. М., 1967. 248 с.
6. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. М., 1991. 1232 с.
7. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., 1976. 576 с.

## Сведения об авторе

Амосов Павел Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник; e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

## О СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ АВАРИЙ ПРИ ШЕЛЬФОВОЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧЕ

**Н.А. Калашник**

Горный институт КНЦ РАН

### Аннотация

Рассмотрены наиболее характерные случаи чрезвычайных ситуаций и аварий при шельфовой нефтегазодобыче. Выполнен статистический анализ событий и вызванный ими социально-экономический ущерб. Предложены методические подходы к экономической оценке последствий аварийных ситуаций и ожидаемой прибыли нефтегазопромысла с учетом риска чрезвычайных ситуаций и аварий.

### Ключевые слова:

*нефтегазодобыча, шельф, аварии, социально-экономические последствия.*



Добыча нефти и газа, как известно, ведется не только на суше, но и на шельфе морей (Мексиканский залив, Северное и Норвежское, Каспийское, Охотское моря, Персидский залив, побережье Северной Америки и другие регионы). В мировом объеме морская (шельфовая) нефтегазодобыча к настоящему времени превысила 30% и в перспективе должна увеличиться до 50% [1]. При этом ежегодные суммарные затраты на освоение ресурсов нефти и газа на шельфе морей превышают 80 млрд долл., из которых около 25% идут на поисково-разведочные работы и до 60–80% – на содержание и установку платформ, буровое и эксплуатационное оборудование, строительство скважин, строительство подводных трубопроводов и пр. Экономический эффект от разработки морских месторождений в США и Мексиканском заливе составляет до 10 долларов на каждый затраченный доллар, при сроках окупаемости капитальных вложений от 1 до 3 лет. Для арктических условий, по мнению авторов работы [1], экономический эффект втрое ниже, а срок окупаемости увеличивается до 10–20 лет.

Вместе с тем, мировой опыт показывает, что на морских нефтегазопромыслах по разным причинам возникают чрезвычайные ситуации и аварии, которые приводят к социально-экономическим последствиям в виде непредвиденных сверхпланируемых финансовых затрат и ущерба. Это обусловлено прежде всего особенностями освоения шельфовых и морских нефтегазовых месторождений, среди которых можно выделить следующие:

- используются специальные дорогостоящие сооружения (платформы различных видов, эстакадные площадки, специальные суда, плавучие эксплуатационные палубы, подводные модули и другие) и технические средства, обеспечивающие функционирование нефтегазопромысловых объектов, добычу, временное хранение и трубопроводное транспортирование углеводородного сырья по дну моря. Повреждения и потеря функциональности этих сооружений требуют ремонта и дополнительных финансовых затрат для вывода их на рабочий режим и ликвидацию последствий аварий;

- нефтегазопромысловые объекты постоянно подвергаются значительным внешним нагрузкам: движение воды (течения, волны, приливные явления), ветровые нагрузки, ледовые нагрузки и айсберги (для арктических морей), природные и вызванные извлечением нефти/газа деформационные процессы, сейсмические явления и др., которые могут создавать чрезвычайные ситуации, вплоть до аварий. Для снижения воздействия этих нагрузок необходимо применение специальных защитных сооружений и превентивных мероприятий, что приводит к удорожанию проекта в целом;

- весь комплекс нефтегазопромысловых работ концентрируется в жестко ограниченном пространстве (например, на платформе) и выполняется в стесненных условиях в автономном, зачастую весьма удаленном от обеспечивающих береговых структур, режиме. Жизнеобеспечение персонала, работ и нефтегазовых объектов в целом также требует дополнительных финансовых затрат;

- используемые на шельфовых нефтегазовых объектах скважины и трубопроводы очень чувствительны к незначительным деформациям и смещениям, причем сложности в материально-

техническом обеспечении и их труднодоступность делают даже обычные простои или ремонтные работы такого оборудования весьма дорогостоящими (свыше 150 тыс. долл. в день), а в случае аварии приводят к значительным социально-экономическим последствиям.

Накопленный к настоящему времени мировой опыт морских (шельфовых) нефтегазовых разработок [2, 3] показывает, что количество аварийных ситуаций на платформах, сооружениях для добычи и хранения углеводородов, скважинах, трубопроводах и др., составляет около 3 тыс. случаев, а экономический ущерб превышает 43 млрд долл. (рис. 1).

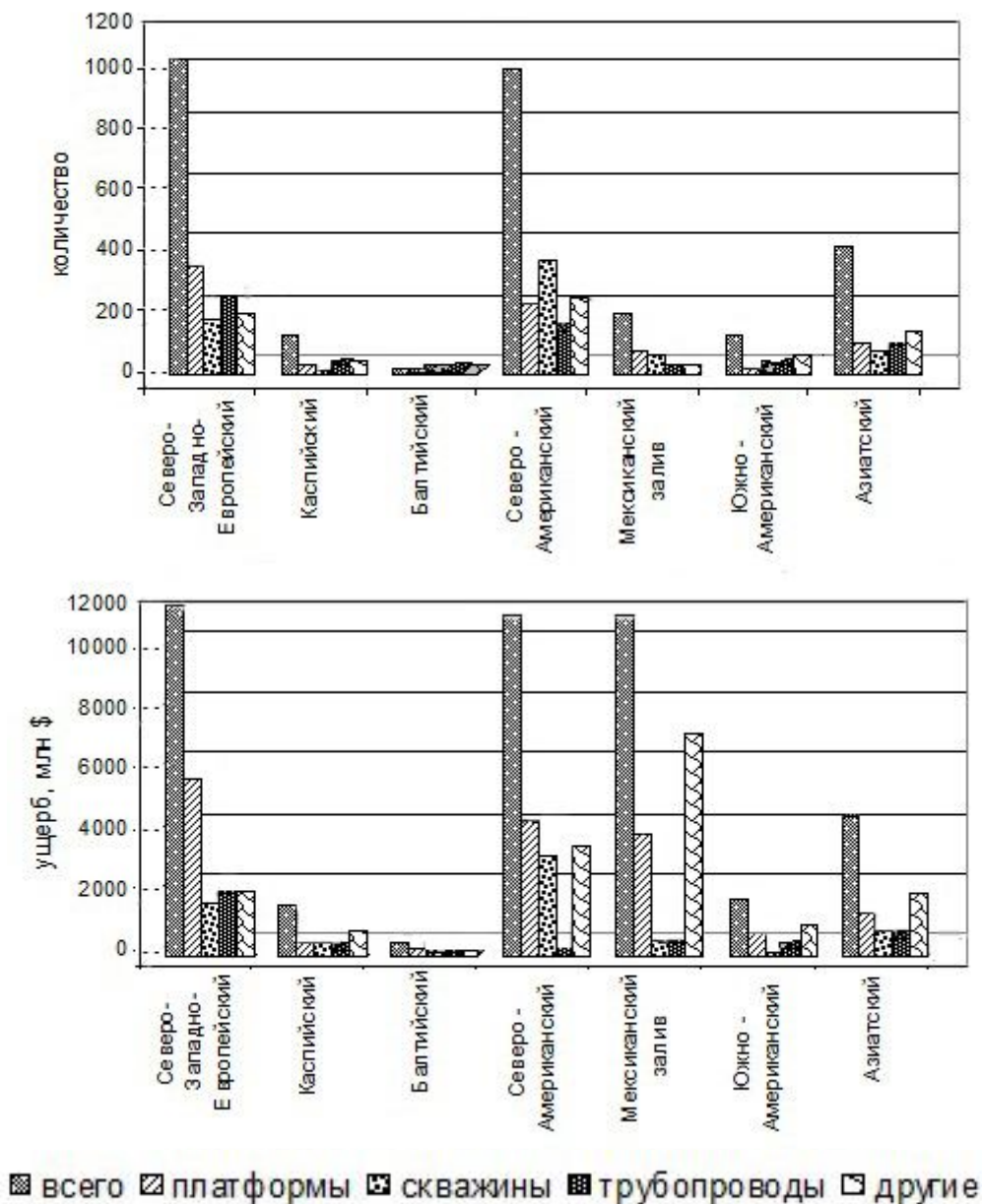


Рис. 1. Количество аварий на нефтегазобъектах и ущерб от них по основным регионам морского нефтегазопромысла

Анализ влияния различных факторов на возникновение аварийных ситуаций на морских нефтегазопромыслах показывает, что наибольшее число аварий произошло за счет потери устойчивости, повреждений и разрушений конструкций (36%), тяжелых погодных условий (7%), удара (5%) и др. факторов [4]. При этом отмечено, что фактически по каждой пятой и более аварийной ситуации причина неизвестна (22%).

Наиболее ярким примером является месторождение Экофиск, разрабатываемое в Северном море, на котором за более чем 30 лет добычи произошло проседание морского дна над центральной



частью месторождения на глубину более 7 м, приведшее к значительным техническим и экономическим последствиям. Вследствие проседания морского дна, основания ряда платформ и внешняя стенка нефтехранилища оказались недопустимо низкими по отношению к уровню моря, и потребовалось провести работы по наращиванию и подъему оснований платформ и возведению дополнительной, более высокой, внешней стены нефтехранилища. Значительное проседание дна моря также привело к деформации и повреждениям уложенных на дне моря трубопроводов и конструкций. За несколько лет было выполнено свыше 70 повторных ремонтных работ на эксплуатационных скважинах, направленных на ликвидацию разрывов в зонах цементирования, сплющивания или разрушения обсадных труб. По разным оценкам, затраты на выполнение этих работ превысили 400 млн долл. США [3].

Другой характерный пример, получивший широкую мировую огласку и приведший к огромным экологическому и социально-экономическому ущербу, – авария в Мексиканском заливе на платформе Deepwater Horizon, принадлежащей британской компании British Petroleum [5]. Платформа Deepwater Horizon представляла собой буровую установку 5-го поколения, RBS-8D дизайна, предназначенную для сверхглубоководного морского бурения на перспективном слое Макондо в 80 км от юго-восточного побережья Луизианы. Установка должна была произвести начальное бурение, после чего другие установки предназначались использовать для добычи нефти из этой скважины. Платформа обслуживалась экипажем из 130 чел. 20 апреля 2010 г. произошел выброс из скважины и взрыв метана, в результате чего буровая загорелась. Попытки потушить пожар были неудачными, и 22 апреля, после 36-часового пожара, Deepwater Horizon затонула и опустилась на дно залива на глубину 1.5 тыс. м в 400 м к северо-западу от пробуренной скважины. Вследствие аварии 11 чел. погибли, 17 получили ранения. В воды залива из скважины вытекло почти 5 млн баррелей нефти. На поверхности воды образовалось нефтяное пятно, которое постепенно достигло береговой линии всех пяти штатов, расположенных на побережье Мексиканского залива. На сегодняшний день убытки British Petroleum составили уже 12 млрд долл. на ликвидацию последствий экологической катастрофы и компенсации потерпевшим. Образовавшийся в результате разлива нефти был признан самой масштабной экологической катастрофой в истории США.

В целом анализ показал, что более трети от общего числа аварий – на платформах, но в силу более высокой стоимости оборудования и самой платформы суммарный объем убытков превысил 50% от общего объема [4]. Аварии на трубопроводах также являются довольно частым явлением (свыше 25% от общего числа), а суммарный объем убытков составил около 18% .

Анализ аварий на морских промыслах Северо-Западно-Европейского региона показал, что наибольшее число случаев произошло на платформах (34%) и на трубопроводах (25%). Также подвержены чрезвычайным ситуациям и авариям скважины, в особенности те, которые оснащены устьевым оборудованием (19%) (рис. 2).

Уместно отметить, что скважины, являясь ключевым элементом добычи углеводородного сырья, представляют собой наиболее уязвимый элемент нефтепромысла. На бурение скважин различного назначения разведывательными и нефтегазодобывающими компаниями ежегодно тратится около 20 млрд долл. [6]. Значительная часть этих средств, порядка 15%, уходит на разрешение возникающих осложнений (проблем) при бурении: потери раствора и оборудования, потеря устойчивости стенок скважин и пр. Убытки, которые терпят нефтегазовые компании вследствие неустойчивости стенок скважин, оцениваются в 1 млрд долл. ежегодно [6]. В среднем (в расчете на одну скважину) убытки от простоев, связанных с потерей ее устойчивости, составляют около 1.5 млн долл., достигая в экстремальных случаях (Deepwater Horizon) 12 млрд долл. Прогноз и предотвращение этих нежелательных осложнений позволят значительно сократить непроизводительные затраты на бурение и ремонт скважин.

Убытки вследствие аварий на морских нефтегазопромыслах в общем виде включают в себя 5 основных групп: 1) убытки, связанные непосредственно с разрушением объектов промысла и оборудования; 2) убытки за счет вылившихся нефтепродуктов, в том числе приводящие к потере извлекаемых запасов; 3) убытки вследствие недопоставки нефтепродуктов, в т.ч. за время ремонтно-восстановительных работ (так называемое «недополучение прибыли»); 4) убытки, обусловленные вынужденными затратами на ремонтно-восстановительные работы; 5) убытки, обусловленные вынужденными затратами на устранение (ликвидацию) последствий.

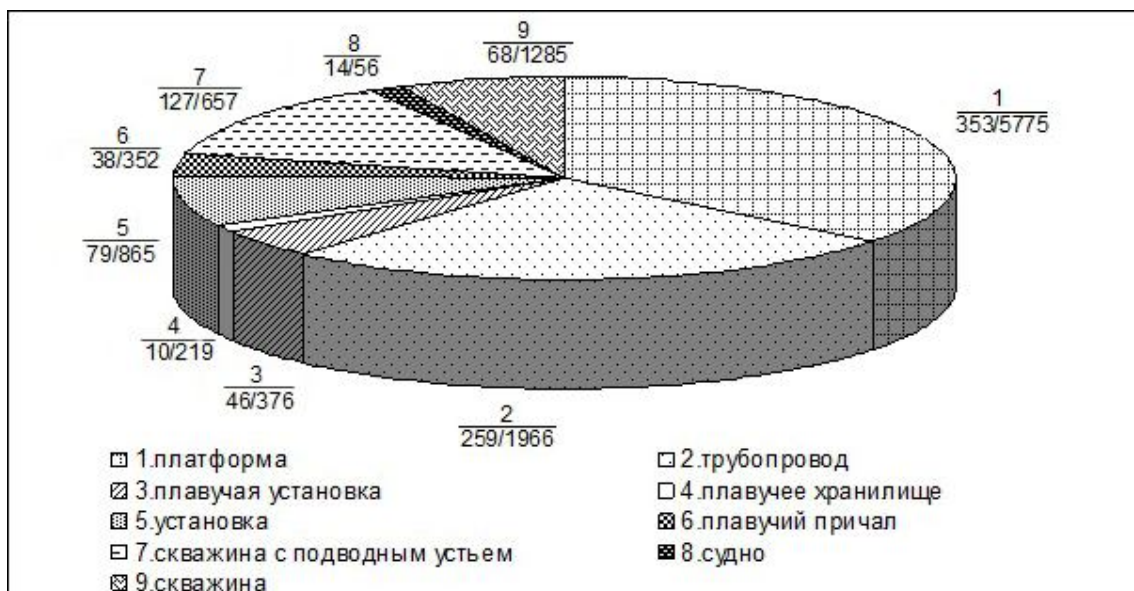


Рис. 2. Количество аварий/объемы общих убытков (млн долл.) от аварий различных категорий в Северо-Западно-Европейском регионе

Объем убытков может быть рассчитан по формуле, последовательно слева направо включающей в себя перечисленные выше группы убытков:

$$\sum Уб. = \sum C_o \cdot V_o + \sum C_n \cdot q_n^e \cdot t_a + \sum C_n \cdot q_n^h \cdot t_{ap} + \sum C_v \cdot V_v + \sum C_l \cdot V_l,$$

где  $Уб.$  – суммарные убытки вследствие чрезвычайной ситуации или аварии;

$C_o$  – удельная стоимость поврежденных объектов промысла и оборудования;

$V_o$  – объем повреждений объектов и оборудования;

$C_n$  – удельная стоимость нефтепродуктов;

$q_n^e$  – объем вылившихся (потерянных) нефтепродуктов;

$t_a$  – время от начала аварии до прекращения утечки;

$q_n^h$  – объем недопоставленных нефтепродуктов;

$t_{ap}$  – время от момента начала аварии до возобновления работы объекта и оборудования;

$C_v$  – удельная стоимость ремонтно-восстановительных работ;

$V_v$  – объем ремонтно-восстановительных работ;

$C_l$  – удельная стоимость работ по ликвидации последствий;

$V_l$  – объем социально-экологических последствий.

Реальные убытки могут быть определены только на основе фактических затрат, но прогнозные оценки могут быть выполнены, в частности, на основе методических подходов, изложенных в данной и других работах [например, 4, 7].

Исходя из вышеизложенного, для оценки ожидаемой прибыли нефтегазопромысла с учетом риска чрезвычайных ситуаций и аварий может быть предложена следующая зависимость:

$$Пр_{ож.} = Д_{ож.} - З_{кап.} - З_{тек.} - P_p \sum Уб.,$$

где  $Пр_{ож.}$  – ожидаемая прибыль;

$Д_{ож.}$  – ожидаемый доход;

$З_{кап.}$  – капитальные затраты;

$З_{тек.}$  – текущие затраты;

$P_p$  – вероятность риска;

$\sum Уб.$  – суммарные убытки вследствие чрезвычайной ситуации или аварии.

Таким образом, в данной работе рассмотрены социально-экономические последствия чрезвычайных ситуаций и аварий на морских нефтегазозаготовках, знание которых является важным для принятия проектных и технологических решений по освоению нефтегазовых месторождений, прежде всего, на шельфе Баренцева моря. Предложены методические подходы к экономической оценке последствий аварийных ситуаций и ожидаемой прибыли нефтегазопромысла с учетом риска чрезвычайных ситуаций и аварий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вяхирев Р.И. Обустройство и освоение морских нефтегазовых месторождений / Р.И. Вяхирев, Б.А. Никитин, Д.А. Мирзоев. 2-е изд. доп. М., 2002. 420 с. 2. Кайзер Марк Дж. Риски и потери при морской добыче / Марк Дж. Кайзер, Алан Г. Пулцифер // Oil&GasJournal. 2007. № 6. С. 96–105. 3. Мельников Н.Н. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2009. 140 с. 4. Калашник Н.А. Экономический ущерб от чрезвычайных ситуаций и аварий на морских нефтегазозаготовках: анализ и подходы к оценке // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2011. № 6. С. 15–19. 5. Разбор полетов по «возможно худшей» нефтяной катастрофе в истории США // Oil&GasJournal. 2010. № 11. С. 24–28. 6. Управление риском в бурении / У. Алдрид, Ш. Горайа, Д. Плам и др. // Нефтегазовое обозрение. Шлюмберже, весна 2001. С. 12–29. 7. Экономика предприятий нефтяной и газовой промышленности / В.Ф. Дунаев, В.А. Шпаков, Н.П. Епифанова и др. М., 2004. 372 с.

#### Сведения об авторе

Калашник Надежда Анатольевна – научный сотрудник, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

УДК 92+551.465.4

## МОРСКИЕ БИОЛОГИ – ХИМИИ ОКЕАНА

**Н.М. Адров**

Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

#### Аннотация

На примере биоокеанологических исследований рассмотрены главные показатели биогидрохимического режима водных масс – линейные связи концентрации растворенного кислорода и температуры воды, выявленные в различных слоях водной толщи океана. Предложена модель для оценки физических и биохимических составляющих термокислородной трансформации водных масс.

#### Ключевые слова:

*биогидрохимический режим, термокислородная трансформация, адвекция, конвекция, бюджет кислорода, гистерезис насыщения, термоксиклин.*



В течение двух последних лет отмечались две знаменательные даты: 150-летие Н.М. Книповича (2012) и 135-летие К.М. Дерюгина (2013) – двух выдающихся и особо почитаемых морских биологов – основателей биоокеанологических принципов исследования морской фауны и условий ее существования. О том, как представляли себе физические механизмы изменчивости морских вод классики биологии и их последователи, мы уже говорили в прошлой статье [1], где в качестве главных физических характеристик использовались температура воды и ее соленость, косвенно отражающие энергообмен водных и воздушных масс.

Поскольку физический механизм циркуляции морских вод подробно разбирался на примере работ биологов во главе с Н.М. Книповичем [2], то для рассмотрения химических характеристик возьмем следующего классика – Константина Михайловича Дерюгина (1878–1938), в целях комплексного изучения фауны беломорских, баренцевоморских и тихоокеанских вод исследовавшего распределение растворенных веществ и газов. Динамика всех гидрохимических характеристик, за исключением концентрации растворенного кислорода, довольно сложна и требует

очень много места для обсуждения, поэтому остановимся прежде всего (как и предлагал Константин Михайлович) на таких важнейших гидрологических элементах, как температура, соленость и кислород, оказывающих «первенствующее влияние» на распределение животного населения. Автор имел в виду, конечно, не только животное, но и растительное и бактериальное население, потому что триада продуценты–консументы–редуценты неразрывна из-за своих внутренних связей. Более того, «важнейшие гидрологические элементы» – температура и кислород – составляют главный дуэт – комплексный показатель биогидрохимического режима водной толщи, в котором есть и физическая (сорбция-десорбция кислорода воздуха), и биологическая (положительный бюджет кислорода при фотосинтезе и отрицательный – при деструкции органики) составляющие.

В отличие от других биологов К.М. Дерюгин обратил внимание на устойчивую динамику структуры водной толщи совершенно разных масштабов: от пресно-солонowodного озера Могильного, что находится на о-ве Кильдин, до Тихого океана [3]. Еще в баренцевоморских наблюдениях 1921 г. Дерюгин установил высокую аэрированность его вод, в силу чего на дне может развиваться «пышное население», верхние слои моря до 25–50 м глубины были даже перенасыщены кислородом по сравнению с нормальным 100%-ным насыщением, что, конечно, обусловлено усиленной продукцией фитопланктона, особенно комфортно чувствующего себя на подповерхностных горизонтах (ближе, чем поверхность океана), расположенных рядом с глубинными источниками питательных солей.

По данным экспедиционных исследований морей Тихого океана К.М. Дерюгин пришел к выводу, что химические условия обитания морского населения благоприятны, потому что дефицита кислорода в глубинных слоях не наблюдается. В верхнем 200-метровом слое в восточной части моря количество кислорода близко к его содержанию в соответствующем слое прилегающей части Тихого океана, что указывает на общность процессов их аэрации. Резкое различие в содержании кислорода в глубинных слоях вод моря и океана приводит автора к заключению о существовании в них двух независимых друг от друга систем вентиляции глубинных вод.

Источником кислорода для глубинных вод моря являются области, где происходит опускание богатых кислородом поверхностных вод, их погружение происходит при сильном зимнем охлаждении и отсутствии резкого различия солености всей толщи вод. Расчеты приходной и расходной составляющих кислорода показали, что в зоне холодных вод поглощение кислорода оказывается на 5–7% больше, чем в теплом течении, при этом слой минимальных концентраций кислорода слабо выражен, глубина его залегания не является постоянной, а слой минимума кислорода в некоторых районах моря вообще отсутствует.

Количество кислорода в глубинах моря определяется двумя факторами: возрастанием роли окислительных процессов с глубиной и вертикальной циркуляцией вод, а окисление органических остатков происходит наиболее интенсивно в глубинном слое 500–1000 м, что приводит к уменьшению содержания кислорода. Глубже 1 тыс. м интенсивность процессов окисления снижается и происходит накопление растворенного кислорода за счет мощной вертикальной циркуляции вод.

Глубина кислородного минимума определяется особенностями вертикальной циркуляции вод в различных районах моря и предполагает, что погружение поверхностных вод происходит не повсеместно, а отдельными нисходящими потоками, что приводит к разнообразию глубин залегания слоя минимума кислорода в море и является причиной образования перемежающихся слоев повышенного и пониженного содержания кислорода.

Слабовыраженный минимум кислорода в море связан с мелководностью проливов и глубоко проникающей зимней конвекцией, что создает в глубинных слоях моря высокую концентрацию кислорода.

Изменение характера хода кислорода на глубинах связано с тем, что охлажденные за зиму поверхностные слои, богатые кислородом, постепенно погружаются, и обогащение глубинных вод кислородом происходит с запозданием относительно максимума его на поверхности на несколько месяцев. Это демонстрирует различие природы адвективных и конвективных процессов в масштабах океана.

Уникальный и единственный в своем роде Баренцево-Беломорский бассейн, содержащий черты высокоарктического, арктического и бореального океана, с неразгаданными тайнами

высокой насыщенности вод кислородом и постоянства «избранных» биоценозов, требует поиска аналогий и обобщений, т.е. рассмотрения иных водоемов, адекватных маленькому Белому морю и огромному Мировому океану. Действительно, все океанологические объекты обладают единственной в мире индивидуальностью и совершенно одинаковой природой физических, химических, биологических и, что особенно важно, биохимических процессов. В связи с этим наиболее интересным кажется дальнейшее обсуждение проблем, которых коснулся К.М. Дерюгин, проводя комплексные экспедиции в Кольском заливе и его бухтах, на Кольском разрезе в Баренцевом море, в прибрежных водах Новой Земли, в реликтовых ее озерах и неповторимом озере Могильном и, наконец, в морях Тихого океана.

Все эти объекты обладают двумя физическими составляющими формирования структуры водной толщи, какой бы мощностью она ни характеризовалась – адвекцией и конвекцией. Адвекция может иметь гидродинамическую (приливные и все течения, вызываемые сверхдлинными волнами) и термодинамическую (ветровая циркуляция) природу, конвекция – только термодинамическую. Тонкость отличия макромасштабных океанских, мезомасштабных морских и микромасштабных озерных режимов заключается в том, что время формирования первых соответствует климатическим периодам, второго – внутригодовым, а третьего – синоптическим. Теперь, начиная с последних, синоптических, периодов можно сказать, что они характеризуют изменчивость океанологических характеристик поверхности раздела океан–атмосфера, определяя естественные синоптические периоды (ЕСП). Внутригодовые, сезонные изменения выражаются динамикой так называемого сезонного термоклина, а вернее набора всех «клинов»: гало-, окси-, фосфато- и др. Климатические – представляет Главный (Центральный) термогалоклин – слой океаносферы, в котором наблюдается высокоустойчивая связь температуры и солености, определяющая затраты энергии (кинетической и потенциальной), которые зависят от падения температуры воды, и расхода энергоносителя (водяного пара), обусловленные процессами, связанными с уменьшением солености [4].

Известно, что из всех газов, растворенных в океанических водах, наибольший интерес представляет кислород, так как с ним связана интенсивность химических и особенно биохимических процессов, а следовательно, и развития жизни. Проникая через всю толщу океаносферы, он создает высокий окислительный потенциал раствора океанической воды, определяя активность окислительно-восстановительных процессов в водах и донных отложениях. Кислород и его соединения, содержащиеся в Мировом океане, оказывают огромное влияние на планетарный обмен веществ. Следует добавить, что в высоких широтах поглощается больше газов, чем в тропических областях, воды здесь оказываются перенасыщены газами. Зимой и ночью преобладает поглощение газов водами Мирового океана, а летом и днем – выделение их в атмосферу.

Океаносфера способна восполнять недостаток газов в воздухе или поглощать их избыток, создающийся в процессе планетарного обмена. Мировой океан выступает в роли главного фактора, с которым связано установление динамического равновесия газообмена, а также постоянство газового состава атмосферы и океаносферы. Такое равновесие все время нарушается в условиях сложного и длительного планетарного перераспределения масс, изменения характера и интенсивности биохимических процессов, по-разному протекающих у поверхности Земли и в толще геосфер. Если кислород воздушной оболочки нашей планеты образовался в результате фотосинтетической деятельности растительности, океанические водоросли (и в первую очередь фитопланктон) должны были сыграть в этом немалую роль. Разумеется, что микроорганизмы-деструкторы, без которых не обходится никакая жизненная система, завершают решение проблемы равновесия кислорода.

Последователь К.М. Дерюгина Г.А. Заварзин (1933–2011) – основатель новой научной школы микробиологов – сформулировал основные концепции природоведческой микробиологии, имеющие не только теоретическое, но и мировоззренческое значение. Его школой впервые описаны микробиологические процессы в водной и воздушной среде, изучена трофическая организация микробных сообществ. Уже в XXI в., обобщая научную деятельность в области изучения микромира и его роли в формировании биосферы, Г.А. Заварзин предложил глобальные принципы мегабиологии, которая изучает биологические процессы в масштабе миллионов и миллиардов тонн превращения веществ в биогеохимических циклах. К области мегабиологии относятся биогеохимические циклы, контролируемые биотой. Важнейшую часть мегабиологии составляет микробиология, поскольку и сейчас главным образом микроорганизмы катализируют круговороты веществ, изначально полностью

обусловленных деятельностью микроорганизмов. Наиболее интенсивно биологические процессы проходят в высокопродукционном фотическом слое океана.

Почти невозможно (из-за невидимости агентов) осознать роль микроорганизмов в формировании водных масс, можно лишь косвенно оценить их роль, наблюдая, как образуются многометровые слои водной толщи. Казалось бы, что у микроорганизмов, в отличие от растений, структурная роль невелика из-за их дисперсности, однако события геологического и даже климатического масштабов определяют бактериальные сообщества как формирующую глобальную экосистему.

Истоки мегабиологического подхода Г.А. Заварзина несомненно восходят к работам предшественников – морских биологов, которые еще не достигли высоких научных технологий конца XX – начала XXI вв., но по косвенным характеристикам уже догадывались о ведущей роли вездесущих микроорганизмов, особенно когда речь шла о динамике растворенного кислорода в совершенно разных масштабах: от Мирового океана до озера Могильного.

Кислородная машина мегасистемы океан–атмосфера–биосфера представляется набором природных механизмов, которые поддерживают естественный баланс кислорода в этой системе. В отличие от такой же естественной *тепловой машины*, в работе которой участвуют главным образом атмосфера и океан, в *кислородной машине* важнейшее значение имеют поглощение световой энергии фототрофными организмами биосферы и круговорот органических и минеральных веществ посредством биохимической деятельности бактериопланктона, т.е. участия биосферы.

Суммарным выражением изменения отрицательного бюджета кислорода, применяемым для количественного анализа оценки потребления кислорода ниже слоя фотосинтеза, является биохимическое потребление кислорода (БПК). Именно здесь, в отсутствие фотосинтеза, закономерности пространственных и временных изменений отрицательного бюджета кислорода выражаются наиболее явно, однако их нельзя рассматривать в отрыве от других важнейших деталей сложного механизма общей для живых и косных систем географической оболочки, образовавшейся в течение геологического времени благодаря работе кислородной машины. Стабильность оксигенной структуры поддерживается с одной стороны физическими процессами сорбции–десорбции, с другой – биологическими: автотрофным положительным и гетеротрофным отрицательным бюджетом растворенного в воде кислорода.

Существуют различные мнения относительно преобладающего значения физических и биологических факторов, регулирующих количество кислорода в воде и воздухе. По-разному решаются и проблемы физических источников кислорода на Земле. В последние десятилетия, в связи с катастрофической антропогенной нагрузкой на геосферы, вопросы изучения источников и «стоков» кислорода особенно актуальны.

Согласно современным представлениям, жизнь концентрируется в зонах раздела сред. В каждой из сред, составляющих геосферы, наблюдаются разделы второго порядка, например, границы между *климатическими зонами* либо между слоями, разделенными повышенными градиентами физических или гидрохимических свойств. Океаносфера состоит из такой среды, в которой не может быть резких границ раздела, подобных существующим на суше. На земле субстратом для растений служит почвенный слой, ограниченный снизу неподвижными геологическими породами, поэтому можно сказать, что распространение растений на суше происходит в двумерном пространстве с координатами  $\varphi$ ,  $\lambda$ . В океане вертикальная координата значительно превосходит не только тончайший верхний слой литосферы, но и вертикальные размеры самых высоких деревьев.

Способность подавляющего числа видов водных растений мигрировать – самое существенное отличие водной части биосферы от сухопутной. Растения суши, завоеывая ареал, должны достичь определенной стадии зрелости за длительный промежуток времени. Растительные же клетки, обитающие в водной среде, делятся ежедневно и при этом переносятся как по горизонтали, так и по вертикали в поверхностном слое, который может служить аналогом почвенного слоя земли. Наиболее явным аналогом почвенного слоя в океане служит *эуфотический слой* воды. Его отличие от почвенного земного покрова заключается в отсутствии ограничения снизу неподвижной и непроницаемой для растений средой, а потому питательные соли и сами растительные организмы подвергаются не только горизонтальному, но и вертикальному перемещению в трехмерном пространстве  $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $H$  (широта, долгота, глубина).

Высокая *первичная продуктивность* морских вод умеренных широт обусловлена перманентным формированием обширной *фронтальной зоны*, наблюдаемой именно в периоды наибольшей сезонной освещенности. В заполярных широтах в период полярного дня фотический слой вод представляет собой настоящее растительное «пастбище» для зоопланктона. Физико-химические условия в зоне фронтальных вод одинаково благоприятны для организмов, обитающих как в полярных, так и в умеренных широтах. Тропические широты отличаются отсутствием сезонных различий освещения, значительно большим диапазоном вертикального изменения температуры и кислорода, локальностью биотопов, тем не менее, принцип «подповерхностный максимум – промежуточный минимум кислорода» в центральном слое океана остается глобально неизменным.

Для развития всех видов фитопланктона, обитающих в водных массах любого происхождения, необходимы одни и те же условия: свет и приток питательных солей. Не вся водная масса пригодна для активного обитания растений, а лишь верхний, приблизительно 100-метровый слой. В продолжение весны, лета и осени в этом слое наблюдается значительный вертикальный градиент плотности воды, называемый сезонным *пикноклином*.

Существует предположение, что именно ему принадлежит решающая роль в формировании физических условий для массового развития растений. Это предположение основано на том, что в высокопродуктивных районах океана имеется хорошо выраженный пикноклин, а в низкопродуктивных районах такового не наблюдается. В зимний период года конвективный перенос вод, в результате которого пикноклин «размывается», служит причиной снижения жизненных функций или гибели растительных клеток, попадающих на большие глубины в афотическую зону. В летний период, наоборот, отсутствие конвекции, сопровождаемое увеличением вертикального градиента плотности в пикноклине, лимитирует поток питательных солей, ограничивая тем самым развитие растительных клеток.

Если принять в качестве необходимых условий жизнедеятельности фитопланктона освещенность и поток питательных солей, а в качестве достаточного условия – наличие пикноклина, эффективность которого определяется величиной градиента плотности воды, то, представив себе их внутригодовой ход как изменение между максимальным, средним и минимальным значениями параметров, можно проиллюстрировать зависимость первичного продуцирования в субполярных водах от изменений необходимых и достаточных условий жизнедеятельности фитопланктона в виде схемы, на которой выделяются 5 этапов внутригодового хода освещенности, потока питательных солей, градиента плотности воды и численности клеток фитопланктона. С помощью этой схемы можно прокомментировать зависимость первичного продуцирования от освещенности и параметров среды обитания следующим образом.

В *субполярных водах* океана в течение года наблюдается два максимума первичной продуктивности – весенний и осенний. Летняя депрессия продуцирования растительных клеток связана с ослаблением вертикального потока солей, необходимых для развития фитопланктона. Причина такого ослабления – падение интенсивности взаимодействия между океаном и атмосферой – летняя приостановка работы упоминаемой выше тепловой машины океан–атмосфера. После интенсивной зимней работы тепловой машины верхний слой океана в избытке «удобрен» питательными солями, весеннее солнце и плотностной «экран» в фотическом слое создают оптимальные условия для «цветения» фитопланктона.

Летом пикноклин становится более резко выраженным, количество растительных клеток уменьшается из-за истощения запаса питательных солей. Лишь осенью после возобновления интенсивной работы тепловой машины океан–атмосфера, когда циркуляция в воздушных и водных массах усиливается, верхний слой океана получает дополнительные питательные соли за счет конвективного движения частиц воды. Плотностной «экран» становится менее выраженным. Этот последний в году пик «цветения» сменяется падением продуцирования вследствие сокращения светового дня, на смену которому в полярных широтах приходит полярная ночь.

Кислород, синтезируемый фитопланктоном океана, растворяется в водах поверхностного слоя, при этом максимальные значения концентрации кислорода находятся не у поверхности океана, а в средней части сезонного пикноклина. Это связано с лимитированием необходимых

для растений питательных солей, которые поступают снизу. Сверху развитие растительных клеток лимитируется поступлением световой энергии, необходимой для фотосинтеза.

Воды с минимальными величинами растворенного кислорода – наиболее яркий показатель оксигенной структуры водной толщи. Вертикальное изменение кислорода может происходить плавно, как это наблюдается в умеренных и полярных широтах открытого океана, и резко, как в низких широтах Тихого и Индийского океанов и морских водах при ограниченной адвекции, например, в Черном море или фьордах Норвегии. *Дефицит кислорода* отмечается в районах стока крупных рек, он усиливается летней стратификацией при аномально теплых погодных условиях и антропогенным влиянием. Особенно резкий переход от насыщенного кислородом верхнего слоя к абсолютному минимуму кислорода в нижнем слое, состоящем из баренцевоморских вод, наблюдается в реликтовом озере Могильном, в исследовании которого активное участие принимал К.М. Дерюгин, и которое могло бы служить моделью не только превосходящего его размером моря, но и всего Мирового океана, если предположить, что район Могильного не подвержен влиянию «внешней» атмосферы и вся испаряемая через поверхность озера влага пошла на формирование системы циркуляции воздушных масс над озером. Если бы живые организмы не принимали участия в обмене океана и атмосферы кислородом, то его содержание в океане и атмосфере зависело бы только от физических условий газообмена. В системах циркуляции открытого океана эти физические условия определяются *адвективным* и *конвективным переносами* частиц воды. Адвективный перенос сопровождается контактом, а конвективный перенос – изоляцией частиц воды и воздуха. Это значит, что охлаждающиеся воды при адвективном движении будут обмениваться кислородом с атмосферой, а при конвективном погружении такого обмена происходить не будет.

Те физические и биологические условия, благодаря которым существует кислородная машина океан–атмосфера–биосфера, мы априори называем нормальными, потому что при отклонении от них включаются синергетические механизмы, которые возвращают систему кислородообмена геосфер в исходное положение [5]. Основным регулятором является обмен между жидкостью и газом через поверхность их раздела, когда насыщенная менее предела жидкость поглощает газ, а перенасыщенная – отдает его излишек. *Сорбция* и *десорбция* кислорода воздуха водами океана зависит от ряда факторов, главные из которых, температура и соленость, определяют плотность вод и величины поглощения или выделения газов. Количественные оценки растворенного кислорода выражаются в ‰ по объему растворенного газа в 1 л воды и в % отношения наблюдаемого содержания кислорода в норме. В первом случае оно называется концентрацией растворенного кислорода и обозначается  $O_2$ , а во втором случае – степенью насыщения (насыщенностью) и обозначается  $\zeta$ . Разность между наблюдаемым и рассчитанным нормальным содержанием кислорода называется дефицитом кислорода  $\Delta O_2$  или  $\Delta \zeta$ .

Насыщенность вод кислородом при условии незначительного изменения солености определяется концентрацией растворенного кислорода и температурой воды. Аналогично термогалинной термокислородной трансформация зависит от времени взаимодействия вод с атмосферой. Явление *гистерезиса насыщения*, подобно *конвекции* при охлаждении поверхности океана, наблюдается в осенне-зимний период годового цикла, когда охлаждаемые воды не успевают абсорбировать кислород воздуха и, в случае конвективного погружения, создают на определенной глубине дефицит растворенного кислорода, который имеет, таким образом, физическую природу. Согласно экспериментальным исследованиям, поглощение газов происходит медленно, и чтобы их концентрация в воде находилась в равновесии с концентрацией в воздухе в соответствии с парциальным давлением, требуется время. Особенно это характерно для полярных районов океана, где недонасыщенность поверхностных вод кислородом в зимний период объясняется малой скоростью газообмена между атмосферой и океаном по сравнению со скоростью охлаждения вод.

Нормальное насыщение кислородом оценивается величиной  $\zeta=100\%$  не только потому, что это предел насыщения вод в данных физических условиях, но и потому, что эта величина характеризует среднее термокислородное состояние вод *поверхностного слоя*. Последнее обстоятельство занимает не менее важное место в изучении оксигенной структуры океана, чем существование кислородного минимума.



Для описания физических и биологических процессов, определяющих изменение кислорода, выбрано пространство  $T, O_2$ , в котором исследуются зависимости между кислородом и температурой при условии постоянства атмосферного давления и солености. Рассматриваются варианты изменения термокислородных свойств частицы воды, участвующей в обмене кислородом с атмосферой (*нормаль насыщения*), биосферой (изотерма), одновременно с атмосферой и биосферой (*аномаль насыщения*), и не участвующей в обмене кислородом ни с атмосферой, ни с биосферой (изоксигена). Если частица  $M$  (рис. 1) изменяет свойства по линии нормального насыщения  $KMD$ , значит, она насыщается кислородом при охлаждении ( $MD$ ) и отдает кислород при нагреве ( $MK$ ). Следовательно, она находится в контакте с атмосферой, откуда берет недостающий кислород или отдает его излишек.

Если температура частицы не изменяется, а концентрация кислорода увеличивается (изотерма  $JMC$ ), то это может быть следствием фотосинтетической деятельности морских растений ( $MC$ ), а уменьшение кислорода связано с его потреблением на процессы бактериального окисления и дыхания гидробионтов ( $MJ$ ). Во время этих процессов, уменьшающих или увеличивающих бюджет кислорода, контакт частицы определяется исключительно живыми организмами биосферы, самой обширной частью которой является Мировой океан.

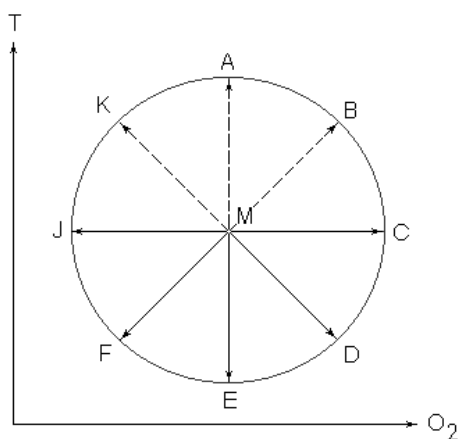


Рис. 1. Главные линии термокислородной трансформации водных масс

Особый интерес представляет выбор пути частицы по *изоксигене* ( $AME$ ), так как в этом случае расстояние, пройденное частицей вверх ( $MA$ ) или вниз ( $ME$ ) от отсчетной точки по линии  $O_2 = \text{const}$ , будет пропорционально интенсивности повышения или понижения температуры поверхностных вод.

Толщина поверхностного слоя по данным исследований стратификации растворенного кислорода в океане определяется глубиной «компенсационного» горизонта (где положительный и отрицательный *бюджеты кислорода* уравниваются друг друга), имеющего максимальную глубину залегания 100 м.

В водах, находящихся глубже поверхностного слоя, насыщение вод кислородом всегда меньше нормального. Минимальное насыщение растворенного кислорода наблюдается в промежуточных водных массах, характеризующихся максимумами АТФ и фосфатов, на границе между ними и центральными водами, где плотность составляет приблизительно 27.2 у.е. Эта величина была использована для маркировки изопикнической поверхности, вдоль которой должны распространяться воды с дефицитом растворенного кислорода, что не дало однозначного результата, однако стало ясным, что отрицательные аномалии кислорода наблюдаются преимущественно в слое 100–600 м. В полярных водах, принадлежащих системам циркуляции открытого океана, насыщение кислородом никогда не опускается ниже 80%, то есть дефицит кислорода  $\Delta\zeta$  не превышает 20%.

Между концентрацией растворенного кислорода и температурой воды в поверхностном слое существует тесная зависимость, при этом насыщенность кислородом поверхностных вод близка к 100% и в среднем составляет 97–99%. Это обстоятельство позволяет применять уравнение  $T, O_2$ -трансформации поверхностных водных масс для расчета отклонений концентрации растворенного кислорода частиц воды от нормы, то есть использовать это уравнение для оценки среднего термокислородного состояния вод. Нормативные уравнения  $T, O_2$ -трансформации, рассчитанные для поверхностного слоя океана, выражают обратно пропорциональную зависимость концентрации растворенного кислорода от температуры. Напротив, в *центральных водных массах* наблюдается прямо пропорциональная зависимость концентрации кислорода от температуры, при этом корреляция между этими параметрами не имеет таких высоких значений, которые характерны для коэффициентов корреляции кислорода и температуры поверхностных, промежуточных и глубинных вод.

Из определений главных линий  $T, O_2$ -трансформации вод следует, что все факторы, управляющие изменчивостью кислорода, можно разделить на физические и биологические, причем в формировании экстремальных характеристик насыщения деятельное участие одновременно принимают физические и биохимические процессы. Для описания физических и биохимических процессов, определяющих изменение кислорода, принято пространство  $T, O_2$ , в котором исследуются зависимости между кислородом и температурой при условии постоянства солености и биохимического потребления кислорода. В целом для Мирового океана массы поглощаемого и выделяемого кислорода приблизительно равны даже при условии ледового покрытия арктических районов.

Как уже было определено, адвекцией называется перенос частиц воды в результате работы тепловой машины океан–атмосфера [6]. Адвекция сопровождается взаимодействием водных и воздушных масс, в данном случае – обменом кислорода в условиях переноса частиц воды и их охлаждения. Условия адвекции для термокислородной трансформации вод системы циркуляции открытого океана записывается следующим образом:  $\sigma T < 0$ ;  $\sigma O_2 > 0$ ;  $\zeta = const$ . ( $\sigma T = T_m - T_1$ ,  $\sigma O_2 = O_2^m - O_2^1$ , где  $O_2^1$  и  $T_1$  – значения кислорода и температуры на начальном, а  $O_2^m$  и  $T_m$  – на конечном этапе термокислородной трансформации водной массы).

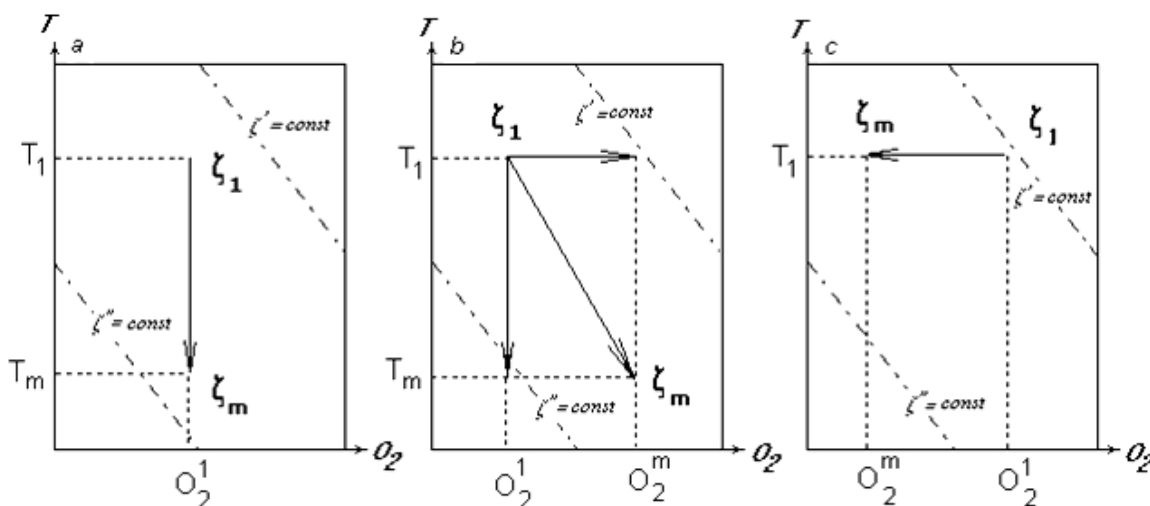


Рис. 2. Изменение температуры  $T$ , концентрации растворенного кислорода  $O_2$  и степени насыщения кислородом  $\zeta$  в условиях: а) конвекции, б) адвекции, в) биохимического потребления кислорода

Конвекцией называется перенос частиц воды, приобретающих в результате охлаждения отрицательную плавучесть в силу изменения удельного веса, а не плотности, как при адвекции. Конвекция не сопровождается обменом веществом между океаном и атмосферой. Условия конвекции для термокислородной трансформации вод системы циркуляции открытого океана:  $\sigma T < 0$ ;  $\sigma O_2 = 0$ ;  $\sigma \zeta < 0$ . Отрицательный бюджет кислорода, характеризующий биологические процессы, не связан с изменением температуры, поэтому в качестве условия БПК принимается:  $\sigma T = 0$ ;  $\sigma O_2 < 0$ ;  $\sigma \zeta < 0$ .

Если использовать наблюдения в арктических и субарктических морских водных массах различного генезиса и в самом широком диапазоне освещенности, влияния атмосферной циркуляции и ледовых условий, то можно убедиться в том, что диапазон изменения кислорода, исключая воды, насыщенные кислородом в результате экстремально высокой фотосинтетической деятельности фитопланктона более 120%, и стратифицированные воды фьордов, насыщение которых менее 80%, составляет:  $O_2 = 7.5 \pm 1.0$  мл/л;  $\zeta = 100 \pm 20\%$ .

Насыщение вод кислородом до 120% происходит в результате преобладания двух процессов: 1) физического – адвективного переноса частиц воды, при котором они абсорбируют кислород воздуха и насыщаются до  $\zeta=100\%$ , и 2) биологического – фотосинтеза растений, при котором воды перенасыщаются до  $\zeta=120\%$ . Происхождение другого экстремума  $\zeta=80\%$  объяснить труднее, так как неизвестно, какой вклад в недосыщение вод кислородом вносят физические процессы.

Для оценки вкладов физических и биологических процессов в формирование вод с дефицитом кислорода (на примере Баренцева моря) использована генерализованная  $T, O_2$ -диаграмма, построенная по выборочным статистическим данным. Из нее следует, что изменение концентрации кислорода и температуры в слое 0–50 м характеризуется обратно пропорциональной зависимостью и аппроксимируется линией, почти совпадающей с линией 100%-го насыщения поверхностных вод кислородом. В слое 75–300 м зависимость между концентрацией кислородом и температурой прямая. Линия, аппроксимирующая эту зависимость, соединяет значения концентрации кислорода, близкие к нормальным, с минимальными значениями  $O_2=6.6$  мл/л,  $\zeta=80\%$  при  $T=-1^\circ$ .

Линейные зависимости между концентрацией кислородом и температурой и представление изменений температуры и концентрации кислорода в пространстве  $T, O_2$  позволили построить векторную модель термокислородной трансформации водной массы в виде термокислородного треугольника (рис. 3).

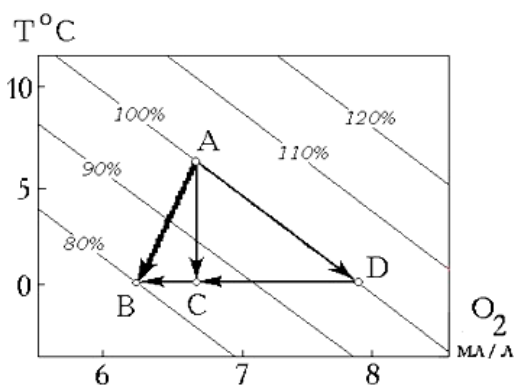


Рис. 3. «Термокислородный треугольник» для расчета физической и биологической составляющих отрицательного бюджета кислорода: **AB** – главный вектор, **AD**, **AC** и **CB** – составляющие векторы адвекции, конвекции и биохимического потребления кислорода

С помощью этой модели проведен расчет физической и биологической составляющих дефицита растворенного кислорода на примере Баренцева моря. Представим, что частица воды в начальный момент времени  $t_1$  находится в точке *A*. Если частица испытывает конвективное погружение, то в конечный момент времени  $t_m$  она окажется в точке *C*. Если же частица испытывает исключительно адвективный перенос, то в момент времени  $t_m$  она окажется в точке *D*. Если кислород расходуется только на биологические процессы бактериального окисления органического вещества и дыхания гидробионтов, то в момент времени  $t_m$  частица окажется в точке *B*.

Расчет физической и биологической составляющих дефицита растворенного кислорода сводится к определению модулей векторов **DC** и **CB**, в сумме составляющих абсолютную величину дефицита кислорода – модуль вектора **DB**.

Для сравнения соотношений  $T, O_2$ -составляющих водных масс низких и высоких широт построены *термокислородные треугольники* тропических и арктических водных масс, которые наглядно иллюстрируют разницу соотношений физических и биологических составляющих бюджета кислорода в зависимости от широты.

Из сравнения величин разности концентрации растворенного кислорода между исходными ( $A_n$ ) и конечными ( $B_n$ ) термокислородными индексами следует, что наибольшая величина отрицательного бюджета кислорода свойственна тропическим водам – это связано с максимальным отрицательным *бюджетом температуры* ( $C_n B_n$ ) или иначе – самым интенсивным охлаждением вод (рис. 4). При перемещении вод в сторону полюса величина отрицательного бюджета кислорода уменьшается и становится минимальной в арктических водах. Это уменьшение связано с возрастанием роли нисходящих движений вод.

Соотношение модулей  $A_n C_n$  и  $C_n D_n$ , которое зависит от угла  $A_n B_n D_n$  между направлениями векторов  $A_n B_n$  и  $D_n B_n$ , определяет различный вклад биологического потребления и *гистерезиса насыщения* вод кислородом в бюджет водной массы.

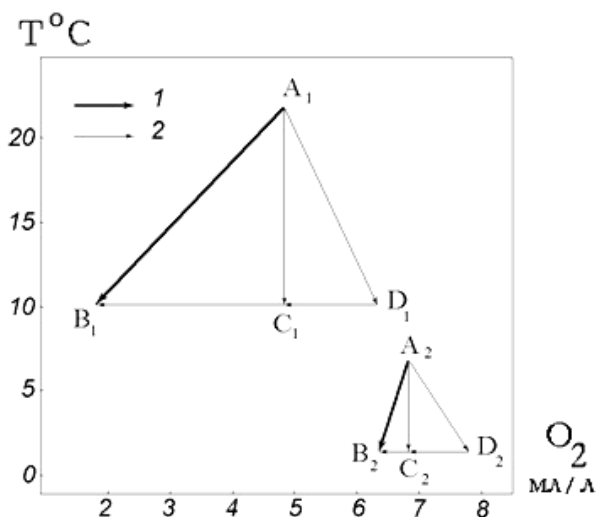


Рис. 4. Формирование вод с дефицитом растворенного кислорода в тропических ( $A_1B_1$ ) и арктических ( $A_2B_2$ ) районах:

1 – главные векторы; 2 – слагаемые векторы:  $C_nB_n$  – биологического потребления кислорода,  $D_nC_n$  – гистерезиса насыщения кислородом,  $A_nC_n$  – отрицательного бюджета температуры,  $A_nD_n$  – нормального насыщения

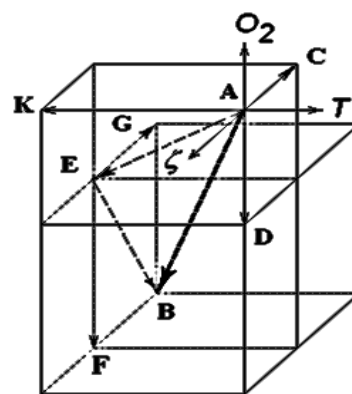


Рис. 5. Блок-диаграмма формирования вод термокликлина

На рис. 5 изображена блок-диаграмма трансформации вод термокликлина. Главный вектор  $AB$  представляет собой сумму физической ( $AE$ ) и биологической ( $EB$ ) составляющих трансформации. Вектор  $AE$  раскладывается на составляющие отрицательного бюджета температуры  $AK$  и гистерезиса насыщения в абсолютном ( $AD$ ) и относительном ( $AC$ ) выражениях. Вектор  $EB$  раскладывается на составляющие отрицательного бюджета кислорода в мл/л ( $EF$ ) и %% насыщения ( $EG$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Адров Н.М. Морские биологи – физике океана. Вестник КНЦ РАН, 2012, № 4. С. 62–76.
2. Адров Н.М. Полярная наука Книповича. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2012. 253 с.
3. Адров Н.М. Дерюгинские рубежи морской биологии. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013.
4. Адров Н.М. Теория водных масс океана. Мурманск: «Север», 2008. 480 с.
5. Адров Н.М. Концепции современного естествознания. Мурманск: Изд-во ГУВК, 2008. 720 с.
6. Адров Н.М. Природа энерговлагообмена водных и воздушных масс Баренцева моря. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 77 с.

#### Сведения об авторе

Адров Николай Михайлович – ведущий научный сотрудник, профессор МГТУ и Мурманского филиала СПб. гос. университета водных коммуникаций; e-mail: AdrovNikolay6661@yandex.ru

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ОБЛАСТИ РЕКА–МОРЕ И НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ ПО КОЛЬСКОМУ ЗАЛИВУ

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

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

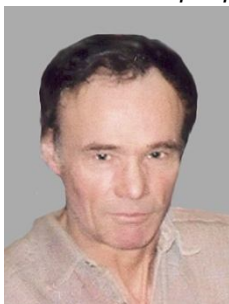
<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва

### Аннотация

Рассматриваются процессы переноса растворенных солей в зоне смешения (ЗС) река–море для начальных стадий перемешивания. Использование уравнения конвективно-диффузионного переноса примесей с переменным коэффициентом диффузии позволило выполнить анализ процессов, сопровождающих деформацию в малых окрестностях поверхностей раздела двух растворов, которые непрерывно растягиваются, что индуцирует двухсторонний приток жидкости к границе. По полученному аналитическому решению, в области границы раздела возникают градиентные микротечения, перпендикулярные линиям тока жидкости и оси удлинения поверхности раздела, которые образуют двухстороннюю гидродинамическую прослойку – запирающий слой, с эффектом блокирования диффузионного переноса ионов, что способствует сохранению свойств контактирующих жидкостей и общей устойчивости слоистых структур в ЗС. Представлены результаты натурных измерений для Кольского залива, подтверждающие теоретические выводы. Ламеллярная структура ЗС формируется в зонах начального контакта вод разного генезиса, откуда выходит устойчивый пучок изогалин 10–33‰, который распространяется вдоль слоя, содержащего изогалину 24.7‰, расширяясь с сильным замедлением и устойчивым углом наклона этой границы в ЗС река–море.

### Ключевые слова:

область река–море, слоистые структуры, конвективно-диффузионный перенос, деформация границ контакта в растворах, торможение диффузионного переноса, барьерная обстановка, гидродинамический запирающий слой, фрактальный рельеф.



Устойчивые структуры ламеллярного типа (слоистые) в прибрежных водах формируются везде, где приток материковых вод является достаточным для воспроизводства образующихся растворов [1–5]. В верхней части ЗС проходит снос осолоняемых вод в сторону моря (стоковые течения), в ее нижней части – компенсационный перенос частично опресняемых морских вод из прибрежной зоны моря к материку (противотечение) [1, 4–7]. Растворы разных степеней разбавлений морских вод, упорядоченные в деятельном слое

моря по плотности [2, 4, 6], образуют сложную систему каскадной трансформации примесей в ЗС вод разного генезиса [8]. По форме слоистого пакета смесей ЗС такие системы называют *laminated structure in the mixing zone of river and marine water* (по международной терминологии, *англ.*) или ламеллами ЗС река–море. В целом всю область смешения принято рассматривать как ступенчатую, многослойную структуру [4, 5, 9, 10]. По материалам прямых наблюдений, подсистемы в ЗС выявляются по вертикальному распределению образуемых при перемешивании смесей: плотности ( $\sigma$ ), температуры ( $T_w$ ) и солености ( $S$ ) [4].

Расслоение водной толщи и образование многочисленных поверхностей раздела – только одна из характерных особенностей ЗС [1, 11]. Благодаря различиям физико-химических свойств разных разбавлений морских вод, содержащих сильные соли-полиэлектролиты, разнообразные формы трансформации веществ проходят в смежных слоях ламелл ЗС: в пределах одного и того же сечения, перпендикулярного оси сноса стоковым течением [12–15]. Специфические свойства отдельных прослоек ЗС формируются под влиянием концентрационных разностей морских солей-полиэлектролитов в смежных парах образующихся растворов [2–4, 8, 16]. Под их влиянием, в разных прослойках ламелл проходит как формирование условий, так и физико-химические процессы изменения миграционных форм примесей и состава смесей [3, 11, 15]. Особо выделим, что такие изменения сопровождаются практически полным самоочищением от

большинства миграционных форм, не наблюдаемых в геохимическом классе морских растворов [8]. Общая эффективность этих процессов достигает 98–99% [2], что распространяется и на антропогенные загрязнения. Такие явления приводят к ряду последствий, имеющих важное геохимическое и экологическое значение для всей прибрежной зоны моря [2, 7, 8, 13].

Помимо гравитационной (механической) седиментации [2, 7], самоочищение водной среды в ламелле река–море связано со вкладом множества других процессов, тесно сопряженных в пределах слоистых структур. Выделим среди них изменения фазового состояния большинства форм растворенного органического вещества, ферментативную деструкцию органического вещества микрофлорой, биопоглощение, фото- и химическую деструкцию в верхней части ЗС [7, 11, 12, 15]. Анализ экспериментальных данных показывает, что большинство этих явлений развиваются по степенной кинетике [15, 17–19]. Развитие таких процессов в областях река–море связано с образованием множества барьерных обстановок в прослойках ступенчатых структур [12–18]. По данным наблюдений, в составе ламелл ЗС устойчиво формируется каскадная система сопряженных физико-химических биологических и биогеохимических барьерных обстановок [2, 8–10, 12, 16]. При этом каскады физико-химических барьеров (ФХБ) воспроизводят слоистую структуру ЗС и характерную для нее упорядоченность промежуточных растворов [6, 12–15]. По тем же причинам каскады ФХБ являются четко ориентированными в горизонтальной и вертикальной плоскости: любые типы барьеров вытянуты по направлению сноса контактирующих вод и упорядочены по плотности в толще ЗС [12–15, 17, 18]. Совокупность растворов в ламеллах ЗС и существующие здесь концентрационные разности солей-полиэлектролитов поддерживают стабильность барьерных обстановок каскадов ФХБ и выполняют по отношению к ним функции физической опоры и инициатора физико-химических процессов, протекающих в областях река-море [9, 10, 12, 13].

Экспериментальные или теоретические исследования начальных стадий смешения вод разного генезиса, в результате которого для целого класса водных объектов формируются устойчивые слоистые структуры [1, 2, 5, 7 и др.], в литературе носят единичный характер [19]. Сходная ситуация имеет место с исследованием сопряженных с ЗС каскадов ФХБ, влияющих на интенсивность самоочищения водной среды от загрязнений. Совместно это определяет низкую изученность процессов для областей река–море [9, 10, 14]. Для промежуточных растворов из ЗС считают, что приливные течения и интенсивное ветро-волновое воздействие приводят к их быстрому перемешиванию. Однако на массовом материале из разных областей установлено, что такие представления не вполне соответствуют наблюдениям. Ламеллы эстуарных зон и прибрежной области даже в условиях субарктических морей России устойчиво воспроизводятся и функционируют круглогодично, включая длительный период при минимальном объеме притока пресных вод материка [6, 9–11, 20]. При этом время обновления смешанных вод в ЗС охватывает диапазон от нескольких часов до сотен суток [1, 7, 13]. Сама проблема выявления физических механизмов устойчивости слоистых структур ЗС до настоящего времени не получила должного освещения. С другой стороны, процессы, сопровождающие образование поверхностей раздела ЗС по ходу их сноса в море, следует рассматривать как стационарный процесс в самых разных условиях [1, 2, 13–14]. Оценки последствий растягивания границ раздела контактирующих вод, например, для функционирования приустьевых, речных или прибрежных морских экосистем, также отсутствуют. К мало изученным относится влияние процесса деформации границ на характер протекающих в области река–море физико-химических процессов, в т.ч. и для образующихся здесь каскадов обстановок ФХБ [12–14, 16].

Задачи аналитического описания и моделирования этих явлений, как и их влияние на разные компоненты экосистем, пока уклончиво игнорируются. Подавляющее большинство исследований в этой области сводится к полевым измерениям и накоплению экспериментальных данных. При этом систематические материалы инструментальных наблюдений, относящиеся к областям начального контакта вод разного генезиса, за редким исключением, не приводятся [1, 14, 15]. В приложении к процессам, протекающим в ЗС река–море, процедуры решения сложных моделей не отработаны [7, 19, 21]. Поэтому подробное и детализированное представление о большинстве явлений, связанных с перемешиванием морских и пресных вод, как и применение многомерных численных моделей с физическим содержанием, находится за гранью возможностей вычислительных средств. Наиболее сложные из современных региональных моделей, разработанные для прибрежных вод (эстуариев) и применяемые при выявлении особенностей режимов смешения или изучения трансформации

примесей, традиционно используют трехмерную постановку задач и «жесткую» расчетную сетку [3, 4, 7]. Но фактически это приводит к *игнорированию физического содержания самих явлений*, заменяя ее подгонкой под данные измерений. Для систем, описывающих перенос примесей между жидкостями разного состава, известно несколько аналитических решений (одно- или двумерных моделей) с разным режимом перемешивания. Примеры их решения приводятся в [19, 22, 23] и используются по ходу изложения настоящей работы.

## Материал и метод

### Экспериментальные данные

Одна из сложностей прикладного и теоретического анализа процессов областей река–море связана с отсутствием методов и общепризнанных критериев для выделения и аналитического описания поверхностей внутренних разделов между растворами в ламеллах ЗС. С другой стороны, формирование многослойных структур, ориентированных по направлению сноса стоковыми течениями и глубинным противотечением, можно рассматривать как стационарные явления [1, 7, 14].

В данной работе натурные данные по ЗС Кольского залива используются как иллюстративный материал, помогающий понять и интерпретировать теоретические результаты, полученные на моделях. Преимущественно мы рассматриваем данные STD-зондирования для объектов с регулярными наблюдениями. На рис. 1 приводится схема Кольского залива и положение таких объектов в ЗС на этой акватории.

На продольном разрезе через залив «С» (см. рис. 1), наблюдения проводили с борта научно-исследовательского судна «Дальние Зеленцы». Линией показано положение продольного разреза «С», проходящего по оси судового хода Кольского залива.

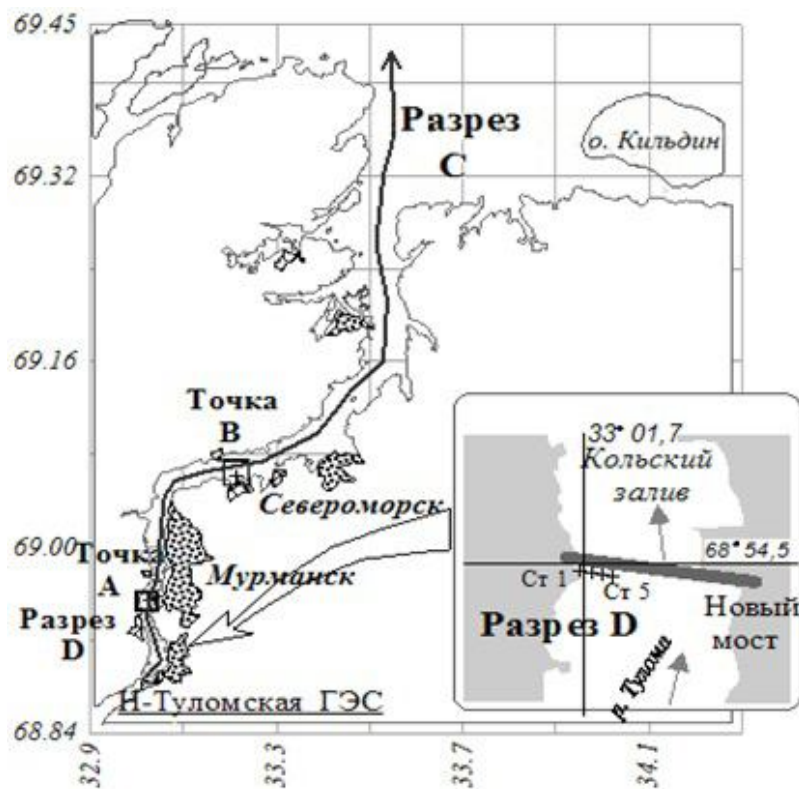


Рис. 1. Схема Кольского залива с положением точек и разрезов регулярных наблюдений за структурой ЗС:

А – точка наблюдений в Южном колене; В – точка в Среднем колене, С – продольный разрез по судовому ходу (осевая линия), D – поперечный разрез в области начального контакта вод (врезка)

Отсчет расстояний для этого разреза ( $L_i$ ) ведется от бьефа Нижнетуломской ГРЭС – области начального контакта морских и пресных вод. Ориентация разреза соответствует направлению сноса смешанных вод Кольским стоковым течением (КолСТ), протяженность которого в заливе составляет  $L \approx 60$  км. Период обновления вод в ламелле ЗС зависит от сезонов года,

в среднем оцениваясь диапазоном от 3 до 10 суток [14].

Основной массив данных получен зондом *SEACAT SBE 19plus*: точность измерений по температуре  $\pm 0.005$  °C, электропроводности  $\pm 0.001$  См/м и давлению (глубине)  $\pm 0.1\%$  [24]. Эти данные контролировали послойным отбором проб серийными стандартными батометрами, с определением солености ( $S$ , ‰) проб на стационарном солемере ГМ-65.

### Выделение поверхностей раздела зоны смешения

Прямыми наблюдениями за характеристиками ЗС в прибрежных областях моря установлено, что в состав растворов, образующих слоистые структуры, входит определенный диапазон промежуточных

смесей, образованных взаимодействием вод разного генезиса [13, 14]. По мере сноса перемешанных вод в открытое море они постоянно возобновляются, что является причиной формирования в областях перемешивания множества прослоек из промежуточных растворов морских солей, устойчиво наблюдаемых круглогодично [12–15, 17–18]. Из-за особенностей измерения  $S$  по электропроводности для сильных степеней разбавлений морских вод пресными, в качестве критерия выделения отдельных областей многослойных структур в ЗС авторами статьи используется параметр  $I_w$  – объемная доля содержания пресной воды в смесях морских и материковых (в долях или %) [1, 13]. Значение параметра  $I_w$  рассчитывается по уравнению вида [13]:

$$I_w = \frac{S_0 - S_i}{S_0 - S'_0}, \quad (1)$$

где  $S_i$  – соленость (‰), или концентрация морских солей-полиэлектролитов в образующихся растворах (промежуточные смеси ЗС);  $S_0$  – начальная концентрация солей для морских (нетрансформированных) вод, поступающих в ЗС;  $S'_0$  – то же для поступающих в ЗС материковых вод, (в ультрапресных водах Кольского п-ова минерализация менее чем 75 мг/л [14]).

В [13, 14] показано, что если для некоторого диапазона смесей, ограниченного парами растворов  $I_w^i: \{I_1 - I_2\} = \text{const}$ , определять глубину залегания ( $H_i$ ) в сечении по оси сноса перемешивающихся вод (вдоль линий тока), то можно получить характеристики границ раздела между слоями ЗС с разными степенями разбавлений морских вод. Полученные для  $I_w^i = \text{const}$  глубины  $H_i$  функционально связаны с расстоянием  $L_i$ , отсчитываемого от точки начального контакта взаимодействующих вод разного генезиса [14, 15, 17, 18]. Распределение  $H_i$  в сечениях по оси сноса смешанных вод (как и при наблюдениях в одной точке) формирует изолинии  $I_w^i$ , полученные для смесей с диапазоном:  $I_w^i = \text{const}$  которым соответствует область их распространения в данной ЗС. Наборы таких сечений через ЗС позволяют на основе детальных данных определять параметры поверхностей внутренних разделов сложной формы, образующихся между разными областями в ламеллах: линейные размеры, длину по сечениям  $l_i$ , площадь и объемы прослоек для отдельных диапазонов и т.п. Очевидно, что полученные этим способом характеристики поверхностей раздела относятся к данной ЗС (для текущих условий ее формирования, см далее). Использование материалов наблюдений или параметров, характеризующих поверхности разделов между прослойками смешивающихся вод для теоретического анализа, требует проведения процедуры масштабирования: приведения данных в координатах безразмерной ЗС, например, путем введения множителей [14]. Такой прием используется ниже, при анализе потоков соли через границы разделов между отдельными структурами ЗС.

#### *Схема и модели описания процессов переноса в ЗС*

На основании натуральных данных смешение вод с полной метаморфизацией состава пресного стока [8] в области река–море может рассматриваться как каскадный процесс перемешивания двух многокомпонентных растворов, содержащих соли-полиэлектролиты. В качестве предварительной схемы перемешивания будем применять его трехступенчатое представление, где каждая из ступеней может включать несколько стадий, идентификация которых возможна по ряду особенностей строения и характерному изменению параметров в отдельных подсистемах, устойчиво наблюдаемых в ЗС [13, 14, 18].

1-я ступень перемешивания (взаимодействия) проходит в приустьевой зоне впадающих в море рек и рассматривается как область начального контакта морских и материковых вод. Это наименее освещенная материалами наблюдений ступень, которая обычно выпадает из области исследований как гидрологии, так и океанологии. Характерный период процессов, протекающих на этой ступени, занимает от нескольких секунд до нескольких минут.

Процессы 2-й ступени перемешивания и трансформация структур ЗС проходят в пределах эстуарной зоны. На его начальной стадии наблюдается быстрое расширение объемов прослоек в ламеллах ЗС, при характерном периоде  $10^3$ – $10^4$  с (часы). На этой стадии в смешивающихся растворах поддерживаются значительные вертикальные и горизонтальные градиенты для



концентраций ионов:  $dI_w/dH \neq const$  или  $dS/dH \neq const$  и  $dI_w/dL \neq const$  или  $dS/dL \neq const$ , включая и параметры поперечных оси сноса сечений. С формированием устойчивой слоистой структуры в верхней части ламелл наступает стадия пространственной ориентации. Это продолжительный период существования слоистых структур с характерным временем до нескольких суток при общей тенденции к выравниванию вертикальных градиентов:  $dI_w/dH$  или  $dS/dH \sim \min \rightarrow const$  по соответствующим сечениям ЗС.

Заключительная 3-я ступень наступает при критическом состоянии структуры прослоек за счет фронтального и бокового расширения границ, что приводит к «истощению» слоистой структуры: утончению границ разделов смежных областей. Далее развивается процесс быстрого «растворения» всей слоистой структуры по направлению «сверху вниз» (в область распространения истинно морских вод в прибрежье, при соответствующей степени их трансформации [15, 16]). Обычно 3-я ступень перемешивания проходит за пределами котловин классических эстуариев [7, 14].

Следовательно, первые 2 ступени описывают процесс формирования, развития и устойчивого существования слоистой структуры в ЗС [13, 14]. Количественно начальные стадии формирования ламелл в ЗС могут анализироваться в рамках 2-х моделей переноса пассивных примесей в водных растворах, обеспечивающих проведение анализа физических процессов и имеющих разные формы аналитических решений: во-первых, на основе модели изотропной турбулентности с конвективно-диффузионным переносом [21], во-вторых, по ламеллярной модели, учитывающей диффузионный перенос через границы раздела [19, 22]. Обе эти модели рассматривают перенос примеси между парами контактирующих жидкостей через непрерывно растягиваемую поверхность раздела между ними. В нашем случае растягивание границ проходит за счет фронтального и бокового растекания при участии градиентных течений [1, 5]. При этом, за счет растягивания контуров  $l_i$  поверхностей разделов таких сечений, рост доступного объема вдоль малых окрестностей, прилегающих к любым внутренним поверхностям раздела, инициирует ряд особых физических эффектов [19], определяемых свойствами данного агрегатного состояния (слабые растворы). Они и являются объектом анализа конвективно-диффузионного уравнения переноса примесей, выполненного авторами в данной работе.

### Полученные результаты

Перенос примесей через внутренние границы раздела жидких сред протекает в ходе перемешивания растворов разного состава и характеризуется разнообразием условий перемешивания: от области взаимодействия речных и морских вод [2, 3, 13], которая в Русской Арктике занимает всю прибрежную часть моря, до любых потоков, проникающих в основную водную массу на различных водных объектах (крупные водохранилища, озера или моря). То же происходит между растворами реагентов, применяемых в разнообразных химических технологиях, например, при водоочистке и в других процессах смешения растворов [19]. Очевидно, что в таких системах перенос примесей проходит через внутренние поверхности раздела сложной формы, длину контура которых (для отдельных сечений) далее будем обозначать символом  $l_i$ . Совокупность процессов, наблюдаемых в естественных условиях для большинства областей взаимодействия вод разного генезиса, определяется генерированием нескольких физических эффектов [19, 22, 23]. Причем некоторые из них слабо выражены либо полностью отсутствуют для других систем, образованных смешиванием растворов разного состава. Например, при незначительных размерах водных объектов действуют ограничения на удлинение границ сечений  $l_i$  поверхностей. С другой стороны, в замкнутых емкостях при перемешивании взаимодействующих растворов образуются другие условия: ограничения на рост площади поверхности контакта и т.п.

Наиболее характерной чертой процесса перемешивания растворов для областей река–море, отличающей ее от других, является устойчивый и однонаправленный перенос смешанных вод в сторону моря [1–3, 13–15, 17–18]. В наибольшей степени это выражено для верхней части ламеллы ЗС, в которой формируются приповерхностные стоковые течения [1, 2, 5]. В естественных условиях такая особенность приводит к непрерывному растягиванию поверхностей раздела, образующихся при начальном контакте вод (см. выше). Прямое следствием сноса смешанных вод – устойчивый прирост

суммарной площади граничной поверхности, разделяющей воды разного генезиса. В ходе этой деформации границы любые структуры ламелл ЗС непрерывно обновляются, сохраняя и воспроизводя промежуточные смеси, при общей высокой устойчивости всей системы к внешним воздействиям разного рода [1, 2, 13, 15, 17–18].

### 1. Условия и формулировка задачи в ламеллярном режиме течения жидкости

Рассмотрим процесс переноса примеси между двумя растворами в рамках ламеллярной модели общего вида. Подходящие для нашей цели случаи ее аналитического решения ранее приводились в работах [19, 21–23, 25]. На рис. 2 – общая схема переноса примесей через границу раздела при контакте растворов разного состава для условий с ламинарным (последовательным) течением, т.е. имеющего определенное направление переноса контактирующих растворов, что соответствует условиям в области река–море (см. выше).

Пространство, в котором протекают рассматриваемые процессы, в общем случае трехмерное: для полного описания явлений в зоне контакта требуется применение соответствующих систем отсчета. Примем, что произвольный вектор скорости в выделенных точках  $\mathbf{v}$  может быть представлен матрицей-столбцом компонентов по этим осям [26]. Определение скоростей деформации жидкости в элементарных объемах, ограниченных на рис. 2 сечением через точки [a, b, c, d], соответствует анализу локальных движений векторами  $\mathbf{v}$ , подчиняясь правилам для сплошных сред, которые описываются уравнениями гидродинамики: состояния, неразрывности, движения и сохранения энергии, с учетом соответствующих свойств [3, 4, 21–23, 25, 26].

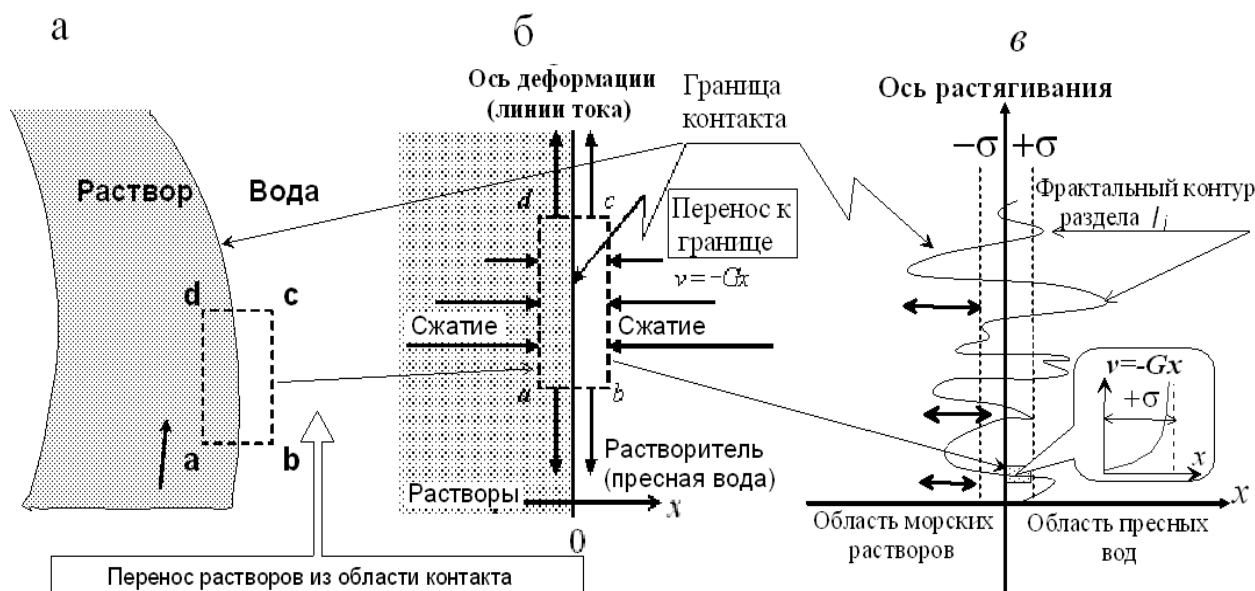


Рис. 2. Схема процессов переноса на границе раздела при ламинарном режиме течения для жидкостей разного состава. Показаны направления общего течения и ось растягивания границ раздела: а – элемент части контура внутреннего раздела [a, b, c, d] ламеллярной структуры; б – схематизация процессов в выделенном элементе и для достаточно малых окрестностей вдоль границ; в – схема фрактального мезорельефа по сечению, выделен диффузионный слой  $\sim\delta$ , на врезке – профиль скорости  $v$  в области пограничного слоя  $+\delta$  при растягивании

Уравнение конвективно-диффузионного переноса, записанное относительно концентраций (с), имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}c) = D\Delta c, \quad (2)$$

где  $D$  – диффузия,  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$  – поле скоростей,  $\mathbf{r}$  – пространственные координаты,  $t$  – время.

Условия несжимаемости жидкости вида:  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  позволяют записать уравнение (2) в форме:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla c = D\Delta c \quad (3)$$

В данной работе анализируются процессы, протекающие преимущественно в пределах элементарных объемов. При этом на схемах рис. 2 приведена только часть сечений контура  $l_i$  [a, b, c, d], удобная для рассмотрения и позволяющая избежать загромождения дополнительными построениями. Решаемая задача переноса примеси через границу раздела, а также сопровождающих деформацию явлений, требует их предельной схематизации в выделяемых элементах для самой возможности их аналитического описания дифференциальными уравнениями общего вида (3). Поэтому для анализа и упрощения выражений согласимся, что явления, индуцируемые растягиванием границ элемента, проходят в плоскости [a, b, c, d] (применяется двухосевая система отсчета). Процесс деформации элементов рассматривается в сечениях через малые участки границы, которая, очевидно, включает часть примыкающих к ней достаточно малых окрестностей по обе стороны. Для определенности принимаем, что на рис. 2б ось  $x$  направлена из насыщенного солями раствора в сторону пресных вод с низким содержанием солей (меньшей плотности). Тогда начало координат и все точки с координатой  $x = 0$  располагаются по границе контакта между растворами, по контуру  $l_i$  (см. рис. 2).

В паре контактирующих жидкостей разного состава их смежные слои при ламинарном режиме переноса будут подвержены процессу растягивания: от точки начального контакта по направлению переноса или по линиям тока (см. рис. 2). Сама деформация приложена к поверхности всего сечения с длиной  $l_i$ , начинающегося в точке контакта растворов и до любой другой, при всех  $x = 0$  по направлению течения. При этом ось переноса совпадает с линией тока жидкости. Тогда при любых деформациях поверхности раздела растворов разного состава процесс ее сжатия–удлинения будет приводить к деформациям в элементах, ограниченных точками [a, b, c, d]. Далее предположим, что выделенные на рис. 2а,б и ограниченные в точках [a, b, c, d] элементы в окрестности границы раздела прикреплены к ней своими сторонами:  $ab$  и  $cd$ . Очевидно, что множество таких элементов образует цепочки неограниченной длины, которые по оси сноса растворов соответствуют сечению границы контуром длиной  $l_i$  (см. рис. 2). Деформация, соответствующая удлинению границ в сечении [a, b, c, d], проходит в плоскости, перпендикулярной оси  $x$ . Отметим, что оси отсчета  $x_i$ , совпадающие в момент  $t_0$  с глобальными прямоугольными координатами в общем случае (спустя  $\Delta t$ ) трансформируются в криволинейную систему координат [3, 26].

Из приведенной схемы следует, что любое сжатие–растягивание границы раздела приводит к деформациям: а) самого контура  $l_i$  и выделенных элементов, б) прослоек в окрестности границ, в) их сцепок или бесконечных цепочек (см. рис. 2в). При условии несжимаемости жидкости по (2) и неразрывности сплошной среды любой из элементарных участков должен сохранять неизменность геометрического объема, в который входит часть окрестностей границы – прослойки контактирующих растворов, примыкающих к разделу. Формализуем условие неразрывности среды выделенных на рис. 2 элементов в виде уравнения:

$$V = hA = \text{const}, \quad (4)$$

где  $h$  – характерный размер элементов (см. далее),  $A$  – площадь сечения, проходящего через границу раздела, ограниченная точками [a, b, c, d].

По условию сохранения объема (4), в случае удлинения границы по оси контура  $l_i$  (рис. 2в), любой произвольный элемент приграничных структур вида [a, b, c, d] будет сжиматься по нормали к прилегающему участку границы (см. рис. 2а,б). Деформация приводит к тому, что другие стороны выделенного элемента ( $ad$  и  $bc$ ) будут с некоторой скоростью приближаться к границе раздела с двух сторон. Для выделенного на рис. 2а,б сечения [a, b, c, d], такой процесс возможен только при изменении геометрических соотношений (пропорций) противоположных сторон ( $ab = cdi$   $ad = bc$ ), располагающихся в разных по составу жидкостях и разделенных границей по контуру  $l_i$ .

Выполнение такого условия необходимо и достаточно для обеспечения несжимаемости:  $V = \text{const}$ . Относительные скорости точек элементов на схемах рис. 2 в сечениях [a, b, c, d] для любого типа деформаций запишутся системой уравнений [26]:

$$d\mathbf{v}/dt = T\mathbf{v}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор движения,  $T$  – тензор скорости (произведение оператора Гамильтона на вектор).

Любой из тензоров ( $T$ ), описывающих относительную скорость деформации элементов сплошных сред, можно разложить на 2 компоненты: симметричную обозначим ( $G$ ) и кососимметричную ( $T_0$ ):  $T = G + T_0$  [21, 23; 26]. Для определения относительной скорости точек подставим его в (5), откуда получим выражение:  $d\mathbf{v}/dt = G\mathbf{v} + T_0\mathbf{v}$ . Анализ движения для точек  $[a, b, c, d]$  выполняется на плоскости (см. выше), для которой компоненты кососимметричной части  $T$ , описывающие вращательную составляющую  $\mathbf{v}$  ( $\text{rot } \mathbf{v}$ ):  $T_0 = 0$ , откуда (5а) запишется как:

$$d\mathbf{v}/dt = G\mathbf{v} \quad (5a)$$

Учитывая приведенные условия, допущения и обозначения переменных, относительная скорость поперечного сжатия выделенных на рис. 2 элементов  $[a, b, c, d]$ , индуцированная удлинением границы раздела длиной  $l_i$ , описывается симметричной частью  $G$  тензора напряжений (см. рис. 2). Напряжения создаются в окрестностях границы, ламинарным течением в смежных слоях контактирующих жидкостей, что согласуется с условиями в (3).

Выражения (2–5) и условия их выполнения соответствуют положениям гидромеханики и свойствам жидкости, установленным для сплошных сред [3, 23, 26]. Поэтому, изменение геометрического размера разных сторон элементов типа  $[a, b, c, d]$ , располагающихся в контактирующих жидкостях и секущихся границей раздела, при растягивании  $l_i$  индуцирует в ее окрестностях, поперечные к оси деформации микротечения. В каждой из контактирующих жидкостей микротоки направлены из основной массы раствора в область границ раздела. Это соответствует изменению соотношений противоположных сторон деформируемых элементов  $ab = cd$  и  $ad = bc$ , по условию несжимаемости:  $V = \text{const}$ .

## 2. Дифференциальные уравнения деформации для окрестностей границ

Учитывая приведенные соображения и свойства жидкости, очевидно, что всякое удлинение элемента  $[a, b, c, d]$  вместе с ростом длины границ при растягивании  $l_i$  будет приводить к увеличению доступного объема в области примыкающих к границе прослоек (см. схему рис. 2). Аналитически деформацию растягивания элемента вида  $[a, b, c, d]$  при изменении отношений его сторон  $ad$  и  $bc$  можно описать несколькими способами.

Во-первых, вводим характерный поперечный размер для сечения элементов, который выше обозначен нами ( $h$ ). Тогда изменения соотношения сторон по ( $t$ ), в дифференциальной форме запишется уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = -Gh, \quad (6)$$

где  $h$  – характерный поперечный размер в сечении  $[a, b, c, d]$ ,  $G$  – скорость деформации границ, выраженная симметричной частью тензора  $T$ , генерируемого течением, совпадающим по направлению с осью удлинения элементов (см. рис. 2б).

По (6) скорость деформации, описываемая  $G$ , в общем случае связана с положением выделенного элемента на границе раздела контура  $l_i$ , т.к. форма границ со временем может приобретать любую кривизну, а оси отсчетов не сводятся к прямым линиям [26]. Поэтому величина  $G$  будет меняться за счет нестабильности растягивания границ  $l_i$  во времени соответственно форме, приобретаемой поверхностью раздела: знаком кривизны прилегающих участков [23].

Во втором способе выполним дифференцирование приведенного выше условия неразрывности жидкости в выделенном у границ элементе по (4):

$$V = hA = \text{const},$$

где  $h$  – характерный размер,  $A$  – площадь сечения в точках  $[a, b, c, d]$ . Используя уравнение для скорости деформации по (6), результат дифференцирования принимает форму:

$$\frac{dA}{dt} = GA, \quad (6a)$$

Физический смысл обоих дифференциальных уравнений вида (6) и (6а) сводится к тому, что любой малый элемент, расположенный вдоль границ раздела и обладающий характерным масштабом, соответствующим свойствам жидкости (поперечный размер в (6) или площадь сечения  $A$  по (6а), при удлинении сечения будет растягиваться со скоростью, пропорциональной

изменению данного характерного размера. По уравнениям (6) и (6а) и направлению осей на схеме процесса рис. 2б скорости  $G$  имеют противоположные знаки ( $\pm$ ) для окрестностей, прилегающих к границе на ее разных сторонах. Это обеспечивает условие неизменности объема при неразрывности для элемента по (4). Поэтому численно скорость деформации элементов у границы пропорциональна скорости изменения геометрических размеров сечений, показанных на рис. 2, по соотношению его противоположных сторон (см. выше).

При этом обе окрестности, примыкающие к границе раздела, совместно образуют пограничный слой [26, 27]. Через него осуществляется процесс диффузионного переноса примесей при условии отсутствия деформации границы (растягивания–сжатия). Диффузионный слой характеризуется определенной толщиной  $\delta$ , величина которой определяется свойствами жидкости, гидродинамическими условиями у границ раздела (тензор  $T$ ) и зависит от свойств диффундирующих веществ, учитываемых  $D$  – коэффициентом диффузии данного вещества в среде. Для условий решаемой задачи переноса вывод уравнения для оценки толщины пограничного слоя  $\delta$  приводится в [19, 27], где одним из авторов получено выражение, используемое ниже:

$$\delta = \sqrt{\frac{2D}{G}}, \quad (7)$$

Согласно содержанию аргументов (7) и диапазону коэффициентов  $D$  ионов морских солей-полиэлектролитов в водных растворах, размер области, занятой диффузионным слоем у поверхности раздела, соответствует выделенным на рис. 2 окрестностям границ элементов, ограниченных [a, b, c, d]. В этих окрестностях деформация растягивания формирует направленные к границе микропотоки жидкости из основной массы контактирующих растворов.

В случае турбулентного режима течения в реальных системах смешения растворов, поверхности разделов между жидкостями (в растворах, материковых или морских водах) будут дополнительно растягиваться за счет вихревых пульсаций, генерируемых в потоке [5, 19; 21]. Это приведет к формированию на поверхностях раздела фрактальных форм макро-, мезо- и микрорельефа [19, 27]. Микро- и мезорельеф такой поверхности и схематизация процессов для случая турбулентного режима приводятся на рис. 2в. Учитывая тип рельефа и размер элементарных участков по контуру раздела, будем выбирать много меньше, чем характерные размеры пульсаций, формирующих мезо- и микрорельеф изменяющейся (растягивающейся) поверхности раздела (см. рис. 2в) и зависящих от свойств контактирующих растворов [3, 21].

### 3. Уравнение потока через раздел

Прирост длины границы при растягивании  $l_i$  и удлинение элемента [a, b, c, d] приводит к увеличению доступного объема в диффузионном слое. По (4–6) при такой деформации прирост будет пропорционален изменению геометрических размеров длины контура  $l_i$  (см. выше). По условию неразрывности (4) любой прирост объема этой области должен быть сразу заполнен жидкостью (см. рис. 2). Рассмотренная выше деформация элементов в окрестности границ раздела индуцирует локальный приток–отток жидкостей по нормали к оси удлинения. В процессе деформации  $l_i$  противоположно направленные микропотоки будут наблюдаться в обеих окрестностях. Согласно обозначению аргументов (4–6) и осей на рис. 2, скорости равны:

$$v = \pm Gx. \quad (8)$$

По (8) скорость микропотоков, индуцируемых деформацией растягивания в направлении, перпендикулярном оси удлинения поверхности раздела, пропорциональна расстоянию  $x$ , отсчитываемому от границы («нулевой» толщины): скорость растет по модулю с увеличением расстояния  $x$ , на самой границе по (6, 6а):  $v = 0$ .

На рис. 2б, согласно направлению оси  $x$ , в области  $-\infty < x < 0$  находятся растворы с высокой концентрацией морских солей (обозначим их как насыщенный «раствор» или морская вода), а в области  $0 < x < \infty$  – раствор без примеси (растворитель или «речная вода»). Для этого случая форма уравнения переноса между растворами по (3) для лагранжевых координат с системой отсчета, привязанной к границе раздела (метод подвижного анализа [26], с редукцией оси сноса в проекцию точки на плоскости), принимает вид [19, 27]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - Gx \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad (9)$$

где  $x$  – ось и координата, перпендикулярная границе раздела,  $c(x, t)$  – концентрация примеси в точке  $x$  для момента  $t$ ,  $D$  – коэффициент диффузии примесей.

Для определенности принимаем, что концентрация морской соли в области, занятой нетрансформированными морскими водами (вдали от границ раздела), будет равна  $C_0$ , а в области их растворителя (материковых вод) они полностью отсутствуют – это граничные условия в (9):

$$c(-\infty, t) = C_0, \quad c(\infty, t) = 0 \quad (9a)$$

Отметим, что для ламеллярной модели существует важное ограничение, позволяющее правильно интерпретировать получаемые результаты (см. далее). Оно относится к тому, что в записи (9a) расширение областей, занимаемых контактирующими растворами, будет иметь физический смысл в том случае, если толщина переходного слоя (соответствующая толщине диффузионного слоя или размеру границ раздела), будет намного меньше поперечных размеров примыкающих к границе прослоек контактирующих растворов (рис. 2). В записи граничных условий (9a) это соответствует  $\pm\infty$ . Далее будем считать, что приведенные условия о соотношении физической толщины границ и размера разделяемых прослоек растворов выполняются в большинстве случаев. Для аналитического решения (9) представим его в безразмерной форме, используя процедуру масштабирования, с преобразованием аргументов по формулам вида:

$$t = t' / G, \quad x = \delta x', \quad c(x, t) = C_0 f(x', t'),$$

где  $\delta = \sqrt{2D/G}$  – толщина диффузионного слоя по (7).

Получим такую систему уравнений (здесь и в последующих выкладках штрихи опущены):

$$\frac{\partial f}{\partial t} - x \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) его требуется дополнить начальными и граничными условиями, которые запишем в виде:

$$c(x, 0) = C_0 \bar{\theta}(x), \quad c(-\infty, t) = C_0, \quad c(\infty, t) = 0, \quad (10a)$$

где  $C_0$  – исходная концентрация основных ионов морских солей, на удалении от границ раздела морских и пресных вод; параметр  $\bar{\theta}(x) = 1 - \theta(x)$ , а символ  $\theta(x) = \{0, x < 0; 1, x > 0\}$  соответствует функции Хевисайда. Отметим, что условия в (10a) для модели в размерной форме (9) соответствуют тем же граничным условиям.

На первый взгляд безразмерная форма уравнения переноса по (10) представляет собой известное в гидрологии и океанологии одномерное уравнение адвекции–диффузии. Его решение известно при разных условиях и проводится при обычном в этом представлении допущении о постоянстве коэффициента диффузии:  $D = \text{const}$ . Для полученной нами системы (10) коэффициент  $D \neq \text{const}$  и не может быть принят в качестве постоянного. С этим связана главная особенность изучаемого в настоящей работе процесса переноса через границы внутренних разделов в жидкостях. Модуль скорости диффузии–адвекции и соответствующий им приток жидкости в область окрестностей, примыкающих к границе, пропорционален расстоянию до нее – координатам по оси  $x$ , перпендикулярной оси деформации (5–8).

Решим (10), для чего допустим, что ионный перенос морских солей по оси  $x$  численно равен диффузионному потоку  $J(x, t)$ . Тогда скорость изменения концентраций  $c$  у границ раздела будет равна отрицательному градиенту потока, что запишем:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x}.$$

Сравнивая его с уравнением (10), получаем выражение:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -x \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}.$$

Интегрируя, получим уравнение потока соли через границу, общего вида:

$$J = -\frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x} - xf + \int_{-\infty}^x f(x') dx' + C \quad (11)$$

Отметим, что в (11) постоянная интегрирования  $C$  должна выбираться так, чтобы поток соли вдали от границ раздела отсутствовал (см. 10а). Для потока запишем это условие как:

$$J(\pm\infty, t) = 0 \quad (11a)$$

#### 4. Перенос в стационарном состоянии

Для получения общего решения по модели (10), представленной в (11), рассмотрим стационарное состояние системы. По условиям в задаче переноса оно устанавливается в области границ раздела по истечении некоторого промежутка времени, прошедшего от момента начального контакта. Формально, это режим непрерывной деформации границы раздела при ее растягивании (см. выше).

Для этого состояния переменные  $\partial f / \partial t = 0$ , а профиль концентраций  $c$  ионов морских солей по оси  $x$  в модели (10) должен удовлетворять дифференциальному уравнению:

$$xf' + \frac{1}{2} f'' = 0, \quad (12)$$

где штрих – производная по  $x$ .

Общее решение для (12) при граничных условиях (10а) и (11а) имеет вид:

$$f = \frac{1}{2}(1 - \Phi(x)), \quad (13)$$

где  $\Phi(x)$  – символ интеграла Френеля вида [26, 27]

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

С учетом (13) и соотношений, известных для интеграла Френеля, получим выражение:

$$\int \Phi(x) dx = x\Phi(x) + \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}},$$

по которому находим значение интеграла, входящего в модель (11):

$$\int_{-\infty}^x f(x') dx' = \frac{1}{2} x(1 - \Phi(x)) - \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} = xf + \frac{1}{2} f' \quad (14)$$

При подстановке этого интеграла в уравнение переноса по ламеллярной модели в (11), получаем для суммарного потока:  $J(x) = C$ , поскольку все члены, зависящие от  $x$ , взаимно сокращаются. Полученное для (11) выражение стационарного состояния системы определяется выполнением условия (11а) о нулевом приросте примесей на удалении от границ раздела между растворами, откуда сама величина переноса соли в его потоке через границу  $C = 0$ .

Таким образом, в стационарном состоянии с растягиванием границ диффузионный поток ионов морских солей через границу раздела между растворами разного состава:

$$J(x) = 0,$$

причем при всех  $x$ , включая и малые окрестности раздела, а не только вдали от границы растворов разного состава, что следует из условий в системах (9–10).

Фактически в стационарном решении по (11) для ионного потока получено, что в режиме растягивания вдоль границы раздела возникают локальные условия, поддерживающие исходные свойства контактирующих растворов и структуру системы в целом. Учитывая дифференциальные уравнения вида (6, 6а), такие условия формируются с обеих сторон разделяющей граничной поверхности: рассматривается случай продольного сечения контуром длиной  $l_1$  (см. рис. 2б,в). В соответствии с (11) величина потока, поперечного оси деформации по линии тока жидкости:

$J(x) = 0$ . Это значит, что *диффузионный перенос и перемешивание* двухкомпонентной системы растворов при *устойчивом растягивании внутренних границ* не происходит либо снижается до минимума (см. далее). Очевидно, что этот случай распространяется на многослойную, т.е. состоящую из  $n$  прослоек систему.

Блокирование диффузионного переноса ионов определяется влиянием локальных микротечений, поперечных линиям тока и оси растягивания границ, на свойства контактирующих растворов (см. рис. 2). Микротечения формируются в обеих окрестностях поверхности раздела  $l_i$  и имеют масштаб, соизмеримый с толщиной  $\delta$  диффузионного слоя между прослойками слоистых структур ЗС (см. выше). Т.к. диффузия в режиме растягивания границы, по (11), подавляется микропотоками (массопереносом), направленными в область границы, то для контактирующих растворов, скорее всего, будут сохраняться их исходные свойства. Поэтому решение (11) позволяет сделать вывод, что *до тех пор, пока на данном участке проходит растягивание границ по линии тока с нарастающей длиной его сечения  $l_i$ , будет существовать и стационарный режим, поддерживающий устойчивый состав контактирующих растворов с разных сторон границы их раздела*. При отмеченных граничных условиях формируются следующие эффекты: с одной стороны, сохраняется исходный состав смешивающихся жидкостей у границ контакта, с другой – формируется и сохраняется слоистая структура ЗС области река–море.

Таким образом, при соблюдении формальных требований к логическим преобразованиям (метод от противоположного) и корректности аналитических выражений (9–14), для определенных условий получен теоретический вывод о формировании запирающих прослоек в пограничном слое, носящих гидродинамическую природу (см. 6, 6а, 9–11). Их влияние эквивалентно существованию блокирующего ионную диффузию эффекта вдоль всей растягиваемой поверхности раздела между растворами разного состава. Причем для тепловых потоков (соответственно механизму переноса тепла) за счет роста температурных градиентов на границах раздела, наблюдается интенсификация процессов переноса – эффект, противоположный ионному переносу.

Вывод о наличии физического эффекта гидродинамической природы, с блокированием диффузии ионов, поддерживающего исходный состав растворов и смесей в прослойках – ламеллярную структуру в целом с учетом определений, сделанных в настоящей работе, формулируется в такой форме. *При возникновении стационарного режима деформации внутренних поверхностей разделов растворов разного состава формируются градиентные микротечения со скоростями  $v = \pm Gx$ , образующие двухстороннюю прослойку гидродинамического запирающего слоя, блокирующего поток ионов между растворами разных разбавлений, причем за счет роста температурных градиентов вдоль границ слоистой структуры такой слой приводит к усилению переноса потоков тепла в условиях размывания диффузионного слоя*. Запирающий слой гидродинамической природы и связанные с его формированием эффекты: блокирование диффузии и одновременный рост интенсивности теплопереноса через границы – определяют общую устойчивость многослойных структур в ЗС.

##### 5. Масштабы и размер запирающего слоя

Учитывая преобразования в системе (11) при использовании интеграла Френеля, перейдем в (13) к размерным переменным, по которым можно, при их соответствующих преобразованиях, получить аналитическое выражение для распределения концентраций  $c$  в окрестностях границы внутреннего раздела контактирующих растворов:

$$c = (C_0 / 2)(1 - \Phi(x/\delta)), \quad (15)$$

где  $\Phi$  – символ, используемый для обозначения интеграла Френеля (обозначения см. 7–11).

Используя метод размерностей и смысловое содержание аргументов (15), можно прийти к заключению, что характерная толщина запирающего гидродинамического слоя будет пропорциональна размерам диффузионного слоя, близкого к реальному размеру границ: численно  $\delta = \sqrt{2D/G}$  равно или близко к размерам гидродинамической прослойки. В целом это соответствует логике полученного выше решения в задаче переноса ионов по (11) и уравнениям (4–6), описывающим изменения параметров для области у границы раздела. При этом по решению (9–11) в пакете, составленном прослойками растворов, будут отсутствовать разрывы поверхностей, разделяющих отдельные слои по оси растягивания: от области начального контакта до любой из точек на контурах  $l_i$ .



Это определяется тем, что действует условие сохранения размера прослоек, обеспечивающего их устойчивое превышение над размером диффузионного слоя  $\delta$  (см. 9а).

Задача о профиле распределения морских солей у границ разделов выходит за пределы обсуждаемых в статье проблем и решается в других работах авторов.

### Обсуждение результатов

Характерное время формирования стационарного режима при растягивании граничной поверхности разделов, согласно размерности аргументов (6–8) и изложенным соображениям, пропорционально  $G^{-1}$ . При характерных градиентах скоростей деформации  $G \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , время формирования запирающего слоя и стационарного распределения концентраций примеси у границ раздела может составлять промежуток порядка нескольких минут или даже часов. Поэтому, чтобы наблюдать действие запирающей прослойки гидродинамической природы за счет микротечений, время процесса должно быть больше, чем  $G^{-1}$ . Процессы с близким временем наблюдаются в первую очередь в местах массивов впадения речных вод в море (см. выше). Другими примерами могут быть: поступление загрязненных вод с реками в озера, а также достаточно медленные процессы перемешивания растворов в технологических очистках [19, 22, 23, 27].

#### 1. Эффекты запирающего слоя и устойчивость ламелл ЗС

Исходя из результатов анализа ламинарной модели (9–10) и аналитического решения для стационарного состояния по (11), формально молекулярный перенос (ионный обмен и тепловой поток, см. выше) между прослойками ламелл ЗС может возобновиться в 2-х случаях: во-первых, при нарушении стационарного режима, во-вторых, за счет истощения элементов ламеллярной структуры. Обратим внимание на то, что истончение прослоек многослойной ламеллы и ее внутренних границ – процесс необратимый: определяется удалением любого из поперечных сечений от точки начального контакта вод разного генезиса, при фронтальном (в составе стоковых течений) и боковом (к берегам котловины) растекании ступенчатой структуры. Отметим, что в реальных ЗС река–море боковое растекание слоистой структуры давно является объектом исследований, а некоторые его эффекты приводятся в [1, 3, 4, 20].

Нарушение стационарного режима растягивания границ формально соответствует стабилизации линейных размеров отдельных участков сечения по контуру раздела длиной  $l_i$ . Используя обозначения настоящей работы, это можно записать как  $l_i = \text{const}$  при  $\Delta l_i = 0$ , тогда поток  $J(x) \neq 0$ . Здесь  $l_i$  – геометрический масштаб, соответствующий размеру характерных участков контура по оси сноса – линии тока и направлению растягивания (см. рис. 2в). Условия для другого случая возникают, когда поперечные размеры хотя бы одной из прослоек контактирующих растворов, истончающиеся (уменьшающиеся) по ходу растягивания границы, закономерно становятся соизмеримыми с масштабом запирающего переноса гидродинамического слоя – линейным размером граничной поверхности, близкой к масштабу диффузионного слоя (см. выше). Тогда размер данной прослойки в ламелле ЗС будет соизмерим с толщиной диффузионного слоя:  $\delta = \sqrt{2D/G}$  [27]. В этом случае запишем формальное условие для потока:  $H_l \approx \delta$ , тогда поток  $J(x) \neq 0$ . Здесь  $H_l$  – геометрический масштаб прослоек между поверхностями разделов слоистых структур. При таких условиях исходное допущение, сделанное для (9–11), что между собой граничат две жидкости с толщиной смежных слоев, каждый из которых превышает толщину переходного слоя между ними, не будет соответствовать условиям в (9а). Формально процесс блокирования диффузии и поддержания высоких температурных градиентов прекращается, запирающий гидродинамический слой размывается процессом диффузии (по законам Фика [3, 11, 20]). В этих условиях будет протекать процесс переноса солей через границу, а величины температурных градиентов на границах раздела восстанавливаются. При этом исчезновение одной из прослоек за счет ее «истощения» может завершаться формированием нового слоя в ЗС.

Отметим, что эффект, связанный с истощением границ и прослоек многослойной структуры в ЗС, возникает сразу после контакта морских и материковых вод. Это следует из масштабов  $G \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ с}$  и размера диффузионного слоя  $\delta$  (см. выше) и может сопровождаться *каскадным нарастанием общей толщины слоя, разделяющего воды разного генезиса и, вероятно, количества граничных поверхностей раздела* (происходит как выделение отдельных слоев, так и рост их объема

при слиянии смежных прослоек). Формально процесс истощения части многослойной системы прослоек, при сохранении условий для деформации растягивания границ раздела, формирует эффект *перемежающейся диффузии*, прерываемой возникновением запирающих слоев. Это можно рассматривать как одно из условий *формирования всей слоистой структуры – ламелл ЗС*, завершающегося образованием устойчивого расслоения толщи вод, занятой взаимодействующими растворами, приобретая характерную для «пакета» смесей форму: промежуточные растворы упорядочены по плотности и ориентированы пространственно. В пакете ламеллы ЗС любые промежуточные смеси упорядочены согласно степеням разбавлений морской водой (соответственно плотности) за счет действия поля гравитационного потенциала, устойчивого сноса стоковым течением и бокового растекания всей этой структуры.

При этом даже в стационарном состоянии (близком к нему) на поверхностях разделов неизбежно образуются локальные условия, где скорости деформации  $G$  приближаются к нулю. На таких участках торможение диффузии также не имеет места. По крайней мере, это распространяется на области локальной неустойчивости: при перегибах поверхности раздела (изменение знака кривизны, см. рис. 2в). Здесь и будут формироваться условия, когда какой-то, достаточно малый, участок  $l_i = const$ . В окрестностях таких участков происходит локальный рост диффузионного потока соли через границу раздела, по (11). Подобное локально-стохастическое перемешивание растворов по контуру  $l_i$  всегда будет проходить. Поэтому, по условиям в (9–10), образуется «вилка»: существуют аналитические решения задачи определения «характерного периода» перемешивания, например, с разным режимом течений.

## 2. Дифференциация ионов ламеллами

Для коэффициента диффузии в уравнениях (9–10) отметим, что по (13) и (15) толщина запирающего слоя на границе раздела будет увеличиваться в случае роста коэффициента  $D$ , различного для разных веществ. С другой стороны, она уменьшается с ростом градиентов скорости поперечных микротечений у границ контактирующих растворов. Поэтому даже для небольших градиентов скоростей  $G$ , как и типичных для водных растворов значений  $D \sim 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}^{-1}$ , запирающий гидродинамический слой будет иметь существенное влияние на состав растворов в разных частях ламелл. Это причина специфической избирательности по отношению к разным веществам, несмотря на незначительность размеров: размер диффузионного слоя имеет порядок  $\delta \sim 10^{-1}$  см.

При наличии нескольких не взаимодействующих друг с другом в водных растворах ионов-полиэлектролитов с разными коэффициентами  $D$ , каждый из них будет иметь свою толщину запирающего слоя, что определяется свойствами веществ и водной среды. Поэтому для разных степеней разбавления морских вод существует спектр величин  $D$  и соответствующий ему спектр для толщины блокирующего слоя (численно близкого  $\delta$  или равного ему). Это подразумевает дифференциацию солевого состава по степеням разных разбавлений морских вод, находящихся в разных областях ламелл ЗС река–море. Сам эффект должен являться предметом дальнейших исследований, а приведенное представление об избирательности переноса ионов в слоистых структурах массового типа получено на основании решения по (11) в данной работе.

## 3. Экспериментальные данные о трансформации ЗС

Результаты измерений гидрофизических параметров: плотности ( $\sigma$ ), температуры ( $T_w$ ) и солености ( $S$ ) в областях, реальных ЗС река–море, показывают, что при удалении от точки начального контакта морских и материковых вод их распределение в ЗС устойчиво поддерживает слоистую структуру в разных условиях. Для выявления характера трансформации ламелл по оси сноса контактирующих вод рассмотрим данные детального зондирования разреза «С» акватории Кольского залива. Общая длина охваченной наблюдениями части  $\sim 50$  км, диапазон глубин – от 6 до 340 м (см. рис. 1). Трансформация ламелл ЗС по оси сноса вод КолСТ соответствует «длине» перемешивания по оси сноса [13, 14]. Представлены данные для эстуарной области от  $L_1 = 8.3$  км до порога на выходе из залива  $L_2 = 58.7$  км, соответствующих расстоянию от основного источника материковых вод: нижнего бьефа Туломской ГРЭС, где проходят процессы начального контакта морских и материковых вод.

На рис. 3 приведены материалы *STD*-зондирования солености ( $S$ , ‰) для разных сезонов и с различной интенсивностью действующих на ЗС сил (приливов, нагонов, ветро-волнового воздействия и т.п.): на рис. 3а – распределение для весеннего периода (29.05–1.06.2001), при построении использовали данные 25 станций, длина рядов  $n = 3500$ ; на рис. 3б – для осеннего периода (6–8.09.2001), использовались данные 24 станций с длиной ряда  $n = 2130$ .

Шкалы глубин на рис. 3 экспоненциальные, изогалины проведены для характерных значений  $S$  и границ отдельных областей ( $A$ ,  $B$  и  $C$ ), выделяемых в ЗС [14, 15]. Оси абсцисс соответствуют расстоянию от бьефа Туломской ГРЭС ( $L$ , км) как источника пресных вод. Штриховкой в толще ЗС Кольского залива выделен слой, содержащий промежуточную смесь при  $S = 24.7\text{‰}$  – барьерную обстановку основного физико-химического барьера области река–море **НЗ** [12–15, 16]. На дополнительных построениях выделен угол наклона  $\text{tg}\alpha_i$  этой поверхности. У стрелок аббревиатурами показано выклинивание отдельных контуров  $l_i$  для обстановок каскада ФХБ, делящих ламеллу ЗС Кольского залива на характерные области  $A$ – $C$  с разными свойствами [14, 15]. Среднедекадные объемы поступления материковых вод в залив для периодов съемок (по данным многолетнего осреднения стока)– 0.45 км<sup>3</sup>/дек и 0.25 км<sup>3</sup>/дек [6, 14]. Согласно рис. 3, этот фактор определяет наклон слоя с ФХБ **НЗ**, значения для  $\text{tg}\alpha_i^{H^3}$ : 0.000133 (весна, рис. 3а) и 0.000868 (осень, рис. 3б), при  $\text{tg}\alpha_1 < \text{tg}\alpha_2$ .

Примерные координаты точки начального контакта:  $L \approx 1$ –2 км и  $H \approx 6$ –7 м. Более точное их определение по этим материалам затруднительно. Максимальное сближение пучка изогалин приходится на саму точку начального контакта морских и материковых вод (рис. 3). Из нижней части примыкающей к ней области морских вод отходит плотный пучок изогалин в интервале 8–32‰. В этом пучке средней линией является слой смесей, включающих изогалину  $\sim 24.7\text{‰}$ , остальные оконтуривают содержащий ее слой и могут менять свою конфигурацию. Выделим, что при всем разнообразии условий на акватории залива (как в текущем распределении, так и по сезонам) на расстоянии от точки начального контакта  $\sim 30$ –60 км в структуре ламеллы ЗС этот пучок расширяется с сильным замедлением (изогалины практически не расходятся). При этом наклон прослойки с обстановкой типа **НЗ** также не изменяется,  $\text{tg}\alpha_i^{H^3} \approx \text{const}$  для данных условий (весна–осень). Именно в этом слое промежуточных растворов формируется обстановка главного (термодинамического) барьера областей река–море – ФХБ **НЗ** [12, 13]. Длительность существования такого пучка изогалин и квазистационарного состояния ламеллы, при средней скорости КолСТ до 0.12 м с<sup>-1</sup>, оценивается для весеннего сезона не менее чем 3–5 сут., а в среднем за год  $\sim 7$ –8 сут. [14, 15]. При анализе пучка изогалин на рис. 3а,б следует учесть, что шкала глубин – экспоненциальная: любые отклонения имеют нелинейный характер и хорошо заметны.

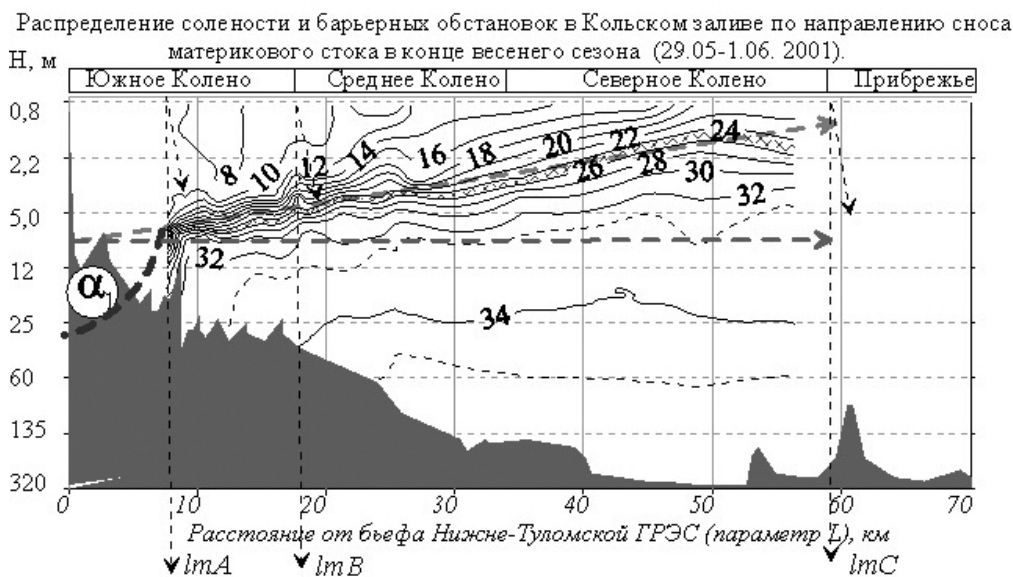
Приведенные данные указывают на квазистационарность состояния ламеллы ЗС при устойчивой деформации растягивания внутренних поверхностей раздела (см. модели 9–11 и 15), определяемого фронтальным сносом КолСТ и боковым – к берегам залива, расширяющегося в направлении переноса (см. рис. 1). Это состояние соответствует стационарному профилю распределения для солености (ионного состава смесей) слоистой структуры по всем сечениям ЗС. Отметим, что слои ламеллы ЗС, образуемые смесями разных разбавлений морских вод (сильных  $lmA$  и средних  $lmB$ , см рис. 3), во-первых, примыкают к береговой линии, в т.ч. в области начального контакта, во-вторых, отделены от прямого соприкосновения с геохимическими разновидностями истинно морских вод прослойкой растворов морских вод слабых разбавлений ( $lmC$ ). По условию примыкания к слою слабых разбавлений морских вод  $S \leq 24.7\text{‰}$  – это обстановка термодинамического барьера ФХБ **НЗ** [14, 16], ограничивающая всю структуру ламелл ЗС снизу. Для слоя с  $24.6 \leq S \leq 24.7\text{‰}$  температура замерзания смесей ( $\tau$ ) равна температуре максимальной плотности ( $\theta$ ): параметры особой точки в растворах морской соли при  $\tau = \theta = -1.332$  °C и  $\sigma_\theta = \sigma_\tau = 19.852$  [3, 11, 20].

В системе растворов, разделенной этим слоем, морская и материковая ветви перемешивания сосуществуют в ЗС как автономные активно взаимодействующие подсистемы, каждая из которых обладает собственной сложной структурой [12–15]. Обе ветви перемешивания, подчиняясь сходному комплексу действующих сил и факторов, по-разному реагируют на внешние воздействия, что определяется физическими свойствами составляющих

их растворов морских солей [3, 11, 12, 14, 15, 20]. Очевидно, что для приведенных на рис. 3 структур угол  $\alpha$  – наклон поверхности слоя ФХБ **НЗ**, содержащего прослойку  $S = 24.7\%$ , определяет всю конфигурацию ЗС. С ним связано и расстояние выклинивания обстановок каскада ФХБ на уровень поверхности моря.

Таким образом, ламинарная модель течения жидкости, разобранный в настоящей работе в нескольких формах (4–6, 9–11, 15), достаточно подробно объясняет большинство особенностей, наблюдаемых в системе внутренних границ разделов контактирующих растворов для естественных условий. Получила свое физическое объяснение и аномальная устойчивость ламелл ЗС, уникальная для подвижной водной среды. С другой стороны, в рамках таких моделей достаточно сложно получить аналитические выражения, описывающие процесс формирования слоистой структуры и ее эволюцию в ЗС для разных стадий. Для решения этих задач требуется привлечение других форм конвективно-диффузионных моделей и систем уравнений, например, полученных в [19, 21–23, 25, 27] по данным перемешивания растворов разного состава.

а



б

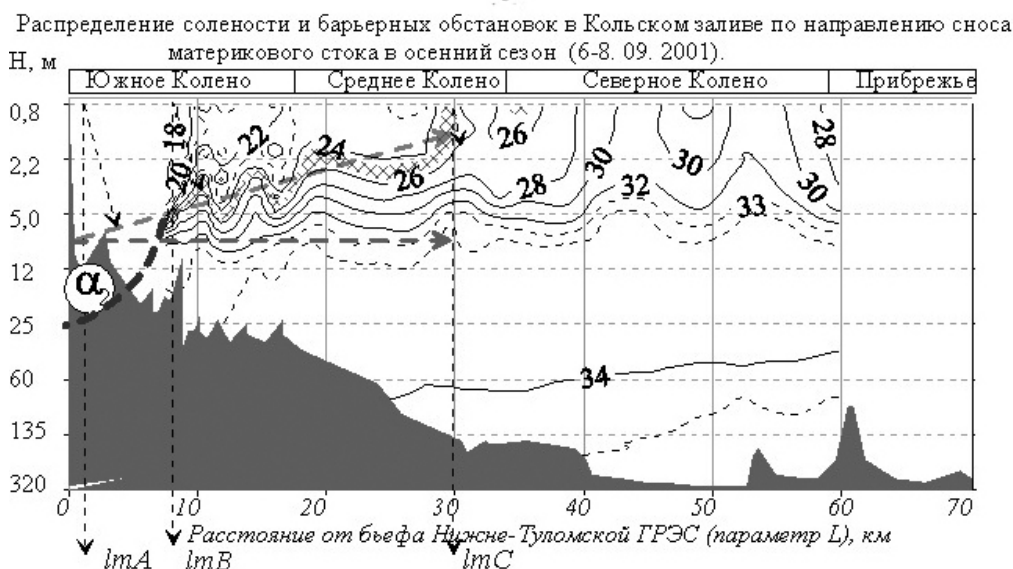


Рис. 3. Материалы STD-зондирования солёности ( $S$ , ‰) по оси Кольского залива (Баренцево море) в разные сезоны. По оси ординат – экспоненциальная шкала глубин ( $H$ , м), по оси абсцисс – расстояние от бьефа Нижнетулумской ГРЭС ( $L$ , км); основные изогалины – через 2‰, пунктиром – вспомогательные, штриховкой выделен слой с обстановкой ФХБ при  $S = 24.75\%$  и угол его наклона  $\text{tg } \alpha$ , стрелками показаны зоны выклинивания разных контуров  $l_i$

## Выводы

1. При соблюдении формальных требований к логическим преобразованиям и корректности аналитических выражений теоретически получены выводы о формировании особого слоя вдоль границ разделов и образовании физического эффекта, определяющего блокирование ионного переноса, при ускорении теплопередачи через границы разделов в системах растворов морских вод с разной степенью их разбавления пресным стоком. По решению уравнения переноса примеси (при сохранении условий для деформации растяжения границ) существует стационарный режим с блокированием процессов диффузии ионов, при росте  $\text{grad}T_w$  и  $\text{grad}S$ . В режиме с растягиванием границ внутренних разделов диффузионного смешения жидкостей не будет, либо оно снизится до минимума, тогда как теплопередача через границу будет интенсифицироваться.

2. Теоретический вывод о наличии физического эффекта гидродинамического блокирования процесса диффузии с ростом  $\text{grad}T_w$  и  $\text{grad}S$ , поддерживающих исходный состав промежуточных смесей (ламеллярную структуру в целом), с учетом сделанных в работе определений принимает такой вид: *при возникновении стационарного режима деформации внутренних поверхностей разделов растворов разного состава формируются градиентные микротечения со скоростями  $v = \pm Gx$ , образующие двухстороннюю прослойку гидродинамического запирающего слоя, блокирующего поток ионов между растворами разных разбавлений морских вод, при одновременном усилении потоков тепла через границы слоистой структуры, за счет роста  $\text{grad}T_w$  и  $\text{grad}S$ .*

3. По результатам моделирования переноса примесей по ламеллярной модели установлены:

а) условия для формирования гидродинамического запирающего слоя, индуцированного компенсационным притоком жидкостей к контуру  $l_i$  бесконечной длины, сформулированы условия для его прекращения;

б) каскадность процесса нарастания объема и количества прослоек в ламеллярных структурах по направлению удаления любого из сечений потока от области начального контакта, определяемого «истощением» толщины прослоек для системы разбавлений морских вод, что является одним из факторов формирования расслоения толщи воды, охватываемой процессом перемешивания ЗС.

4. Согласно решениям, полученным для разных степеней разбавления морских вод, существующий спектр величин  $D$  морских солей-полиэлектролитов формирует соответствующий ему спектр значений  $\delta$  для толщины границ, блокирующих их перенос. Этот фактор способен приводить к процессу дифференциации солевого состава в системе разных разбавлений морских вод, наблюдаемой в натуральных условиях для областей река–море.

5. По результатам теоретического анализа и натурным данным, образование слоистой структуры при контакте морских и пресных вод с разным ионным составом (вод разного генезиса) является совместным результатом:

а) переноса промежуточных растворов из зоны начального контакта – удаления любого из сечений слоистой структуры от этой точки и утончения ее прослоек;

б) действия сил, приводящих к устойчивой деформации поверхностей раздела при фронтальном и боковом растекании ламелл ЗС;

в) локальности условий стационарности: режима деформации растягивания внутренних границ разделов слоистых структур, имеющих фрактальные формы микро- и мезорельефа.

6. Эффект, генерируемый свойствами жидкости на микроуровне, в прослойках с масштабом  $\delta \sim 10^{-3}$  м и временем  $t \sim 10^{-1}$  с приводит к последствиям, реализуемым как устойчивая ламелла ЗС река–море, с характерным периодом существования  $t \sim 10^4 - 10^6$  с на масштабах  $L \sim 10^3 - 10^5$  м. Во всех рассмотренных авторами случаях прослойка растворов, содержащих термодинамический барьер ФХБ **НЗ**, обладает (по отношению к системе разбавлений морских вод) свойствами твердой границы, разрывы которой (по результатам на моделях и натурным данным), в структуре ЗС не наблюдаются.

7. Конфигурация поверхностей разделов для ламелл ЗС определяется условиями, формирующими угол наклона прослойки, содержащей обстановку **НЗ** ( $\text{tg } \alpha$ ). Угол наклона функционально связан с процессом истощения всей структуры ламелл: утончением прослоек и разделяющих их границ, являясь следствием растягивания стоковым течением. Наклон слоя с обстановкой ФХБ **НЗ** зависит от вертикальной координаты точки начального контакта вод – глубины, что определяет толщину слоя осолоняемых в материковой ветви растворов, выше самого раздела.

8. В ЗС река–море выявленные эффекты приводят к устойчивому воспроизводству промежуточных растворов морских вод разной степени разбавления и непрерывному обновлению участвующих в перемешивании вод разного генезиса. Совокупность растворов ламелл ЗС, содержащих концентрационные разности морских солей-полиэлектролитов, является инициатором протекающих в области река–море процессов трансформации примесей и поддерживает стабильность барьерных обстановок в каскадных структурах ФХБ, выполняя по отношению к ним функции носителя таких свойств.

9. Анализ данных, полученных наблюдениями за характеристиками внутренних границ разделов слоистых структур области река–море Кольского залива, позволяет сделать вывод о качественном соответствии теоретического исследования результатам прямых измерений. На примерах показано, что значительная часть изменчивости в разных подсистемах ламелл и сопряженного с нею каскада ФХБ, наблюдаемых в ЗС акваторий с океанической соленостью (в разные сезоны года), может быть интерпретирована как изменение угла наклона  $\alpha$  слоя смесей, формирующих обстановку термодинамического барьера река–море.

Процесс переноса ионов морских солей через поверхности внутренних разделов, рассмотренный в рамках современных теоретических представлений о явлениях в системах приведенного рода, в натуральных условиях проходит в глобальном масштабе. Он охватывает большую часть прибрежной зоны морей, при отсутствии разрывов на внутренних поверхностях раздела в ЗС, вплоть до размывания слоистых структур. Авторы считают, что применяемый в работе подход и полученные при теоретическом анализе решения позволяют получать более детальную информацию о состоянии водных объектов в областях река–море. В том числе появляется перспектива выполнения количественного анализа процессов на каскадах физико-химических и биогеохимических барьеров прибрежных зон моря, обеспечивающих процесс самоочищения водной среды в условиях роста ее загрязнения.

Авторы благодарят членов экипажей и командный состав НИС «Дальние Зеленцы» и ГС-440 (ММП) за помощь в производстве сезонной съемки Кольского залива 1999–2006 гг.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 324 с.
2. *Гордеев В.В.* Речной сток в Океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
3. *Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
4. *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
5. *Roberts P.J. R.* Turbulent diffusion / *P.J. R. Roberts, D. Webster* // Environmental fluid mechanics – Theories and Application. Reston: ASCE Press. 2002. 467 p.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / под ред. *Ф.С. Терзиева и др.* Л.: Гидрометеиздат, 1992. 182 с.
7. *Долгополова Е.Н.* Классификация эстуариев по гидродинамическим процессам / *Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова* // Водные ресурсы. 2010. Т. 33, № 3. С. 274–291.
8. *Вернадский В.И.* История минералов земной коры. Т. 2. История природных вод // Избранные сочинения. Т. IV, кн. 2. М.: Изд. АН СССР, 1960. С. 7–538.
9. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в морях и океанах. М.: Наука, 1994. 450 с.
10. *Emelianov G.M.* The Barrier Zones in the Ocean. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag. 2005. 636 p.
11. *Злобин А.* Экосистемы водорослей в изменяющихся условиях среды обитания (Теория, эксперимент, предположения) / *А. Злобин, В. Нянишкене, Н. Путинцев.* Вильнюс: Моклас, 1987. 296 с.
12. *Бардан С.И.* Классификация биологических барьеров и ее использование на примере термодинамических барьеров в морях Русской Арктики // Материалы Межд. науч. конф. «Современные климатические и экосистемные процессы в уязвимых природных зонах», г. Ростов-на-Дону, 5–8 сентября 2006 г. Ростов-на-Дону: Изд. ЮНЦ РАН, 2006. С. 22–25.
13. *Бардан С.И.* Система однородных показателей при количественном описании смешения морских и пресных вод и классификационные критерии деления областей их взаимодействия // Природа морской Арктики: современные вызовы и роль науки: тез. докл. междунар. науч. конф., г. Мурманск, 10–12 марта 2010 г. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2010. С. 24–27.
14. *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 в условиях арктического и аридного климата: материалы междунар. науч. конф., г. Ростов-на-Дону, 6–10.06.2011. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. С. 20–24.
15. *Бардан С.И.* Оптические характеристики зоны смешения морских и пресных вод в Южном колене Кольского залива (Баренцево море) в летний сезон / *С.И. Бардан, Н.Г. Сербов* // Український гідрометеорологічний журнал. 2011. № 9. С. 210–219.
16. *Перельман А.И.* Изучая геохимию... (О методологии науки). М.: Наука, 1987. 152 с.
17. *Бардан С.И.* Суточная изменчивость гидрохимических параметров в начальный период органотрофной фазы функционирования экосистемы Кольского залива (Баренцево море) / *С.И. Бардан, Т.Г. Ишкулова* // Изв. РАН. Сер. Географ. 2010. №4. С. 90–100.
18. *Бардан С.И.* Характеристика амиполитической активности водной среды в Кольском заливе для осеннего периода и анализ факторов определяющих её уровень / *С.И. Бардан, Г.А. Корнеева* // Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики: материалы междунар. науч. конф., г. Мурманск, 27–30 октября 2010 г. М.: Геос, 2010. Вып. 10. С. 18–25.
19. *Долгоносоев Б.М.* Нелинейная динамика

экологических и гидрологических процессов. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 440 с. **20.** *Зубов Н.Н.* Морские воды и льды. М.: Гидрометеиздат, 1938. 453 с. **21.** *Drummond I.T.* Turbulent stretching of line and surface elements / *I.T. Drummond, W. Munch* // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 215. P. 45–59. **22.** *Muzzio F.J.* Dynamics of a lamellar system with diffusion and reaction: Scaling analysis and global kinetics / *F.J. Muzzio, J.M. Ottino* // Phys. Rev., 1989. A 40 (12). P. 7182–7192. **23.** *Ottino J.M.* A lamellar model for analysis of liquid–liquid mixing / *J.M. Ottino, W.E. Rantz, C.W. Macosko* // Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34. P. 877. **24.** SBE 19 plus SEACAT PROFILER. User Manual. Version 012. Bellevue, Washington, DC, 2005. **25.** *Rantz W.E.* Fluid mechanical mixing – lamellar description / *Ulbricht J.J., Patterson G.K.* (eds.). Mixing of Liquids by Mechanical Agitation. New York: Gordon and Breach. 1985. P. 1. **26.** *Браун Э.Д.* Теория моделирования и возможности ее применения в трибологии: справочник по триботехнике / *Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе.* Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. С. 324–333. **27.** *Долгоносков Б.М.* Закономерности гидролиза и коагуляции солей алюминия на начальной стадии смешения растворов // Теор. основы хим. технологии. 2005. Вып. 39, № 3. С. 282–294.

### **Сведения об авторах**

*Бардан Сергей Иванович* – к.б.н., ведущий научный сотрудник лаб. планктона;  
e-mail: bardanap@gmail.com

*Долгоносков Борис Михайлович* - д.т.н., зав. лаб. моделирования водно-экологических процессов;  
e-mail: borismd@aquas.laser.ru

**УДК 574.24+612:539.16**

## **АДАПТАЦИЯ ДЕТЕЙ ЗАПОЛЯРЬЯ К УСЛОВИЯМ СРЕДНИХ ШИРОТ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ**

**(на примере оздоровительного комплекса «Эковит» КНЦ РАН в Воронежской области)**

**А.А. Мартынова, С.В. Пряничников, В.В. Пожарская, Н.К. Белишева**

Научный отдел медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН

### **Аннотация**

Представлены результаты исследования особенности адаптации детей Заполярья к условиям средних широт (на примере отдыха в оздоровительном комплексе «Эковит» КНЦ РАН, Воронежской обл.) при различном уровне геомагнитной активности. Показано, что у 47% детей процесс адаптации происходит удовлетворительно. У 53% детей адаптация организма к условиям среды обеспечивается более высоким, чем в норме, напряжением регуляторных систем с вовлечением дополнительных функциональных резервов сердечно-сосудистой системы. Выявлена психофизиологическая и психоэмоциональная зависимость состояния организма детей Заполярья от вариаций геофизических агентов и высокая степень уязвимости организма детей при смене широтных и климато-географических поясов.

### **Ключевые слова:**

*адаптация детей Заполярья, высокие и средние широты, психофизиологическое состояние, вариации геофизических агентов.*

Здоровье населения арктических территорий в значительной мере зависит от «космической погоды» [1], порождаемой солнечной активностью (СА) и ассоциированными с ней колебаниями метеорологических [2–5] и геофизических агентов [5–7]. При этом наибольшую чувствительность к экстремальному воздействию арктической среды проявляет детский организм [7, 8], начиная с внутриутробного развития [8–11], что находит отражение в структуре заболеваемости детского населения Мурманской области. Оказалось, что заболевания эндокринной системы, болезней крови и кроветворных тканей, болезней нервной системы, органов дыхания и пищеварения у детей имеют значимые ( $p < 0.05$ ) корреляции с СА [8]. Подтверждением высокой чувствительности детского организма к вариациям высокоширотных геофизических агентов явились результаты исследования, которые показали, что функциональное состояние центральной и вегетативной нервной системы [12, 13], сердечно-сосудистой системы [14, 15], композиция периферической крови и иммунорезистентность [13, 16] у детей школьного возраста модулируется вариациями геомагнитного поля (ГМП). Высокая чувствительность детского организма к воздействию геофизических агентов, вероятно, обусловлена тем, что Заполярье расположено севернее зоны экологического оптимума, оно

характеризуется недостатком тепла и избытком влаги, большой вариабельностью погодных условий, дефицитом ультрафиолетовой радиации, полярными ночью и днем, предопределяющих повышенные требования к адаптации, возникновение гиповитаминозов и снижение сопротивляемости организма [17]. Поэтому естественным стремлением скомпенсировать неблагоприятное воздействие арктической среды на детский организм является организация отдыха детей в более комфортных климато-географических условиях. Вместе с тем, изменение привычных (хоть и суровых) условий существования на более комфортные сопровождается психофизиологической перестройкой организма [9], которая требует определенного времени для полноценной адаптации к новым условиям. И, несмотря на систематический отдых детей Заполярья в более южных широтах, особенности адаптации детского организма при широтном перемещении практически не изучены. Также остается неясным и вклад вариаций ГМП, модулирующих функциональное состояние организма детей в высоких широтах [13, 16], в процесс адаптации к средним широтам. Цель настоящего исследования состояла в изучении особенностей адаптации детей Заполярья к условиям средних широт (на примере отдыха в оздоровительном комплексе «Эковит» КНЦ РАН, с. Александровка-Донская, Воронежской обл.) при различном уровне геомагнитной активности (ГМА).

## Материалы и методы

Исследование было выполнено на базе оздоровительного комплекса «Эковит» КНЦ РАН с. Александровка-Донская, Воронежской области (51°42'с.ш. 39°13'в.д.) в летний период 2011–2012 гг. Психофизиологические особенности адаптации детей к условиям средних широт изучали на группе подростков из Мурманской области (68°02' с.ш.34°34' в.д.), которая включала 19 мальчиков 13–18 лет и 9 девочек 14–16 лет. Динамику психофизиологического состояния организма изучали в группе мальчиков на основе ежесуточной (10 дней в 2011 г. и 16 дней в 2012 г.) регистрации показателей вариабельности сердечного ритма (BCP) [18] с применением программно-аппаратного комплекса «Омега-М». Прибор «Омега-М», предназначенный для неинвазивной диагностики вариабельности кардиоритмов, позволяет, на основе системного анализа, получать информацию о текущем состоянии организма и системах регуляции его функций. В качестве индикаторов психофизиологического состояния организма использовали: средний интервал сердечного ритма (RR), амплитуду моды – (АМо), индекс вегетативного равновесия (ИВР), показатель адекватности процессов регуляции сердечного ритма (ПАПР), вегетативный показатель ритма (ВПР) и индекс напряжения регуляторных систем (ИН). По результатам спектрального анализа рассчитывали полную спектральную мощность частот сердечного ритма (TP), абсолютную и относительную спектральную мощность высокочастотных (HF) и низкочастотных (LF) компонент спектрального диапазона BCP. Кроме того, использовали интегральные показатели функционального состояния организма, выраженные в условных единицах (при норме от 60 до 100%): уровень адаптации (А), показатели вегетативной (В) и центральной регуляции (С), психоэмоциональное состояние (D). Психоэмоциональное состояние детей регистрировали в начале и в конце смены пребывания на базе отдыха с применением методики, состоящей из 30 полярных вопросов, для диагностики оперативной оценки самочувствия (С), активности (А) и настроения (Н) (САН). Уровень ситуативной (СТ) и личностной (ЛТ) тревожности оценивали по методу Спилбергера-Ханина [19]. В качестве индикатора ГМА использовали среднесуточное значение К-индекса, полученного на основе вариаций Z, H и D компонент ГМП (Геофизическая обсерватория Соданкила, Финляндия). Данные о вариациях космических лучей (КЛ), отраженные в скорости счета наземного нейтронного монитора, получены на сайте станции космических КЛ, Москва, Измиран (55°29' с.ш., 37°19' в.д.).

## Результаты исследования

### *Психофизиологические особенности адаптации детей в 2011 и 2012 гг.*

Статистические показатели психофизиологического состояния детей в 2011 и 2012 гг. представлены в табл. 1. Данные позволяют провести сравнительный анализ статистических характеристик показателей функционального состояния организма тестируемых детей в 2011 и 2012 гг. Значимые различия ( $p < 0.05$ ) между показателями маркированы серым цветом. Средние значения таких показателей, как средний RR-интервал, частота сердечных сокращений (ЧСС), низкочастотная компонента сердечного ритма (LF) различаются между собой в 2011 г. и 2012 г. Причем, в 2012 г. величина среднего RR-интервала по отношению к 2011 г. возрастает ( $832.4 \pm 11.5$  и  $729.7 \pm 20.7$



соответственно,  $p=0.0001$ ), ЧСС – снижается ( $74.6\pm1.2$  и  $83.7\pm2.5$  соответственно,  $p=0.001$ ), как снижается и вклад низкочастотной компоненты (LF) в частотный спектр ВСР ( $892.8\pm33.5$  и  $1116.2\pm62.4$  соответственно,  $p=0.0021$ ). Поскольку значение среднего RR-интервала и его вариабельности являются базовым показателем состояния организма и его адаптационных возможностей, можно заключить, что в 2012 г. среднестатистический уровень адаптации детей был выше, чем в 2011 г. Подтверждением этого заключения служат показатели адаптации (А) в 2011 и в 2012 гг. ( $61.7\pm2.7$  и  $65.4\pm2.3$  соответственно), а также другие характеристики функционального состояния организма детей (табл. 1), хотя значимость различий между ними в 2011 и 2012 г. не достигает уровня  $p<0.05$ .

Таблица 1

Статистические показатели психофизиологического состояния детей в 2011 и 2012 гг.

Показатели психофизиологического состояния	2011				2012				P
	M±m	Минимум	Максим.	Ст.откл.	M±m	Минимум	Максим.	Ст.откл.	
А	61.7±2.7	44.1	74.7	8.4	65.4±2.3	50.7	84.7	9.4	$p>0.05$
В	66.9±3.8	44.8	88.1	12.2	72.3±2.3	58.5	91.7	9.1	$p>0.05$
С	60.7±2.4	46.0	66.8	7.7	58.9±1.6	48.5	70.6	6.5	$p>0.05$
Д	62.8±2.1	50.4	70.2	6.6	60.6±1.2	51.0	69.0	4.8	$p>0.05$
ИП	63.0±2.6	46.3	74.6	8.4	64.3±1.7	52.2	79.0	6.	$p>0.05$
Средний RR-интервал	<b>729.7±20.7</b>	<b>604.6</b>	<b>807.4</b>	<b>65.43</b>	<b>832.4±11.5</b>	<b>760.3</b>	<b>911.2</b>	<b>46.1</b>	$p=0.0001$
ЧСС	<b>83.7±2.5</b>	<b>74.7</b>	<b>100.7</b>	<b>7.9</b>	<b>74.6±1.2</b>	<b>67.0</b>	<b>83.7</b>	<b>4.7</b>	$p=0.001$
ИБР	172.6±25.9	94.5	391.4	81.9	157.2±13.9	85.1	320.6	55.7	$p>0.05$
ВПР	0.36±0.00	0.32	0.40	0.02	0.31±0.0	0.28	0.3	0.01	$p>0.05$
ПАПР	51.4±4.7	34.1	88.201	14.99	44.5±2.4	29.7	68.6	9.5	$p>0.05$
ИН	138.0±29.7	60.8	394.4	94.0	113.6±15.0	49.4	302.1	60.1	$p>0.05$
Амо -	34.1±1.8	26.7	46.8	5.5	32.9±1.0	25.7	41.7	4.0	$p>0.05$
RMSSD	38.2±2.2	22.8	49.3	6.8	45.9±2.8	31.4	72.8	11.4	$p>0.05$
HF	593.4±62.1	243.8	928.0	196.5	886.1±129.2	423.9	2253.7	517.0	$p>0.05$
LF	<b>1116.2±62.4</b>	<b>743.6</b>	<b>1418.7</b>	<b>197.3</b>	<b>892.8±33.5</b>	<b>665.4</b>	<b>1171.6</b>	<b>134.0</b>	$p=0.0021$
LF/HF	3.4±0.5	1.9	6.8	1.4914	2.8±0.3	0.9	4.9	1.3	$p>0.05$
TP	2798.9±138	1858.2	3905.7	669.7	2713.5±1	1898.6	4006.4	535.24	$p>0.05$

Средние значения показателей адаптации как в 2011 г., так и в 2012 г. соответствуют нижней границе нормы, однако индивидуальные значения этих показателей существенно варьируют: средний уровень адаптации детей в 2011 г. колебался в пределах от 44.1 до 74.7% (при норме выше 60%), а в 2012 г. от 50.7 до 84.7% (табл. 1). Те же закономерности характерны и для других психофизиологических показателей.

На рис. 1 можно видеть особенности индивидуальной адаптации детей к условиям средних широт в 2011 и в 2012 г. Так, в 2011 г. у пяти тестируемых детей показатель А оказался ниже нормы, а в 2012 г. у 4-х детей, что составляет (от числа лиц в исследуемых группах) 55.6 % и 44.4% соответственно.

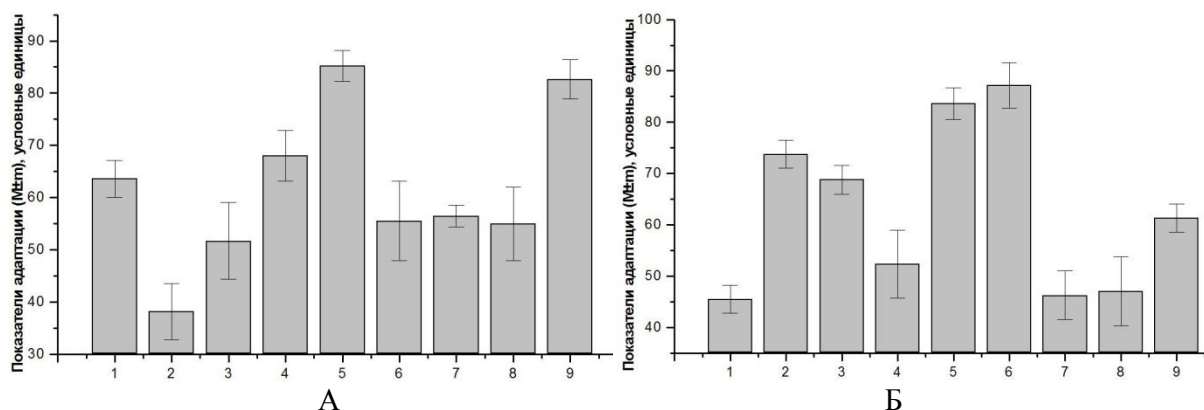


Рис. 1. Средние значения ( $M\pm m$ ) показателей адаптации отдельных испытуемых в исследуемые периоды в 2011 г.(А) и в 2012 г.(Б). По оси абсцисс – условные номера тестируемых детей; по оси ординат – показатели адаптации, условные единицы

Индивидуальный анализ функционального состояния организма тестируемых детей в 2011 г. выявил также высокую вариабельность ИН регуляторных систем сердечного ритма (СР). В соответствии со значениями амплитуды колебаний ИН, все тестируемые в 2011 г. разделяются на 2 группы: с низкой и высокой амплитудой колебаний ИН (рис. 2). Распределение среднего значения ИН в первой группе говорит об умеренном преобладании в регуляции сердечного ритма симпатического тонуса (центрального звена регуляции СР), связанного с определенным напряжением механизма адаптации и адекватной реакции вегетативной нервной системы на изменение климатических условий при смене климатического пояса. Высокая вариабельность значений ИН во второй группе свидетельствует о конкурентных влияниях на СР различных звеньев регуляции и поэтому повышенной чувствительности в этой группе к воздействию внешней среды, и, вероятно, к смене климатического пояса.

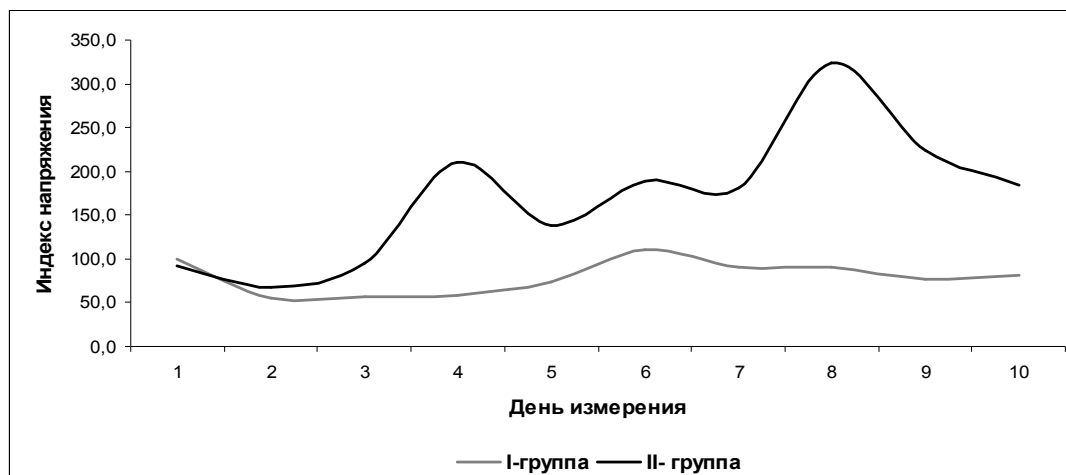


Рис. 2. Динамика ИН в двух группах испытуемых 2011 г. По оси абсцисс – дни исследования, (4–13 августа 2011 г.), по оси ординат – значения ИН, условные единицы

При анализе индивидуального частотного спектра СР у всех тестируемых детей в 2011 и 2012 гг. оказалось, что только у 26% детей проявляется сбалансированность систем регуляции СР (вегетативный баланс). Этот показатель выражается через величину отношения низкочастотного (LF – центрального звена регуляции СР) и высокочастотного (HF – автономного звена регуляции СР) спектрального диапазона СР и, при сбалансированности регуляции СР, соответствует значениям LF/HF от 1.5 до 2.5. Причем низкочастотный спектральный диапазон (LF) преобладает в случае доминирования симпатического звена в регуляции СР, а высокочастотный (HF) – парасимпатического звена. При возрастании роли центрального звена (симпатическая нервная система) в регуляции СР адаптационные возможности организма снижаются [18].

Как показал анализ, у 53% тестируемых детей (в 2011 и 2012 гг.) в регуляции СР преобладала симпатическая нервная система (центральное звено в регуляции СР), при значениях LF/HF от 1.5 до 2.5 и LF/HF > 3.5. Т.е. для 53% детей, прибывших из Заполярья на отдых в средние широты, характерно напряжение в системе регуляции сердечного ритма. На рис. 3 показано распределение тестируемых детей (%) по характеру регуляции СР на основе оценки соотношения уровней активности центрального (LF) и автономного (HF) контуров регуляции СР.

Вариабельность индивидуальных показателей адаптации и регуляции сердечного ритма проявляется и в индивидуальной длительности периодов, необходимых для достижения оптимальной адаптации к новым условиям. Анализ суммарных данных (за 2011 и 2012 гг.) особенностей адаптации детей Заполярья к средним широтам показал, что максимальная адаптация у детей к условиям средних широт имеет различную длительность. Одни (36%) хорошо адаптируются сразу после перемещения из высоких широт, другие (32%) – в середине, а третьи (32%) – в конце срока пребывания на отдыхе.

В работе [20] дана краткая характеристика психоэмоционального состояния детей в период отдыха на базе оздоровительного комплекса «Эковит» КНЦ РАН в 2012 г. В данной

статье приводятся статистические характеристики психоэмоционального состояния детей в этот период и детализируется характер связи между показателями психоэмоционального состояния.

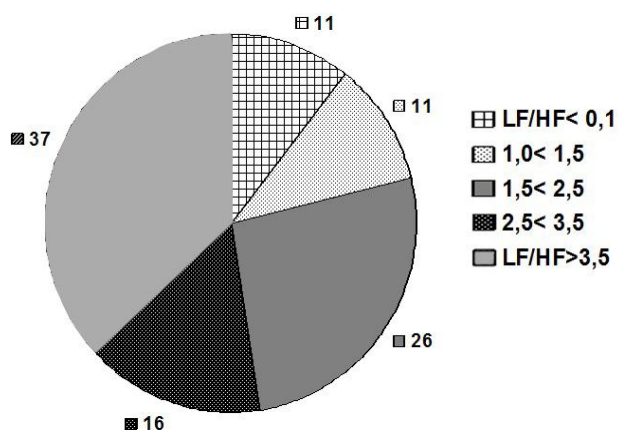


Рис. 3. Распределение тестируемых детей (%) по характеру регуляции сердечного ритма на основе оценки соотношения уровней активности центрального и автономного контуров регуляции: LF/HF < 0.1 – выраженное преобладание парасимпатического отдела ВСР; 1.0 < 1.5 – умеренное преобладание парасимпатического отдела ВСР, 1.5 < 2.5 – нормальный вегетативный баланс, 2.5 < 3.5 – умеренное преобладание симпатического отдела ВСР, LF/HF > 3.5 – выраженное преобладание симпатического отдела ВСР

### Психоэмоциональное состояние детей в 2012 г.

Анализ особенностей психоэмоционального состояния, оцененного на основе методики САН (самочувствие, активность, настроение) показал, что у девочек показатели самочувствия и настроения снизились в процессе отдыха, в то время как показатель активности повысился (табл. 2). В группе мальчиков все показатели психоэмоционального состояния к концу периода пребывания на отдыхе снизились (табл. 2). И хотя различия между показателями в начале и в конце отдыха статистически не достигают уровня значимости  $p \leq 0.05$ , тем не менее они отражают общую тенденцию снижения самочувствия, активности и настроения в конце пребывания на отдыхе.

Снижение показателей психоэмоционального состояния, оцененное по методике САН, в группах тестируемых детей соответствуют возрастанию личностной и реактивной (ситуационной) тревожности, выявленной по методу Спилбергера-Ханина. Оказалось, что уровень тревожности, как у девочек, так и у мальчиков, к концу смены возрастает (табл. 2).

Полученные данные показывают, что достаточно низкому уровню адаптации детей Заполярья к средним широтам соответствует и снижение их психоэмоционального состояния в конце периода пребывания на отдыхе. Имеется ли объективная зависимость и обратная связь между физиологическим и психоэмоциональным состоянием у детей? Что является первичным, снижение функциональных особенностей организма в силу напряжения механизмов адаптации к новым климатогеографическим условиям и связанное с физиологической нагрузкой снижение психоэмоционального состояния? Или снижение психоэмоционального состояния из-за социально-бытовых особенностей отдыха в оздоровительном комплексе «Эковит», и, как следствие, снижение функциональных возможностей организма?

Наши исследования в Заполярье (г. Апатиты) показали, что ведущим индикатором функционального состояния организма является длительность кардиоинтервала (R-R), от которой зависит психофизиологическое состояние человека. В частности, было выявлено, что индексы адаптации (А), интегрального показателя здоровья (ИП), высокочастотной компоненты спектрального диапазона СР (HF) возрастают при возрастании длительности R-R интервала. Однако при этом возрастает ситуативная (СТ) и личностная (ЛТ) тревожность, а также снижается самочувствие (С) и активность (Акт) [21]. Кроме того, обнаружено, что психофизиологическое состояние организма, в значительной мере, определяется гемодинамикой, выраженной, в частности, через артериальное давление и ЧСС [22]. А такие показатели, как артериальное давление, ЧСС, САН, СТ и ЛТ находятся, в определенной мере, под «контролем» гелиогеофизических агентов, которые могут модулировать функциональное состояние организма [22].

Таблица 2

Статистические характеристики психоэмоционального состояния детей (девочек и мальчиков) в начале и в конце периода отдыха, 2012 г.

Психоэмоциональные показатели	Девочки				
	M±m	Медиана	Min	Max	Ст. откл.
Самочувствие в начале смены	53.9±3.1	54.5	38.0	69.0	9.7
<b>Самочувствие в конце смены</b>	<b>51.9±5.2</b>	<b>52.0</b>	<b>24.0</b>	<b>70.0</b>	<b>15.6</b>
Активность в начале смены	42.9±3.3	41.0	30.0	65.0	10.6
<b>Активность в конце смены</b>	<b>46.6±3.6</b>	<b>45.0</b>	<b>32.0</b>	<b>65.0</b>	<b>10.76</b>
Настроение в начале смены	53.4±3.9	54.5	29.0	70.0	12.26
<b>Настроение в конце смены</b>	<b>49.9±5.2</b>	<b>55.0</b>	<b>20.0</b>	<b>69.0</b>	<b>15.5</b>
Реактивная тревожность в начале смены	39.2±4.2	37.0	23.0	65.0	12.5
<b>Реактивная тревожность в конце смены</b>	<b>41.8±4.2</b>	<b>42.0</b>	<b>24.0</b>	<b>62.0</b>	<b>11.9</b>
Личностная тревожность в начале смены	40.56±3.24	38.0	25.0	56.0	9.72
<b>Личностная тревожность в конце смены</b>	<b>45.88±4.18</b>	<b>47.5</b>	<b>30.0</b>	<b>63.0</b>	<b>11.84</b>
	Мальчики				
Самочувствие в начале смены	55.5±2.8	60.0	32.0	70.0	11.6
<b>Самочувствие в конце смены</b>	<b>54.6±2.8</b>	<b>56.0</b>	<b>31.0</b>	<b>70.0</b>	<b>11.4</b>
Активность в начале смены	48.5±2.6	51.0	27.0	61.0	10.6
<b>Активность в конце смены</b>	<b>47.2±2.4</b>	<b>51.0</b>	<b>31.0</b>	<b>61.0</b>	<b>9.8</b>
Настроение в начале смены	55.6±2.7	57.0	37.0	70.0	11.3
<b>Настроение в конце смены</b>	<b>54.2±2.4</b>	<b>59.0</b>	<b>37.0</b>	<b>70.0</b>	<b>10.0</b>
Реактивная тревожность в начале смены	36.8±2.5	37.0	22.0	58.0	10.4
<b>Реактивная тревожность в конце смены</b>	<b>41.3±3.2</b>	<b>44.0</b>	<b>20.0</b>	<b>56.0</b>	<b>11.5</b>
Личностная тревожность в начале смены	39.76±1.54	40.0	27	49	6.37
<b>Личностная тревожность в конце смены</b>	<b>40.54±2.15</b>	<b>42.0</b>	<b>30</b>	<b>51</b>	<b>7.75</b>

Таким образом, психоэмоциональное состояние находится, в определенной мере, в подчиненном положении по отношению к физиологическому, управляемому вариабельностью сердечного ритма, гемодинамикой, функциональным состоянием головного мозга [12]. Динамика же этих показателей модулируется геокосмическими агентами, наиболее важными из которых являются вариации геомагнитного поля и интенсивность космических лучей у поверхности Земли [1, 5, 6, 12–15, 23].

Для выявления вклада вариаций геофизических агентов в психофизиологическое состояние детей Заполярья в периоды отдыха в средних широтах была оценена теснота связи между функциональным состоянием организма детей в 2011 и 2012 гг., индексами геомагнитной активности и интенсивностью нуклонной компоненты космических лучей (КЛ) у поверхности Земли.

#### *Вклад вариаций геофизических агентов в модуляцию функционального состояния организма детей в 2011 и 2012 гг.*

Для выявления вклада вариаций геофизических агентов в психофизиологическое состояние детей в 2011 и в 2012 г.г. был проведен сравнительный анализ значений индексов геомагнитной активности (К-индекс) и интенсивности нуклонной компоненты КЛ у поверхности Земли (скорость нейтронного счета (НС) наземного нейтронного монитора на широте Москвы: 55°29' с.ш., 37°19' в.д.) в период отдыха детей в условиях высоких широт. Статистические характеристики значений индекса геомагнитной активности (К-индекс) и интенсивности нейтронов у поверхности Земли в периоды проведения исследований в 2011 и 2012 гг. представлены в табл. 3. Данные показывают, что средние значения индексов ГМА и скорости счета нейтронного монитора в 2011 и 2012 г. значимо ( $p < 0.05$ ) различаются между собой. Это означает, что воздействие «дозы» геофизических агентов на организм детей в 2011 и 2012 гг. было различным, что могло отразиться на их психофизиологическом и психоэмоциональном состоянии.

Таблица 3

Статистические характеристики значений индекса геомагнитной активности (К-индекс) и интенсивности нейтронов у поверхности Земли (нейтронный счет) на широте Москвы (.) в периоды проведения исследований в 2011 и 2012 гг.

Геофизические показатели	Годы	$M \pm m$	Минимум	Максимум	Дисперс.	Стд.откл.	$P$
К-индекс	2011	$2.13 \pm 0.19$	1.50	3.25	0.37	0.61	$p=0.0232$
	2012	$2.84 \pm 0.19$	1.50	5.00	0.63	0.79	
Нейтронный счет (НС)	2011	$9709 \pm 45$	9478	9988	20821	144	$p=0.0273$
	2012	$9508 \pm 59$	9137	10028	60782	246	

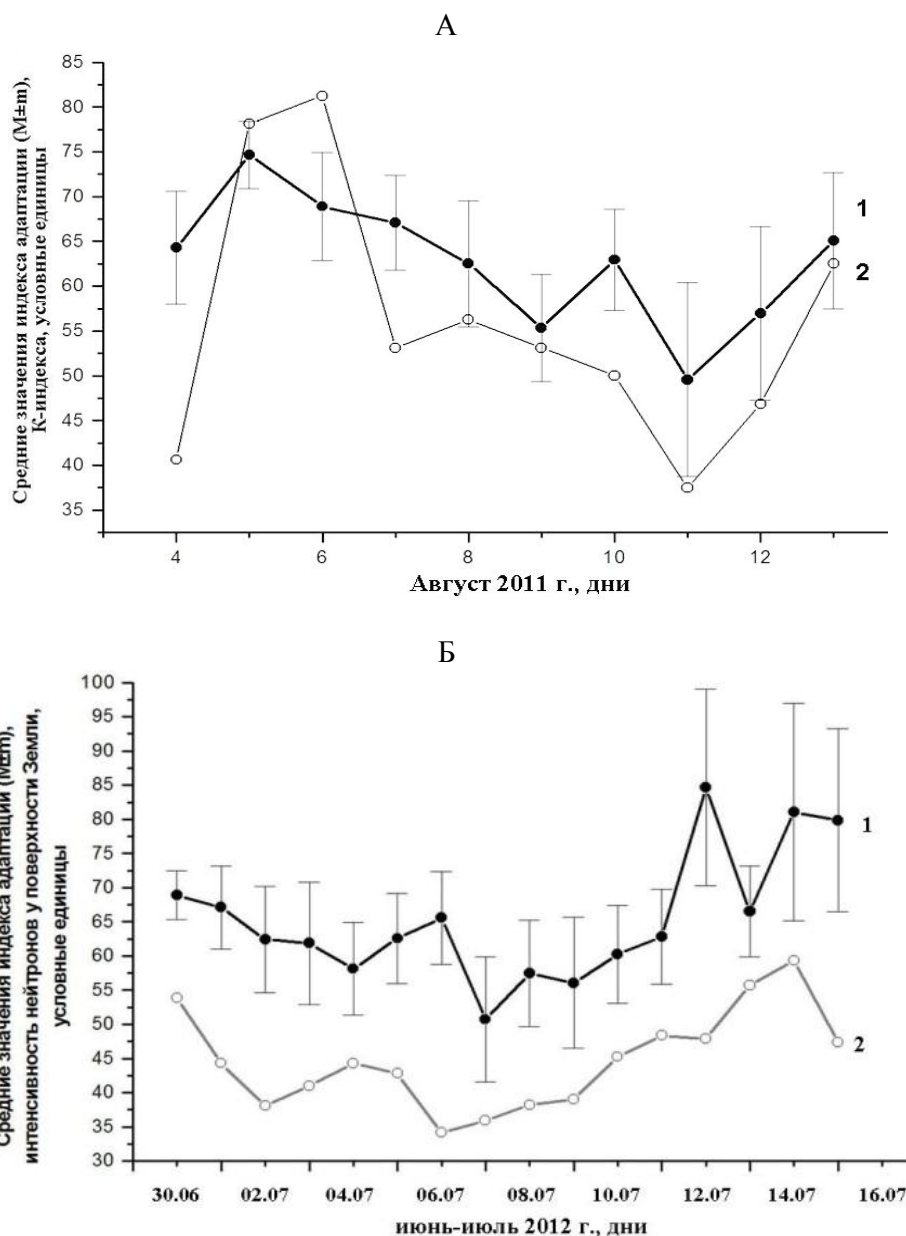


Рис. 4. Динамика среднесуточных значений показателей адаптации детей в 2011 (А, 1) и в 2012 (Б, 1) гг., вариаций индекса ГМА (К-индекса) (А, 2) и скорости счета нейтронного монитора (Б, 2). По оси абсцисс – даты исследований, по оси ординат – условные единицы

Анализ коэффициентов корреляции показателей психофизиологического состояния детей в исследуемые периоды с индексами ГМА и НС выявил, что в 2011 г. из 21 показателя психофизиологического состояния 16 имели значимые ( $p < 0.05$ ) коэффициенты корреляции с К-индексом и ни одной значимой связи с НС. Обратная картина обнаружилась в 2012 г. Из 21 показателя психофизиологического состояния 11 были значимо связаны с НС ( $p < 0.05$ ), и ни одной значимой связи не было обнаружено с К-индексом.

Примеры альтернативной связи показателей психофизиологического состояния детей с геофизическими агентами в 2011 и 2012 гг. приведены на рис. 4. Показана динамика среднесуточных значений показателей адаптации детей в 2011 г. и вариации индекса ГМА (К-индекса), коэффициент корреляции  $r = 0.80$ ,  $p < 0.05$  (рис. 4). На рис. 4 (Б) отражена динамика среднесуточных значений показателей адаптации детей в 2012 и вариации интенсивности нейтронов у поверхности Земли, коэффициент корреляции  $r = 0.63$ ,  $p < 0.05$ .

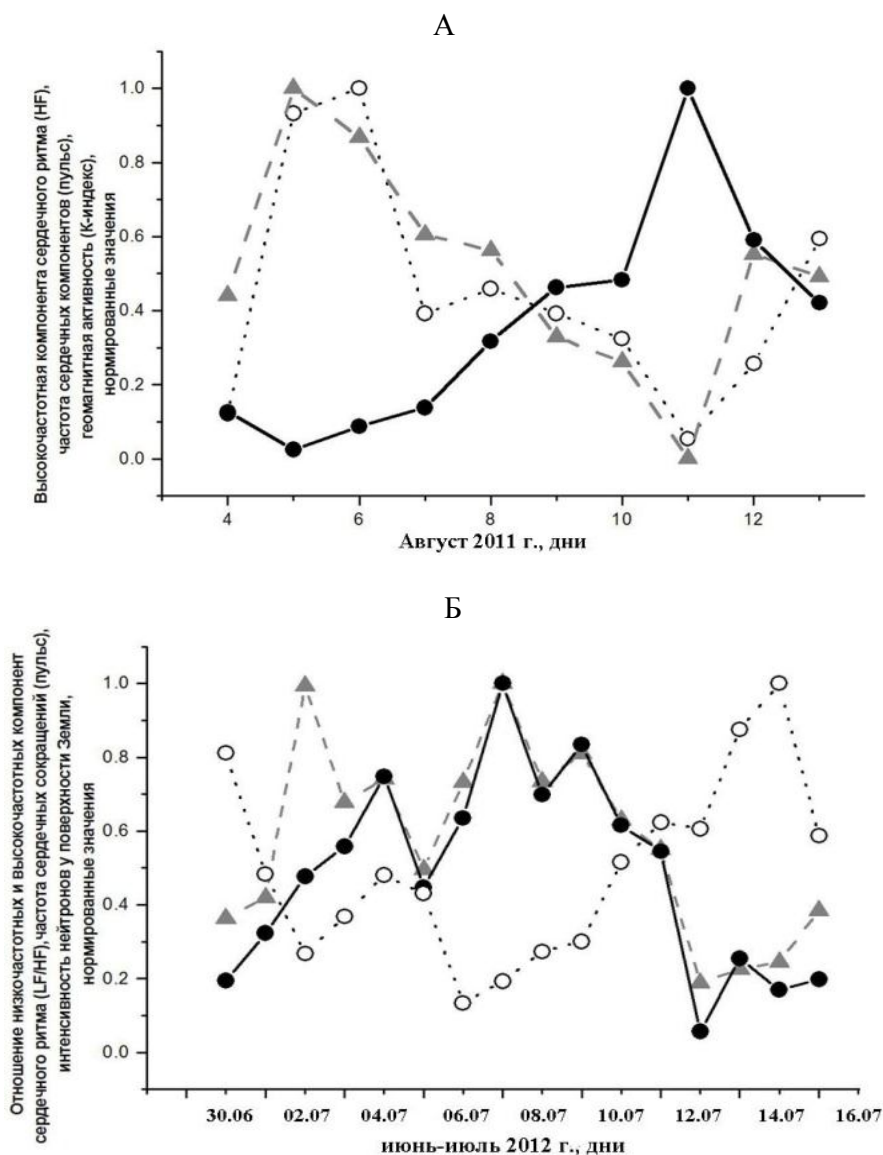


Рис. 5. Сопоставление связи параметров сердечного ритма с вариациями геофизических агентов в 2011 г. (А) и в 2012 г. (Б). А – среднесуточные значения частоты сердечных сокращений (сплошная линия), высокочастотная компонента сердечного ритма (HF) (штрихованная линия), среднесуточные значения К-индекса (пунктирная линия). Б – среднесуточные значения частоты сердечных сокращений (сплошная линия), частотных соотношений в спектральном диапазоне сердечного ритма (LF/HF) (штрихованная линия), среднесуточная скорость счета нейтронного монитора (пунктирная линия). По оси абсцисс – даты исследования, по оси ординат – условные единицы

Связь показателей, отражающих гемодинамику (ЧСС) и спектральный диапазон СР с вариациями геофизических агентов в 2011 и 2012 гг., приведена на рис. 5. Тесно связаны между собой показатели variability сердечного ритма у детей и вариации геофизических агентов. В 2011 г. (рис. 5, А) динамика среднесуточных значений частоты сердечных сокращений (ЧСС – пульс) имела обратную корреляцию ( $r = -0.64$ ,  $p < 0.05$ ), а высокочастотной компоненты СР (HF) – прямую ( $r = 0.85$ ,  $p < 0.05$ ) корреляцию с К-индексом. В 2012 г. (рис. 5, Б) динамика среднесуточных значений частоты сердечных сокращений, так же как и показатель соотношения частот в спектральном диапазоне СР (LF/HF), были значимо связаны обратной корреляцией с вариациями интенсивности нейтронной компоненты КЛ у поверхности Земли ( $r = -0.74$ ,  $r = -0.84$  соответственно,  $p < 0.05$ ).

Представленные результаты ясно показывают, что психофизиологическое и психоэмоциональное состояние детей модулируются вариациями геофизических агентов, причем вклад отдельных компонент геофизических агентов в модуляцию психофизиологического состояния организма различается в разные годы [8, 15, 16]. В 2011 г. состояние организма преимущественно модулируется вариациями ГМП, а в 2012 г. – интенсивностью нуклонной компоненты КЛ.

Исследование вклада вариаций геокосмических агентов в функциональное состояние организма показало, что оно модулируется кооперативным воздействием вариаций ГМП и КЛ, посредством «дозового» соотношения воздействий [15, 23, 24]. Если сопоставить между собой значения К-индекса и скорости нейтронного счета в исследуемый период в 2011 и 2012 гг. (табл. 3), то можно видеть, что в 2011 г. ГМА была ниже, а интенсивность нейтронов выше, чем в 2012 г. Т.е. «кооперативные эффекты» воздействия вариаций ГМП и интенсивности КЛ на организм, а также их «дозовые соотношения» в 2011 и в 2012 гг. были различны. Отсюда, вероятно, и различный характер связи показателей адаптации организма детей к средним широтам с вариациями геофизических агентов в годы с разным уровнем геомагнитной активности. Несмотря на то, что в вопросе «дозового» воздействия геофизических агентов на организм человека остается много неясного, тем не менее очевидно, что организм детей Заполярья проявляет высокую степень чувствительности к вариациям геофизических агентов при перемещении в более южные широты. Поэтому на вопросы, заданные выше, можно ответить, что снижение функциональных особенностей организма и психоэмоционального состояния в период отдыха связаны с напряжением механизмов адаптации к новым климатогеографическим условиям, повышающим чувствительность организма к климатическим и геофизическим воздействиям.

Высокая психофизиологическая и психоэмоциональная лабильность организма детей Севера и зависимость функционального состояния организма от вариаций геофизических агентов свидетельствует о высокой степени уязвимости здоровья детей при смене широтных и климатогеографических поясов. И в силу того, что длительность достижения оптимальной адаптации у детей носит индивидуальный характер, можно предположить, что отдых детей Заполярья в средних широтах должен быть более продолжительным, чем одна смена.

## **Выводы**

Оценка психофизиологического и психоэмоционального состояния детей, проживающих в высоких широтах, к условиям средних широт показала, что у 47% детей процесс адаптации происходит удовлетворительно при минимальном напряжении систем регуляции сердечного ритма. У 53% детей адаптация организма к условиям среды обеспечивается более высоким, чем в норме, напряжением регуляторных систем сердечного ритма с вовлечением дополнительных функциональных резервов сердечно-сосудистой системы, или совсем не происходит. Психоэмоциональное состояние к концу отдыха характеризуется снижением самочувствия, настроения и повышением уровня личностной и ситуационной тревожности. Показана высокая психофизиологическая и психоэмоциональная зависимость состояния организма детей от вариаций геофизических агентов, в том числе от «дозового» соотношения вариаций ГМП и КЛ. Можно предположить, что дети Заполярья сенсibilизированы к вариациям условий среды в силу проживания на Севере, где их организм подвергается частым и интенсивным воздействиям со стороны геофизических агентов, характерных для условий высоких широт. Поэтому смена

климатогеографического пояса и изменение «дозы» геофизических воздействий при перемещении с Севера на юг, вероятно, воспринимаются организмом детей как дополнительная нагрузка (стресс-фактор), для адаптации к которой требуется более длительное время пребывания в условиях средних широт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Белишева Н.К.* Медико-биологические исследования на Шпицбергене как действенный подход для изучения биоэффективности космической погоды / *Н.К. Белишева и др.* // Вестник КНЦ РАН. 2010. № 1. С. 26-33.
2. *Бобров Н.И.* Физиолого-гигиенические аспекты акклиматизации человека на Севере / *Н.И. Бобров, О.П. Ломов, В.П. Тихомиров.* Л.: Медицина, 1979. 184 с.
3. *Шеповальников В.Н.* Метеочувствительность человека / *В.Н. Шеповальников, С.И. Сороко;* отв. ред. д.мед.н., проф. В.А. Яковлев. Бишкек: «Илим», 1992. 247 с.
4. *Деряпа Н.Р.* Адаптация человека в полярных районах Земли / *Н.Р. Деряпа, И.Ф. Рябинин.* Л.: Медицина, 1977. 296 с.
5. *Белишева Н.К.* Исследование роли гелиогеофизических и метеорологических факторов в изменчивости variability сердечного ритма у различных категорий населения на Севере / *Н.К. Белишева, С.А. Черноус* // Север – 2003: Проблемы и решения: сб. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2004. С. 43–51.
6. Изучение зависимости функционального состояния организма человека от глобальных и локальных вариаций геокосмических агентов в условиях Заполярья / *Н.К. Белишева и др.* // Научное обеспечение развития технобиосферы Заполярья: база знаний и пакет инновационных предложений [электронный ресурс] / отв. ред. А.Н. Виноградов. Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 1 электрон.опт. диск (CD-ROM). С. 23–54.
7. Эндокринная система и обмен веществ у человека на Севере / *А.В. Ткачев и др.;* отв. ред. акад. М.П. Рощевский. Сыктывкар, 1992. 155 с.
8. *Белишева Н.К.* Вклад высокоширотных гелиогеофизических агентов в картину заболеваемости населения Мурманской области / *Н.К. Белишева, Л.В. Талыкова, Н.А. Мельник* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, №1(8). С. 1831–1836.
9. *Гора Е.П.* Экологическая физиология человека: в 2-х т. М.: ИНФРА-М, 1999.
10. *Belisheva N.K.* The effects of cosmic rays on biological systems – an investigation during GLE events / *N.K. Belisheva et. al.* // *Astrophys. SpaceSci. Trans.* 2012. Vol. 8. P. 7–17.
11. *Белишева Н.К.* Эффекты солнечных протонных событий в распространенности врожденных пороков развития у детей / *Н.К. Белишева, Л.В. Талыкова* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14., № 5(2). С. 323–325.
12. Качественная и количественная оценка воздействия вариаций геомагнитного поля на функциональное состояние мозга человека / *Н.К. Белишева и др.* // Биофизика. 1995. Вып. 5. С. 1005–1012.
13. *Белишева Н.К.* Значение вариаций геомагнитного поля для функционального состояния организма человека в высоких широтах / *Н.К. Белишева, С.А. Конрадов* // Геофизические процессы и биосфера. 2005. Т. 4, № 1/2. С. 44–52.
14. *Belisheva N.K. et.al.* Impact of the High Latitude Geomagnetic Field Variations on the Human Cardiovascular System / *Proceeding of an International Scientific Workshop: Space Weather Effects on biological System and Human Health held in Moscow, Russia* / *Belisheva N.K., Konradov A.A., I.N. Janvareva;* eds. O.Yu. Atkov, Yu.I. Gurfinkel. Moscow, 2006. P. 86–87.
15. *Белишева Н.К.* Кооперативное воздействие вариаций геомагнитного поля и космических лучей на состояние сердечно-сосудистой системы человека на Севере // Проблемы адаптации человека к экологическим и социальным условиям Севера / отв. ред. Е.Р. Бойко. Сыктывкар; С. Петербург: Политехника-сервис, 2009. С. 48–57.
16. Психо-физиологическое состояние подростков на Севере в условиях минимума солнечной активности / *Д.А. Петрашова и др.* // Адаптация человека к экологическим и социальным условиям Севера. Сыктывкар: УрО РАН, 2012. С. 83–89.
17. *Келлер А.А.* Медицинская экология / *А.А. Келлер, В.И. Кувакин.* СПб.: Петроградский и К°, 1998. 256 с.
18. *Баевский Р.М.* Введение в донологическую диагностику / *Р.М. Баевский, А.П. Барсенева.* М.: Слово, 2008. 220 с.
19. Практическая психодиагностика. Методы и тесты: уч. пос. / под ред. Д.Я. Райгородский. Самара: Бахрах-М, 2001.
20. Адаптация подростков Заполярья к условиям средних широт (Воронежская область) / *А.А. Мартынова и др.* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14., № 5(2). С. 391–393.
21. *Pryanichnikov S.V.* Psychophysiological effects of heliogeophysical agent / *S.V. Pryanichnikov et. al.* // 36<sup>th</sup> Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena. Apatity. 2013. P. 73–74.
22. *Martynova A.A.* The interrelationship of the physiological parameters and effects of heliogeophysical agents / *A.A. Martynova et. al.* // 36<sup>th</sup> Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena. Apatity, 2013. P. 71–72.
23. Cooperative influence of geocosmical agents on human organism / *N.K. Belisheva et. al.* // *Physics of Auroral Phenomena;* eds. I.V. Golovchanskaya, N.V. Semenova. Apatity, 2007. P. 221–224.
24. *Белишева Н.К.* Эндогенная и экзогенная причинность заболеваемости на Севере // Адаптация человека к экологическим и социальным условиям Севера. Сыктывкар: УрО РАН, 2012. С. 73–83.

#### Сведения об авторах

*Мартынова Алла Александровна* – к.б.н, научный сотрудник; e-mail: martynovaalla@yandex.ru

*Пряничников Сергей Васильевич* –техник; e-mail: prjanik.75@mail.ru

*Пожарская Виктория Викторовна* – к.б.н., старший лаборант; e-mail: vika\_pozharskaja@mail.ru

*Белишева Наталья Константиновна* – д.б.н., чл.-корр. МАНЭБ, рук. отдела;

e-mail: natalybelisheva@mail.ru



## ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИИ АНИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ

**С.И. Печенюк**

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева КНЦ РАН

### Аннотация

Кратко изложены основные результаты систематического фундаментального исследования сорбции анионных комплексов платиновых металлов, хрома и железа и анионов-загрязнителей окружающей среды (арсенат, хромат, фосфат, оксалат) аморфными оксигидроксидами железа, циркония, алюминия и хрома. Представлены механизмы сорбции в свете современных воззрений на взаимодействие ионов с электрически заряженной поверхностью и образование поверхностных сорбционных комплексов.

### Ключевые слова:

*сорбция, сорбционный комплекс, поверхностный заряд, изотерма сорбции, извлечение, механизм сорбции, точка нулевого заряда.*



Систематическое фундаментальное исследование сорбции анионов оксигидроксидами проводилось с 1975 г. по 2012 г. включительно. В разные годы в этой работе принимали участие сотрудники ИХТРЭМС КНЦ РАН: Л.Ф. Кузьмич, Е.И. Дементьева, А.Г. Касиков, Е.В. Калинкина, Т.Г. Кашулина, С.И. Матвеев, В.В. Семушин, Ю.П. Семушина, Д.П. Домонов. На основе полученных данных были защищены 4 кандидатские диссертации (А.Г. Касиков, Т.Г. Кашулина, Е.В. Калинкина и Ю.П. Семушина) и докторская диссертация автора. Для удобства изложения материал представлен в виде двух статей, первая из которых посвящена преимущественно анионным комплексам платиновых металлов, а вторая (см. в следующем выпуске журнала) – другим анионам.

Сорбционный метод концентрирования микрокомпонентов растворов и (или) очистка растворов от микропримесей позволяет обрабатывать большие объемы растворов без изменения их состава и внесения дополнительных загрязнений, в отличие от реагентных методов, а также экстракции. Поэтому сорбция, по-видимому, никогда не исчезнет из практики. Однако успешное применение сорбции требует правильного выбора сорбента и условий его применения, для чего необходимо знание механизма сорбционного процесса. Процессы же сорбции очень разнообразны и радикально различаются по своим механизмам (комплексообразовательная, ионообменная, электростатическая, гидролитическая сорбция и проч.).

Первыми объектами изучения из числа анионных сорбатов являлись комплексные анионы платиновых металлов. Имевшаяся на 1975 г. литература по концентрированию благородных металлов (БМ) [например, 1–3] и ознакомление с состоянием производства на комбинатах «Североникель» и «Норильский никель» показало, что имеется ряд многочисленных проблем в области извлечения БМ из различных технологических растворов, что создавало широкое поле деятельности для исследователей, владеющих одновременно техникой сорбционных исследований, работы с БМ и знаниями и навыками в области координационной химии. В качестве адсорбентов были выбраны *оксигидраты* металлов (или, как теперь принято выражаться, оксигидроксиды). Под оксигидроксидами подразумеваются труднорастворимые соединения типа  $MO_x(OH)_y$ . Выбор был обусловлен простотой синтеза, доступностью и дешевизной этих сорбентов, простотой их регенерации и извлечения из них ценных компонентов.

Из совокупности изученной литературы следовало, что в процессах сорбционного концентрирования БМ из водных растворов большую роль играет взаимодействие сорбируемых ионов или молекул с водой. В случае комплексных ионов сорбата – это гидролиз с последующим депротонированием аквапроизводного, в случае простых ионов – присоединение гидроксидов или протонов [4, 5]. Это тесно связывает между собой теорию сорбции, координационную

химию и кислотно-основные равновесия. Галогенидные и сульфатные комплексы платиновых металлов (ПМ) в качестве сорбатов были избраны, во-первых, в силу практической важности вопроса об их сорбционном извлечении из растворов, поскольку исследованиями С.А. Симановой с сотр. [6, 7] и Н.М. Сеницына с сотр.[8, 9] было доказано, что именно эти формы присутствуют в технологических растворах медно-никелевого производства, которое в течение последних 50–70 лет – основной источник получения БМ. Во-вторых, они – классические объекты координационной теории, о составе, строении и свойствах которых имеются обширные сведения. В растворах ПМ являются микрокомпонентами; в то же время их комплексы весьма устойчивы и инертны, что обуславливает устойчивость их состояния в растворе, и усугубляет трудность их извлечения. Исходя из литературных данных о константах устойчивости комплексов и константах скорости аквакации (гидролиза) в растворах, которые весьма неполны, а также ряда косвенных данных, можно утверждать, что термодинамическая устойчивость комплексов-сорбатов уменьшается в последовательности I, а кинетическая инертность – в последовательности II.

I.  $[PtCl_6]^{2-} \geq [IrCl_6]^{2-} > [IrCl_6]^{3-} \geq [PtCl_4]^{2-} \geq [RhCl_6]^{3-} > [PdCl_4]^{2-} > [OsCl_6]^{2-} > [RhCl_3(H_2O)_3] > [RuCl_5H_2O]^{2-} > [Ru_2OCl_{10}]^{4-}$ ,  $[Ir_3O(SO_4)_6X_3]$ ,  $[Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-}$

II.  $[OsCl_6]^{2-} > [IrCl_6]^{2-} \geq [PtCl_6]^{2-}$ ,  $[IrCl_6]^{3-} > [Ir_3O(SO_4)_6X_3] > [PtCl_4]^{2-} > [RhCl_6]^{3-} > [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-} > [PdCl_4]^{2-} > [RuCl_5H_2O]^{2-}$ ,  $[Ru_2OCl_{10}]^{4-}$ .

Изучение литературы в начале исследования выявило *две особенности* сорбционных исследований тех лет:

1) зачастую не обращалось внимания на состав сорбатов, т.е. природу сорбируемых комплексов, хотя в зависимости от степени окисления центрального атома, реакции среды и концентрации лиганда эта природа сильно различается;

2) удивительно мало уделялось внимания кинетическому аспекту сорбции, что, как оказалось, для ПМ имеет первостепенное значение [10]. Поэтому само исследование сорбции было построено преимущественно как кинетическое. Основными экспериментальными данными служили кинетические кривые извлечения в координатах  $C_p$  или  $A=f(t)$  (рис. 1). В экспериментах использовали высокий ионный фон: хлорид и сульфат натрия и их смесь (с ионной силой 1–2) [11]. Условия изучения сорбции представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия исследования гетерогенного гидролиза. Электролиты и область их концентраций: NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaClO<sub>4</sub>, 0.1 – 4.0 моль/л; концентрации комплекса:  $(1 - 10) \times 10^{-4}$ , моль/л

Комплексы	Сорбенты	Температурный интервал, °С	область pH	концентрации сорбента, г/л
$[Ru_2OCl_{10}]^{4-}$	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , феррогель	3–50	2–4	1–40
$[RuH_2OCl_5]^{2-}$		20–70		1–20
$[RhCl_6]^{3-}$ , $[OsCl_6]^{2-}$	20–50			5
$[RhCl_3(H_2O)_3]$	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3–80	3–10	1–20
$[PdCl_4]^{2-}$	Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub> феррогели	20–80	3–12	
$[PtX_4]^{2-}$ (X = Br <sup>-</sup> , CNS <sup>-</sup> , CN <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40–80	4–5	5
$[Ir_3O(SO_4)_6X_3]$ (X = SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O) $[Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-}$	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , феррогели	40–75	3–5	5

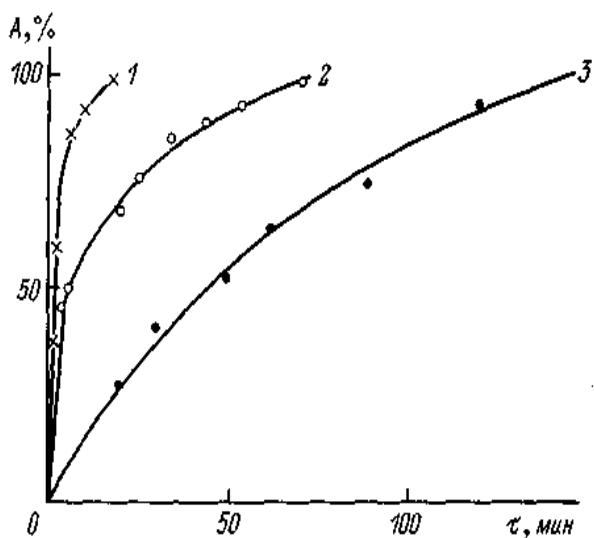


Рис. 1. Кинетические кривые гетерогенного гидролиза  $[RuH_2OCl_5]^{2-}$  на поверхности  $Y_2O_3 \cdot nH_2O$  ( $30^\circ C$ ). Ионный фон  $C$ , моль/л: 1 — 0.1 NaCl; 2 — 4.0 + 0.5 (NaCl +  $Na_2SO_4$ ); 3 — 4.0 NaCl

Изучение сорбции ПМ на оксигидратах было начато с использованием в качестве сорбентов сухих кристаллических оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ). Это было в достаточной мере случайно потому, что в институте много занимались выделением РЗЭ из местного сырья. Были опробованы все индивидуальные оксиды РЗЭ, кроме скандия, прометия, тулия и лютеция. Установлено, что во всех случаях оксидов  $Ln^{3+}$  процесс идет аналогичным образом, поэтому большая часть экспериментов была выполнена затем на полтораоксидах иттрия, самария и иттербия. Оказалось, что для всех изученных комплексов ПМ процесс идет аналогичным образом, но сильно различается в отношении скорости. Скорость реакции для всех комплексов, за исключением комплекса палладия, хорошо описывается уравнением I порядка по концентрации комплекса в растворе, поэтому процессы извлечения ПМ в дальнейшем характеризовали величиной наблюдаемой константы скорости  $K_n$ . В зависимости от природы ПМ величины  $K_n$  при одних и тех же температурах различаются на 4–5 порядков (табл. 2). Поэтому для разных комплексов-сорбатов для определения величин энергий активации использовали разные наборы температур в интервале 3–80 °C. Зависимость скорости процесса от природы РЗЭ иллюстрирует рис. 2.

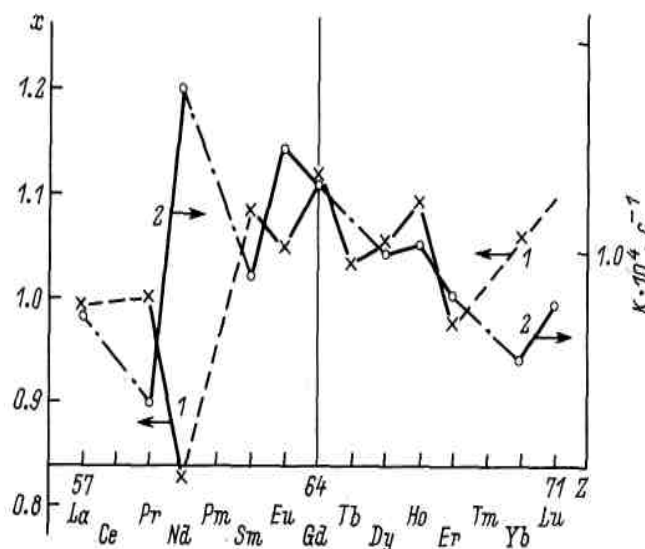


Рис. 2. Зависимость степени превращения  $[PtCl_6]^{2-}$  (1) и константы скорости гетерогенного гидролиза  $[IrCl_6]^{3-}$  (2) ( $K \cdot 10^4, c^{-1}$ ) на поверхности  $Ln_2O_3 \cdot nH_2O$  от атомного номера  $Ln$ .  $C_{Ir} = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л;  $C_{Pt} = 1.25 \cdot 10^{-4}$  моль/л;  $Ln_2O_3 - 1 \cdot 10^{-3}$  моль. Температура, °C: 1 — 50; 2 — 80. X — отношение степени превращения на поверхности  $Ln_2O_3 \cdot nH_2O$  к степени превращения на поверхности  $Y_2O_3 \cdot nH_2O$ . Z — атомный номер

Процесс сорбции на поверхности оксигидратов РЗЭ (и, как потом оказалось, также феррогелей, осажденных щелочью и  $MCO_3$ , где  $M=Ca, Sr, Ba$ ) [10, 11] протекает следующим образом. Когда мы вносим навеску воздушно-сухого оксида в раствор (на примере взаимодействия с раствором фонового электролита, рис. 3), псевдоравновесие гидратации устанавливается не более чем за 10 мин при 25 °C для всех оксидов РЗЭ во всех используемых ионных средах. При более высоких температурах, естественно, скорее. Далее процесс удаления ПМ из раствора является самопроизвольно рН-статическим (рис. 4), т.е. 60–70% ПМ удаляется при постоянном значении рН, и только потом начинается слабый рост рН (~на 0.5 ед.). Величина остаточной концентрации близка к 0 при достаточно длительном контакте раствора и сорбента. Анализ фильтратов дисперсионной среды и сорбента с сорбированными ПМ показал, что все изученные хлоридные и сульфатные комплексы,

кроме  $[\text{PtCl}_6]^{2-}$  и отчасти  $[\text{RhCl}_6]^{3-}$ , в результате взаимодействия с поверхностью к моменту  $A \approx 100\%$  полностью разлагаются с отщеплением и переходом в раствор всех координированных лигандов ( $100 \pm 3\%$ , что соответствует точности определения хлорид- и сульфат-ионов). Процессы перехода лигандов в раствор и перехода ПМ на поверхность сорбента происходят одновременно. В случае хлоридной и сульфатно-хлоридной сред приходится ограничиться анализом твердой фазы. Pt(IV) и Rh(III) удерживают в фазе сорбента 2 и 1, соответственно, иона хлора. Аналогично происходит процесс сорбции ПМ на карбонатах щелочноземельных металлов. Белые и бледно окрашенные оксиды РЗЭ и карбонаты II группы приобретают за счет осаждения ПМ характерную окраску, для рутения – зеленовато-серую, для родия и Pt(IV) – желтую, для палладия – коричневую, для осмия и Pt(II) – серую (черную), для Ir(IV) – фиолетовую. Осажденные фазы ПМ аморфны, электронографический и ИК-спектроскопический методы регистрируют только сорбент. Электронные микрофотографии показывают, что осажденная фаза располагается на поверхности сорбента в виде островков или корки. Растворы, полученные взаимодействием хлорной кислоты и сорбента с осажденной фазой ПМ, показывают электронные спектры поглощения, характерные для аквагидроксиполикатионов ПМ. Ионный обмен подтверждает, что ПМ в этих растворах находится в катионной форме. Совокупность полученных результатов анализа осажденных форм ПМ показывает, что сорбция комплексов ПМ на оксигидратах РЗЭ,  $\text{MCO}_3$  и феррогелей (в присутствии ионного фона с ионной силой  $\geq 0.1$ ) сопровождается их гидролитическим расщеплением с полным высвобождением лигандов и переходом их в раствор и осаждением ПМ на поверхности оксигидратов в виде полимерных гидроксидов. Гидролиз комплексов при этом идет значительно быстрее и более глубоко, чем в растворе. По совокупности этих признаков вышеописанный процесс стал именоваться *гетерогенным гидролизом* в отличие от *гомогенного*, т.е. происходящего в растворе. Процессы гетерогенного гидролиза имеют величины энергий активации, характерные для химической реакции – 60–120 кДж/моль, причем  $E_a$  тем больше, чем больше константа устойчивости комплекса. Наиболее высокое значение  $E_a$  наблюдается для комплексов иридия. Скорость процесса уменьшается с увеличением концентрации хлорид-ионов в растворе (избытка лиганда) и возрастает с увеличением концентрации сульфат-ионов, согласно уравнению:  $K_n = a \pm b[L]$  без существенных изменений  $E_a$ .

Таблица 2

Зависимость констант скорости ( $K_n, \cdot 10^4 \text{c}^{-1}$ ) гетерогенного гидролиза хлорокомплексов платиновых металлов на поверхности оксигидратов РЗЭ от природы ионного фона

Комплекс	ОГ	Т, °С	Ионный фон, моль/л				
			Без фона	0.1 $\text{NaClO}_4$	0.5 $\text{Na}_2\text{SO}_4$	1.0 $\text{NaCl}$	1.0 +0.5 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ + $\text{NaCl}$
$[\text{RuH}_2\text{OCl}_5]^{2-}$	$\text{Y}_2\text{O}_3$	30	–	–	27.2	9.5	6.3
$[\text{RhCl}_3(\text{H}-_2\text{O})_3]$	$\text{Sm}_2\text{O}_3$	50	16.2	17.2	123	9.5	65.3
$[\text{RhCl}_6]^{3-}$		40	–	–	10.5	1.9	6.2
$[\text{IrCl}_6]^{3-}$	$\text{Y}_2\text{O}_3$	70	4.6	1.7	15.4	2.8	8.2
$[\text{IrCl}_6]^{2-}$		80	9.1	7.0	1.2	4.7	8.5
$[\text{PtCl}_6]^{2-}$		80	0.9	0.3	0.1	–	–
$[\text{PtCl}_4]^{2-}$	$\text{Sm}_2\text{O}_3$	75	33.7	30	25	0.4	1.2

Извлечение ПМ из раствора оксидами РЗЭ вполне пригодно для практических целей, если раствор не содержит больших количеств цветных металлов (ЦМ) и железа. Так, в 1984 г. успешно проведены полупромышленные испытания извлечения платины техническим оксидным концентратом РЗЭ из растворов перхлората натрия (электролитическое производство перхлората).

Оксиды РЗЭ создают в растворе рН, примерно равный 6–7, поэтому использование их в растворах ЦМ приводит к сильному осаждению гидроксидов ЦМ. Кроме того, оксиды РЗЭ дороги. Более привлекательным сорбентом является оксигидрат Fe(III), который к тому же является естественным спутником ПМ в рудах. Оксигидрат Fe(III) выделяется в процессе очистки анолита при производстве никеля и меди и самопроизвольно концентрирует в себе большую часть растворенных при электролизе чернового никеля (меди) ПМ.

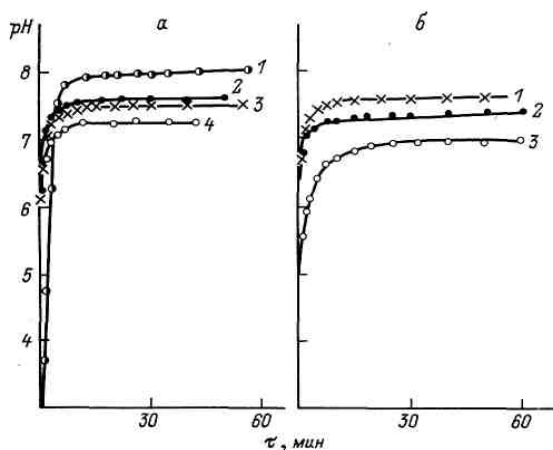


Рис. 3. Установление равновесия гидратации при контакте воздушно-сухих оксидов РЗЭ с раствором электролита при 25 °С. а –  $Y_2O_3$ ; электролит (1.0 моль/л): 1 –  $Na_2SO_4$ ; 2 –  $NaNO_3$ ; 3 –  $NaCl$ ; 4 –  $NaClO_4$ ; б – в растворе 1.0 моль/л  $NaNO_3$ : 1 –  $Y_2O_3$ ; 2 –  $Sm_2O_3$ ; 3 –  $Yb_2O_3$

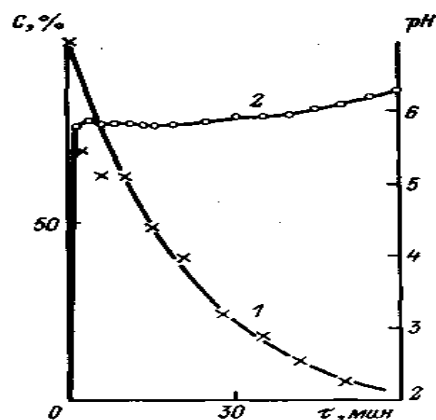


Рис. 4. Синхронные измерения остаточной концентрации  $[RuH_2OCl_5]$  (1) и pH (2) при гетерогенном гидролизе в растворе 1.0 моль/л  $NaCl$  ( $C_{Ru} = 5.3 \cdot 10^{-4}$  моль/л) на поверхности  $Y_2O_3$  при 30 °С

Оксигидрат Fe(III) использовали в 2-х вариантах: применяя в качестве осадителя NaOH и  $Na_2CO_3$ , и различные pH осаждения в интервале 4–11. Гетерогенный гидролиз на поверхности феррогелей протекает только в присутствии фонового электролита (хлорид, сульфат, нитрат, перхлорат натрия) с ионной силой не менее 0.1, в отличие от оксидов РЗЭ. При ионной силе, создаваемой самими комплексами, т.е. близкой к 0, комплексы ПМ очень быстро (в течение нескольких минут) сорбируются при комнатной температуре. Сорбированное вещество включает несколько форм: исходный комплекс и частично аквагидратированные его производные, например, для Pt(IV) –  $[PtCl_6]^{2-}$ ,  $[PtCl_5H_2O]^-$ ,  $[PtCl_4(H_2O)_2]^0$  и т.д.

Гетерогенный гидролиз на поверхности феррогелей сохраняет те же закономерности, что и на оксидах РЗЭ, но с некоторыми особенностями.

Наиболее общие черты реакций гетерогенного гидролиза (ГГ):

- хорошее соответствие скорости процессу уравнению первого (псевдопервого) порядка для всех комплексов, кроме палладия и осмия;
- довольно низкая скорость процесса:  $K_n = 10^{-5} - 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  в интервале температур 3–80 °С. Величины  $K_n$  и  $E_a$  в системах с оксидами РЗЭ, феррогелями и карбонатами II группы очень близки, существенное ускорение процесса наблюдается только для  $[PtCl_6]^{2-}$  на феррогелях;
- ярко выраженная температурная зависимость скорости, которая показывает, что скоростьопределяющей стадией процесса является химическая реакция;
- возможность аффинных преобразований кинетических кривых для различных величин параметров процесса (температура, концентрация ионного фона), что указывает на сохранение последовательности элементарных актов, т.е. на неизменность механизма процесса при изменении этих параметров;
- зависимость величины константы скорости  $K_n = a \pm b[L]$ ; в системах с оксидами РЗЭ знак «←» соответствует  $L = Cl^-$ , знак «+» –  $L = SO_4^{2-}$ , для феррогелей – наоборот;
- во всех случаях гетерогенный гидролиз происходит в условиях постоянного содержания кислоты и основания ее в системе. При добавлении сорбента к раствору сорбата имеет место первоначальный скачок pH, после чего на оксидах РЗЭ,  $MSO_3$  и OH-феррогелях процесс происходит в самопроизвольном pH-статическом режиме;
- концентрации сорбента и сорбата относительно слабо влияют на скорость процесса;
- все зависимости ГГ сохраняются для феррогелей (и, как потом оказалось, для гелей оксигидратов (ОГ) других металлов) при обязательном условии наличия фонового электролита с

ионной силой не менее 0.1; в противном случае на гелях ОГ происходит быстрая электростатическая сорбция с сохранением состава сорбата;

- скорость ГГ на феррогелях зависит, кроме вышеперечисленных факторов, от pH осаждения ( $pH_{oc}$ ), природы исходной соли и природы осадителя (щелочь и сода). Это означает, как будет показано дальше, что скорость ГГ зависит от знака и плотности поверхностного заряда, структуры поверхности геля и суммарного содержания кислоты и основания в системе. Поскольку гидрогели металлов являются неравновесными, термодинамически неустойчивыми образованиями, продолжительность их жизни должна сильно сказываться на их свойствах. В дальнейшем было проведено исследование влияния старения гидрогелей на их сорбционные свойства;

- скорость ГГ зависит от природы комплекса-сорбата для одного и того же сорбента следующим образом:

- в отсутствие ионного фона на оксигидратах РЗЭ, полный кинетический ряд (для всех изученных комплексов):  $[Pt(CN)_4]^{2-} \ll [Pr(NO_2)_4]^{2-} < [PtCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{3-} < [Pt(CNS)_4]^{2-} < [PtCl_4]^{2-} \leq [Ir_3O(SO_4)_6X_3] < [RhCl_6]^{3-} < [PtBr_4]^{2-} < [RhCl_3(H_2O)_3] < [OsCl_6]^{2-} < [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-} < [RuCl_5H_2O]^{2-} < [Ru_2OCl_{10}]^{4-} < [PdCl_4]^{2-}$ ;

- в присутствии 1.0 моль/л NaCl на оксигидратах РЗЭ:  $[PtCl_6]^{2-}, [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-}, [PtCl_4]^{2-}, [PdCl_4]^{2-} < [IrCl_6]^{2-}, [IrCl_6]^{3-} < [Ir_3O(SO_4)_6X_3] < [RhCl_6]^{3-}, [RhCl_3(H_2O)_3], [OsCl_6]^{2-} < [RuCl_5H_2O]^{2-}, [Ru_2OCl_{10}]^{4-}$ ;

- в присутствии 0.5 моль/л  $Na_2SO_4$  на оксигидратах РЗЭ:  $[PtCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{3-} < [PtCl_4]^{2-} \leq [Ir_3O(SO_4)_6X_3] < [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-} < [RhCl_6]^{3-} < [RhCl_3(H_2O)_3] < [OsCl_6]^{2-} < [RuCl_5H_2O]^{2-} < [Ru_2OCl_{10}]^{4-} < [PdCl_4]^{2-}$ ;

- в присутствии 0.5 моль/л  $Na_2SO_4$  на феррогелях:  $[PtCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{3-} < [OsCl_6]^{2-} \leq [PtCl_4]^{2-} < [RhCl_6]^{3-}, [Ir_3O(SO_4)_6X_3], [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-} < [RuCl_5H_2O]^{2-} < [PdCl_4]^{2-}$ ;

- в присутствии 1.0 моль/л NaCl + 0.5 моль/л  $Na_2SO_4$  на оксигидратах РЗЭ:  $[PtCl_6]^{2-} \leq [PtCl_4]^{2-}, [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-} < [PdCl_4]^{2-} < [IrCl_6]^{2-}, [IrCl_6]^{3-} < [Ir_3O(SO_4)_6X_3] < [RhCl_6]^{3-} < [RhCl_3(H_2O)_3] < [OsCl_6]^{2-} < [RuCl_5H_2O]^{2-}$ ;

- в присутствии 1.0 моль/л NaCl + 0.5 моль/л  $Na_2SO_4$  на феррогелях:  $[PtCl_4]^{2-}, [Pt_2(SO_4)_4OH_2O]^{3-} < [PtCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{2-} < [IrCl_6]^{3-}, [PdCl_4]^{2-} < [RhCl_6]^{3-}, [OsCl_6]^{2-} < [Ir_3O(SO_4)_6X_3] < [RuCl_5H_2O]^{2-}$ .

Ряды зависимости  $E_a$  от природы комплекса являются, за малыми исключениями, обратными рядам зависимости от скорости. Гетерогенный гидролиз не является окислительно-восстановительной реакцией, и только для комплексов иридия и рутения он сопровождается окислительно-восстановительными превращениями III $\leftrightarrow$ IV, которые происходят и в растворах при изменении кислотности среды.

Закономерности, полученные для ГГ на оксигидратах РЗЭ,  $MCO_3$  и феррогелях, хорошо совпадают друг с другом, и это показывает, во-первых, что скорость ГГ в большой степени определяется природой комплекса и, во-вторых, что между этими сорбентами, несмотря на их химическое различие, существует значительное сходство, связанное, по-видимому, со свойствами поверхности.

Поскольку скорость ГГ разных комплексов различается на несколько порядков, ясно, что путем ГГ можно разделять смеси ПМ. Так, при комнатной температуре можно выделить из смеси рутений. Подняв температуру раствора на 10–20 °С, выделить затем осмий и родий. Подняв температуру до 80 °С, на оксигидратах РЗЭ можно выделить иридий, после чего в растворе останутся только платина и палладий.

Феноменологическое описание сорбции анионных комплексов ПМ, механизм гетерогенного гидролиза, анализ литературных данных и частично изучение взаимодействия оксигидратов с растворами электролитов описаны в монографии автора [10]. Последнее направление было продолжено после публикации монографии.

Анализ литературных данных показал, что для объяснения влияния фоновых электролитов на процесс ГГ необходимо воспользоваться представлением о заряженной поверхности оксигидрата на границе раздела оксигидрат – водный раствор [12–15]. Это представление уже в 1980-х гг. широко использовалось в зарубежной литературе, тогда как в отечественной литературе по вопросам сорбции существование двойного электрического слоя (ДЭС) на указанной границе раздела практически совсем игнорировали. В моделях, учитывающих наличие

ДЭС, поверхность сорбента в контакте с раствором электролита рассматривают аналогично поверхности электрода в контакте с раствором в электрохимии и применяют соответствующее понятие о потенциалоопределяющих ионах. Для оксигидратов такими ионами являются  $H^+$  ( $H_3O^+$ ) и  $OH^-$ . Распределение этих ионов между твердой фазой и раствором создает поверхностный заряд сорбента и разность потенциалов в ДЭС. В случае порошкообразных оксигидратов или гелей разность потенциалов измерить, по-видимому, невозможно, но легко определить экспериментально поверхностный заряд (методом потенциометрического титрования).

Чтобы отличить специфическую сорбцию ионов (не кулоновскую) от неспецифической, пользуются представлением о точке нулевого заряда (ТНЗ), которое отделилось от понятия изоэлектрической точки (ИЭТ) только в 1970 г. [16, 17]. Нулевым раствором в электрохимии называют раствор, в равновесии с которым данный электрод имеет нулевой потенциал. Авторы работ по адсорбции [12–17] подразумевают под  $pH_{ТНЗ}$   $pH$  нулевого раствора. Величины  $pH_{ТНЗ}$  в настоящее время входят в число характеристик сорбента, обязательно приводимых во всех работах мирового уровня по сорбции (наряду с величиной удельной поверхности).

Доказано, что при отсутствии специфической сорбции ионов электролита  $pH_{ТНЗ}$  не зависит от его концентрации, а при наличии – зависит. Кривые зависимости заряда от  $pH$  пересекаются в точке, которая и является  $pH_{ТНЗ}$  (рис. 5.) Влияние кристаллической структуры на поверхностный заряд,  $pH_{ТНЗ}$  и  $pH_{ИЭТ}$  очень велико, поэтому очень важен способ и условия получения образца. В зависимости от этих факторов величины  $pH_{ТНЗ}$  для образца одного и того же химического состава могут различаться до 2–3 ед. Строго специфически сорбируются только очень малые количества ионов. При концентрации электролита около 0.001 моль/л все адсорбционные центры уже заняты. Изотермы сорбции специфически сорбируемых ионов не ленгмюровские, а «высокого сродства» [18], которые, однако, описываются уравнением Ленгмюра. Специфически сорбируются двух- и трехзарядные катионы и анионы, катион лития и фторид-ион, неспецифически – остальные однозарядные катионы и анионы. В растворах неспецифически сорбируемых электролитов  $pH_{ТНЗ} = pH_{ИЭТ}$ . Считают, что специфическая сорбция происходит на центрах  $-OH$ ,  $-OH_2$  и  $OH_2^+$  и связана с перераспределением протонов.  $pH_{ТНЗ}$  является характеристикой, которая делает условно эквивалентными в отношении основности самые различные вещества и позволяет сравнивать их кислотно-основные свойства.

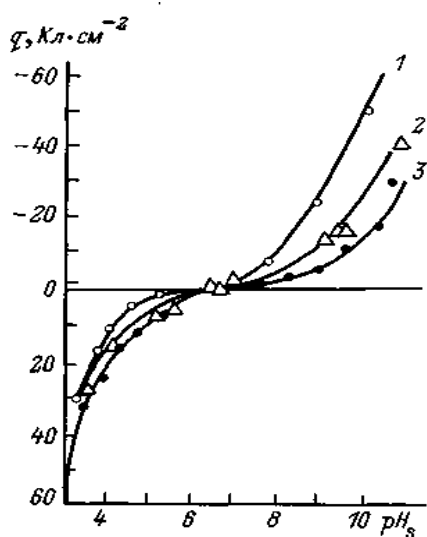


Рис. 5. Зависимость поверхностного заряда магнетита  $Fe_3O_4$  от  $pH$  раствора. Электролит  $KNO_3$ , моль/л: 1 – 1.0; 2 – 0.1; 3 – 0.01

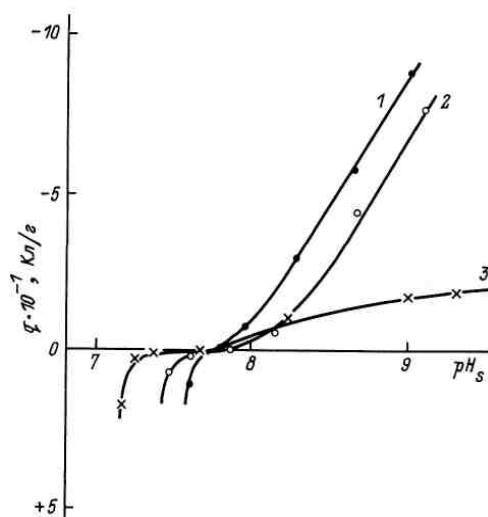


Рис. 6. Сорбция  $H_3O^+$  и  $OH^-$  на  $Y_2O_3 \cdot nH_2O$  в растворе  $KNO_3$ .  $C(KNO_3)$  моль/л: 1 – 1.0; 2 – 0.1; 3 – 0.01 (25°C);  $q$  – заряд;  $pH_s$  –  $pH$  суспензии

Координационно-химическая теория адсорбции на оксидной поверхности основана на предположении, что на этой поверхности в контакте с водяными парами или жидкой водой диссоциативно сорбируются молекулы воды, в результате чего поверхность покрывается слоем гидроксильных групп: 2–10  $OH/nm^2$  [14, 19]. Эти  $OH$ -группы участвуют в протолитических

реакциях с компонентами раствора; они энергетически неоднородны. Реакции описываются соответствующими уравнениями и константами равновесия протолитиза. При pH растворов, не равных  $pH_{\text{ТНЗ}}$ , происходит перезарядка поверхности: при  $pH > pH_{\text{ТНЗ}}$  поверхность заряжена отрицательно, и наоборот. При отсутствии строго специфической сорбции катионы сорбируются на «-» поверхности, анионы – на «+».

Исследовалось взаимодействие оксидов РЗЭ и феррогелей с растворами электролитов методом точки нулевого заряда [16, 20–22]. Было установлено, что хлорид-, перхлорат- и нитрат-ионы неспецифически сорбируются на оксидах РЗЭ и феррогелях, а сульфат-ионы – специфически (рис. 6, 7 и табл. 3). При увеличении концентрации  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  от 0.01 до 1.0 моль/л  $pH_{\text{ТНЗ}}$  оксигидратов РЗЭ увеличивается на 1.0–1.5 ед., что увеличивает положительный заряд поверхности и ее основные свойства, с чем мы связываем увеличение скорости ГГ на оксигидратах РЗЭ в сульфатной среде [20].

Таблица 3

$pH_{\text{ТНЗ}}$  оксигидратов редкоземельных элементов

Электролит	$\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{Sm}_2\text{O}_3$	$\text{Yb}_2\text{O}_3$
$\text{NaClO}_4$	$7.45 \pm 0.15$	-	-
$\text{NaCl}$	$7.60 \pm 0.10$	$7.45 \pm 0.15$	$7.15 \pm 0.15$
$\text{KNO}_3$	$7.80 \pm 0.10$	$7.80 \pm 0.10$	$7.20 \pm 0.15$
$\text{Na}_2\text{SO}_4$ , г-экв/л			
0.01	$7.60 \pm 0.15$	-	-
0.02	$7.85 \pm 0.15$	$7.90 \pm 0.20$	$7.25 \pm 0.15$
0.1	$8.20 \pm 0.15$	-	-
0.2	$8.55 \pm 0.15$	$8.20 \pm 0.15$	$7.75 \pm 0.15$
1.0	$8.75 \pm 0.10$	$8.80 \pm 0.10$	$8.25 \pm 0.150$

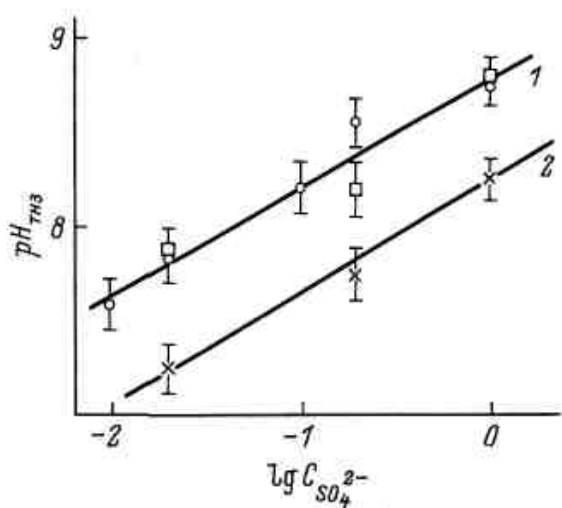


Рис. 7.  $pH_{\text{ТНЗ}}$  как функция  $\lg C(\text{SO}_4^{2-})$  ( $25^\circ\text{C}$ ).  
1 —  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\circ$ ),  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  ( $\square$ ); 2 —  $\text{Yb}_2\text{O}_3$

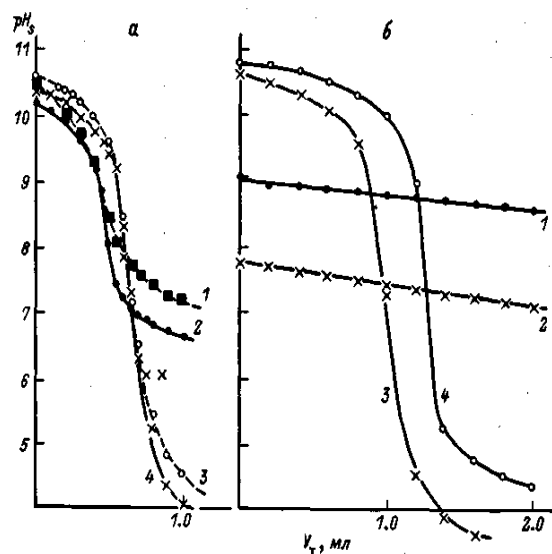


Рис. 8. Потенциометрическое титрование  $\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (а) и феррогеля  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 / \text{NaOH}$ ,  $pH_{\text{ос}} = 7.5$ , для определения  $pH_{\text{ТНЗ}}$ . Электролит, моль/л: а — 0.1  $\text{NaCl}$  (1, 4), 0.1  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , (2,3); б — 0.5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (1, 4), 1.0  $\text{KNO}_3$  (2, 3); а (1, 2), б (1, 2) — титрование суспензии; а (3, 4), б (3, 4) — титрование электролита (холостой опыт).  $V_m$  — объем титранта (кислота), мл



С феррогелями (аморфными оксигидратами железа (III)) дело обстоит гораздо сложнее (рис. 8 и табл. 4) [21, 22]. Оказалось, что  $pH_{ТНЗ}$  феррогелей, не прошедших стадии высушивания, всегда (!) зависят от концентрации электролита, состоит ли он из специфически или неспецифически сорбируемых ионов. Затем, величины  $pH_{ТНЗ}$  зависят от  $pH_{oc}$  феррогелей. При равных условиях (одинаковых  $pH_{oc}$  и концентрациях электролита)  $pH_{ТНЗ}$  следующим образом зависит от природы аниона электролита:  $ClO_4^- < NO_3^- < Cl^- < SO_4^{2-}$ , причем величина  $pH_{ТНЗ}$  возрастает с увеличением  $C_{эл}$ . Наконец,  $pH_{ТНЗ}$  зависит также от природы исходной соли для получения феррогелей: для феррогелей, полученных из сульфата железа (III),  $pH_{ТНЗ}$  на 0.5–1.5 ед. ниже, чем для полученных из хлорида и нитрата, которые очень сходны. Последнее мы объяснили тем, что степень замещения сульфат-ионов на гидроксил при одинаковых  $pH$  ниже, чем для хлорид- и нитрат-ионов.

Что же до зависимости  $pH_{ТНЗ}$  от концентрации любого из использованных электролитов, мы пришли к следующему выводу. Поскольку при различных  $pH_{oc}$  степень замещения анионов соли на гидроксилы различна [23], мы получаем при этом уже электрически заряженные фазы: когда  $pH_{oc} < pH_{ТНЗ}$ , поверхность заряжена положительно, и наоборот, при  $pH_{oc} > pH_{ТНЗ}$ , поверхность содержит избыточные, сорбированные ОН-группы. При внесении образцов в раствор электролита происходит перераспределение протонов и (или) ОН-групп между гелем и раствором. Однако и для гелей должна быть истинная ТНЗ, что мы и показали в дальнейшем [24]. Для всех образцов с  $pH_{oc}$  ниже этой точки увеличение  $C_{эл}$  ведет к снижению поверхностного заряда, что и приводит к замедлению ГГ.

Таблица 4

Результаты определения  $pH_{ТНЗ}$  феррогелей, полученных действием NaOH на растворы  $Fe(NO_3)_3$  (I),  $FeCl_3$  (II) и  $Fe_2(SO_4)_3$  (III), методом потенциометрического титрования

Электролит	Концентрация, моль/л	$pH_{ТНЗ}$ при $pH_{oc}$								
		6			7.5			9		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
NaCl	1.0	6.30	6.27	7.48	7.72	6.16	8.84	8.76	8.24	
	0.1	–	5.47	–	7.28	–	–	9.12	–	
	0.01	–	4.48	–	6.32	–	–	9.73	9.26	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.5	7.53	7.52	8.72	8.35	7.31	9.38	9.13	8.89	
	0.05	–	7.10	8.32	8.21	–	–	9.46	–	
	0.005	–	6.71	7.82	7.82	6.69	9.71	9.87	8.90	
NaCl + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 + 0.5	–	7.02	–	8.32	–	–	8.96	8.57	
	0.1 + 0.05	7.34	7.26	8.13	8.12	–	9.40	9.30	8.76	
	0.001 + 0.005	–	6.80	–	7.84	–	–	9.64	–	
NaClO <sub>4</sub>	1.0	5.54	5.54	6.88	6.85	–	8.94	8.35	–	
	0.01	4.48	4.17	5.85	5.76	5.85	9.22	9.82	–	
KNO <sub>3</sub>	1.0	6.08	–	7.44	7.51	–	8.82	8.79	–	
	0.01	–	–	6.23	6.23	6.53	9.94	9.25	8.36	

Основываясь на полученных данных, мы могли утверждать, что взаимосвязь скорости ГГ с состоянием поверхности ОГ свидетельствует о том, что процесс ГГ локализован на поверхности ОГ, чем и обеспечивается существование  $pH$ -статического режима. Эксперименты по изучению влияния соотношения  $C_{сорбат}/C_{сорбент}$  на скорость ГГ показали, что скорость ГГ лимитируется как числом реакционно способных частиц комплекса, так и числом активных сорбционных центров (СЦ) поверхности. Рассмотрение кинетических кривых показывает, что: 1) имеющиеся сорбционные центры используются не мгновенно, а постепенно; 2) увеличение  $C_{сорбент}$  при  $C_{сорбат} = const$  сопровождается уменьшением относительного количества использованных СЦ за один и тот же промежуток времени; 3) увеличение  $C_{сорбат}$  при  $C_{сорбент} = const$  сопровождается увеличением относительного числа использованных СЦ. Это свидетельствует, что скорость ГГ в значительной степени определяется количеством реакционно-способных частиц сорбата, причем эти последние не являются исходными

анионами. Следовательно, речь идет именно об образовании интермедиата на поверхности твердой или гелевой фазы сорбента. Только при низких  $C_{\text{сорбент}}$  недостаток СЦ начинает лимитировать скорость ГГ. Увеличение массы сорбента никогда не приводит к мгновенному осаждению сорбата, если только это не характерно для самого комплекса, например,  $[\text{PdCl}_4]^{2-}$  в среде перхлората натрия. Изотермы сорбции комплексов ПМ на оксигидратах РЗЭ и железа принадлежат к типу «высокого сродства», величины  $A$  не зависят от температуры.

Полученные экспериментальные данные послужили основой для построения модели механизма ГГ. При этом надлежало ответить на 3 вопроса:

1) почему устойчивые и инертные комплексы в ходе реакции распадаются с отщеплением всех или почти всех координированных лигандов на границе раздела раствор-оксигидрат, хотя процесс происходит при одном и том же рН, слишком низком для выделения гидроксида центрального иона;

2) почему этот процесс происходит с измеримой скоростью и значительно быстрее, чем процесс гомогенного гидролиза, но медленнее, чем осаждение гидроксида при нужном рН;

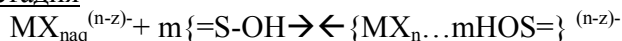
3) почему скорость ГГ возрастает при частичной замене координированных лигандов на воду, тогда как при гомогенном гидролизе имеет место обратное?

В отсутствии влияния электролита кинетический ряд ГГ соответствует ряду термодинамической устойчивости комплексов (несмотря на установившееся среди специалистов по координационной химии убеждение, что термодинамические свойства комплекса не связаны с кинетикой его реакций). Природа продуктов свидетельствует о том, что в процессе есть стадия кислотно-основного характера. Рассмотрение всех возможных вариантов механизма с учетом экспериментальных данных по кинетике гомогенного гидролиза привело нас к следующей модели ГГ. На поверхность сорбента-оксигидрата из раствора перемещается доминирующая в растворе форма комплекса (т.е. исходная). На основании величин энергии активации ГГ относится к кинетической области макрокинетики, но по этой же причине адсорбционная стадия не может быть скоростьюопределяющей. На поверхности локализована скоростьопределяющая стадия – акватация сорбированного комплекса и последующая стадия превращения аквакомплекса в гидроксид. Ускорение акватации комплекса в сорбированном состоянии можно объяснить искажением координационного полиэдра под влиянием поверхности оксигидрата и искажением молекулярных орбиталей по модели, например, трансвлияния.

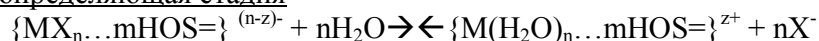
Чувствительность скорости ГГ к концентрации хлорид-ионов (лиганда) коррелирует с кинетической лабильностью комплексов; для наиболее лабильного  $[\text{PdCl}_4]^{2-}$  это влияние проявляется в наибольшей степени. Когда большая кинетическая лабильность комплекса сочетается с относительно невысокой термодинамической устойчивостью, скорость ГГ особенно велика (рутений, палладий). При этом соотношение скоростей при гомо- и гетерогенном гидролизе для комплексов разных ПМ примерно одинаково. Псевдопервый порядок скорости реакции ГГ говорит о том, что существует только одна реакционно-способная форма, в которую превращаются все остальные (промежуточные и побочные). Если считать, что реакционно-способная форма образуется путем замещения лигандов на воду, понятно, почему частично акватированные формы ( $[\text{RhCl}_3(\text{H}_2\text{O})_3]$ ,  $[\text{Ir}_3\text{O}(\text{SO}_4)_6(\text{H}_2\text{O})_3]^{4+}$ ) реагируют быстрее, чем исходные ( $[\text{RhCl}_6]^{3-}$ ,  $[\text{Ir}_3\text{O}(\text{SO}_4)_9]^{10-}$ ).

Схема механизма гетерогенного гидролиза

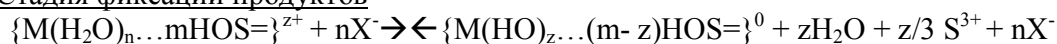
1. Адсорбционная стадия



2. Скоростьюопределяющая стадия



3. Стадия фиксации продуктов



Процесс ГГ по природе не окислительно-восстановительный и не каталитический. Предложенная модель механизма позволяет объяснить подавляющее большинство фактов и закономерностей ГГ.

*Определение ГГ:* многостадийный гетерогенный процесс в высокодисперсной системе, скоростьюопределяющей стадией которого является реакция замещения лигандов на воду, происходящая в момент нахождения обратимо сорбированного комплекса на поверхности

дисперсной фазы сорбента-оксигидрата, скорость которой значительно (на несколько порядков) превышает скорость соответствующей реакции замещения в растворе.

Особенности систем, состоящих из твердых фаз с непостоянной величиной поверхности и компонентов раствора переменного состава, описаны в работе [24]. ГГ представляет собой особое физико-химическое явление. Коренное отличие ГГ от других сорбционных процессов состоит в том, что сорбат не закрепляется на поверхности в виде исходного соединения, как при ионном обмене или физической сорбции. Случаи сорбции, наблюдавшиеся Синицыным и Симановой [например, 25, 26], представляют собой ГГ с очень медленной второй стадией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О состоянии платиновых металлов в сульфатно-хлоридных растворах в присутствии неблагородных металлов / Ю.Н. Кукушкин и др. // Изв. СО АН СССР. Серия хим. наук. 1970. Вып. 4, № 9. С. 42–46.
2. Новиков А.И. Разделение рутения, родия и палладия соосаждением с гидроокисью железа / А.И. Новиков, С. Рустамов // Журн. неорган. химии. 1971. Т.13, № 1. С.134–136.
3. Симанова С.И. Комплексообразование платиновых металлов при сорбции гранулированными ионитами и хелатообразующими сорбентами / С.И. Симанова, Ю.Н. Кукушкин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1985. Т. 28, № 3. С. 3–15.
4. Гринберг А.А. Введение в химию комплексных соединений. М.;Л.: Наука, 1966. 631 с.
5. Аналитическая химия платиновых металлов / С.И. Гинзбург, Н.А. Езерская, И.В. Прокофьева и др. М.: Наука, 1972. 613 с.
6. Симанова С.А. О состоянии платиновых металлов в растворах, полученных при хлорировании никельсодержащих сплавов, окислов и сульфидов / С.А. Симанова, Е.И. Маслов, Л.Г. Мельгунова, Ю.Н. Кукушкин // Журн. прикл. химии. 1976. Т. 49, № 12. С. 2608–2612.
7. Симанова С.А. и др. О формах нахождения платины, родия и иридия в сульфатно-хлоридных электролитах при анодном растворении бинарных сплавов с никелем / С.А. Симанова, Ю.Н. Кукушкин, Е.И. Маслов, Г.П. Гурьянова // Изв. СО АН СССР. Серия хим. наук. 1974. Вып. 2, № 4. С. 67–70.
8. Борбат В.Ф. Поведение платиновых металлов при растворении платиносодержащих анодов / В.Ф. Борбат, О.Н. Семенова. М.: Цветметинформация, 1977. 35 с.
9. Изучение поведения комплексных сульфатов иридия в сульфатно-хлоридных растворах / Н.М. Синицын и др. // Журн. неорган. химии. 1978. Т. 23, № 3. С. 741–747.
10. Печенюк С.И. Сорбционно-гидролитическое осаждение платиновых металлов на поверхности неорганических сорбентов: моногр. Л., 1991. 246 с.
11. Печенюк С.И. Сорбционно-гидролитическое осаждение платиновых металлов на оксигидратах: дис. ... д.х.н. Апатиты; Новосибирск, 1990.
12. Breeuwsma A. Physical and chemical adsorption of ions in the electrical double layer on haematite / A. Breeuwsma, I. Lyklema // J. Colloid Interface Sci. 1973. Vol. 43, № 2. P. 437–448.
13. Westall J. A comparison of electrochemical models for the oxide/solution interface / J. Westall, H. Hohl // Adv. Coll. Int. Sci. 1980. Vol. 18, № 4. P. 265–294.
14. Schindler W. Grenzflächenchemie oxidischer mineralien // Österreich.Chem.Z. 1985. Vol. 86, №6. P. 141–146.
15. Ahmed S.M., Maksimov D. Studies of the oxide surfaces of the liquid-solid interface. Part II. Iron oxides. // Can. J. Chem. 1968. Vol. 46, №24. P. 3841–3846.
16. Parks G.A. The zero point of charge of oxides / G.A. Parks, P.L. Bruyn // J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 6. P. 967–973.
17. Parks G.A. The isoelectric points of solid oxides, solid hydroxides and aqueous hydroxo complex system // Chem. Rev. 1965. Vol. 65, № 2.P. 177–198.
18. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел / под ред. Г. Парфитаи К. Рочестера. М.: Мир, 1986. 486 с.
19. Tamura H. Surface hydroxyl site densities on metal oxides as a measure for the ion-exchange capacity / H. Tamura, A. Tanaka, K. Mita, R. Furuichi // J. Colloid Interface Sci. 1999. Vol. 209.P. 225–231.
20. С.И. Печенюк. Адсорбция потенциалопределяющих ионов на поверхности оксигидратов иттрия, самария и иттербия // Журн. физ. химии. 1987. Т. 61, № 1. С. 165–169.
21. Печенюк С.И. Адсорбция потенциалопределяющих ионов на поверхности аморфных оксигидратов железа(III) / С.И. Печенюк, Е.В. Калинкина // Коллоид.журн. 1990. Т. 52, № 4. С. 716–721.
22. Печенюк С.И. Кислотно-основные свойства аморфных оксигидратов железа(III) и сорбция анионов / С.И. Печенюк, Е.В. Калинкина // Журн. прикл. химии. 1991. Т. 64, № 1. С. 26–31.
23. Pechenyuk S.I. and Kuz'mich L.F. Variation of the Composition of Hydrous Metal Oxide Hydroxides during Aging in Electrolyte Solutions // Russian J. Inorg. Chem. 2000. Vol. 45, № 9.P. 1335–1339.
24. Печенюк С.И. Гетерогенные реакции твердых фаз с непостоянной величиной поверхности и компонентов раствора переменного состава // Журн. физ. химии. 1989. Т. 63, № 8. С. 2155–2163.
25. Большаков К.А. Высокотемпературная сорбция иридия на гематите / К.А. Большаков и др. // Журн. неорган. химии. 1985. Т. 30, № 8. С. 2065–2068.
26. Никольская Л.В. О кинетике и механизме сорбции хлорокомплексов иридия (III) из разбавленных растворов на гидратированном диоксиде циркония / Л.В. Никольская, С.А. Симанова, Е.С. Бойчинова // Журн. прикл. химии. 1987. Т. 60, № 4. С. 735–739.

#### Сведения об авторе

Печенюк Софья Ивановна – д.х.н., профессор, главный научный сотрудник;  
e-mail: pechenyuk@chemy.kolasc.net.ru

## ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ МАГНИТОСФЕРЫ НА АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

**В.К. Ролдугин**

Полярный геофизический институт КНЦ РАН

### Аннотация

В 1975 г. две независимые телекамеры зафиксировали светящееся пятно размером 12 км и длительностью менее секунды на высоте 100 км над Архангельской областью. Свечение было вызвано антенным пробоем мощного длинноволнового передатчика. В рамках того же физического механизма, к высыпанию частиц из магнитосферы и свечениям могут приводить молниевые разряды.

### Ключевые слова:

*молния, магнитосфера, высыпание частиц.*



### Введение

Геофизики многих стран, в том числе и России (в частности, ПГИ) проводят эксперименты по воздействию с помощью мощных радиолокаторов на ионосферу и магнитосферу с целью вызвать высыпание частиц и свечение атмосферы. Автор принимал участие в одном из первых экспериментов такого рода [1] в 1975 г. и считает, что достигнутые почти за 40 лет успехи нельзя признать впечатляющими. Результат одного из последних экспериментов [2] следующий: в области нагрева ионосферы мощным передатчиком на частоте 9 МГц при помощи специальной оптики и обработки снимков удалось обнаружить небольшое пятно свечения в эмиссии 630 нм. Обычно же факт свечения атмосферы под воздействием мощных радиосигналов доказывается корреляционным анализом, т.е. статистически, и к обнаруженному эффекту всегда можно отнестись скептически.

Результаты, полученные во время советско-французского эксперимента «Аракс» в 1975 г., открывали новый подход к нахождению эффективного способа воздействия на магнитосферу для стимулированного высыпания частиц. К сожалению, они не были в свое время опубликованы. Целью данной работы является изложение тех результатов, выводы из них и предложения экспериментов, возможно полезных для работ в направлении активного воздействия на захваченные частицы в магнитосфере.

### Стимулированное высыпание частиц во время эксперимента «АРАКС»

15 февраля 1975 г. в магнитосопряженных точках о-ва Кергелен (Архангельская область) проводился эксперимент «АРАКС» с инъекцией вдоль магнитных силовых линий электронного пучка из ракеты, запущенной с Кергелена. В северном полушарии расположились группы исследователей со своими приборами. В частности, было несколько групп, осуществлявших телевизионные наблюдения в деревнях вблизи Карпогор. Небо над ними поделили на отдельные квадраты, и каждая камера была направлена в свой квадрат. Тщательный просмотр отснятой пленки ни на одной из камер не выявил объекта, который можно было бы считать вызванным искусственным пучком электронов.

Телевизионный отряд Полярного геофизического института (ПГИ) КНЦ РАН располагался в д. Ваймуша с координатами  $\varphi = 63^{\circ}58'28''$ ,  $\lambda = 44^{\circ}30'52''$ . После длительного изучения кинопленки на одном из кадров было обнаружено светящееся пятно примерно круглой формы, с угловым диаметром около  $3^{\circ}$ . Время кадра пришлось на 247-ю сек. от старта, за 19 сек. до первой инъекции электронов с борта ракеты, поэтому связать пятно с работой электронной пушки невозможно. На следующем кадре пятно видно гораздо слабее. Фотография кадра, взятого из отчета ПГИ № 3928 за 1975 г., который хранится в фонде № 7 Архива КНЦ РАН, (рис. 1, слева).

Группой Киевского государственного университета (КГУ) под руководством В.Н. Ивченко фотографировался тот же участок неба из д. Пачиха ( $\varphi = 63^{\circ}37'26''$ ,  $\lambda = 44^{\circ}23'36''$ ), удаленной на 50 км от д. Ваймуши. В.Н. Ивченко любезно предоставил ПГИ копии кинокадров тех моментов,

когда камера ПГИ обнаружила пятно. На них видно, что в то же время и киевская камера зафиксировала светящееся пятно (рис. 1, справа). Скорость регистрации телекамеры в Ваймуше была 4 кадра в секунду, в Пачихе – 6, поэтому длительность свечения составляла около 0.3 сек. Мировое время появления пятна – 1 ч. 40 мин. 06.8 сек. Два пункта имели раздельное электропитание, небо было ясное, поэтому техногенная причина появления светящегося пятна исключается. Отсутствие магнитных возмущений исключает и его авроральное происхождение.

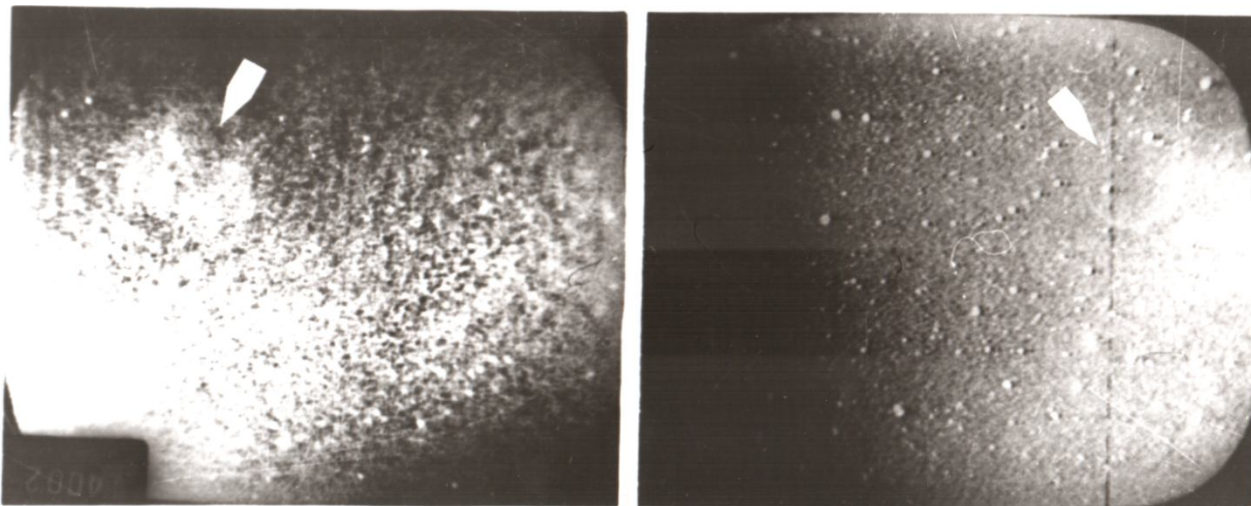


Рис. 1. Телевизионные кадры светящегося пятна в Ваймуше, ПГИ (слева) и Пачихе, КГУ (справа)

Были построены карты проекций пятен с обеих камер на небо при различных предположениях о высоте свечения. Обе проекции совпали при высоте 100 км. Эта высота соответствует вторжению в атмосферу электронов с энергией около 10 кэВ. Карта проекций показана на рис. 2. Размер области свечения составлял примерно 12 км. Была также рассчитана и проекция пятна на землю (рис. 3).

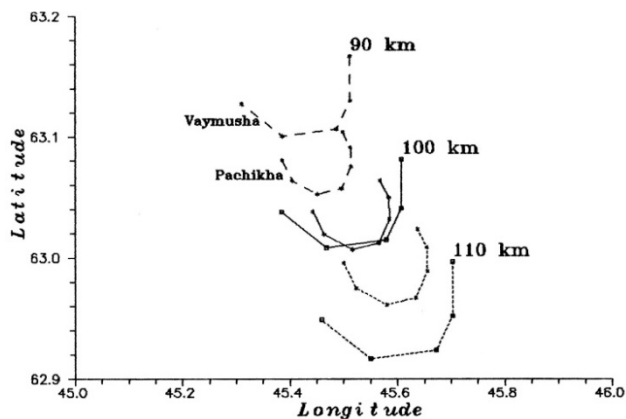


Рис. 2. Проекция пятна по изображениям двух камер на ионосферу при разных высотах

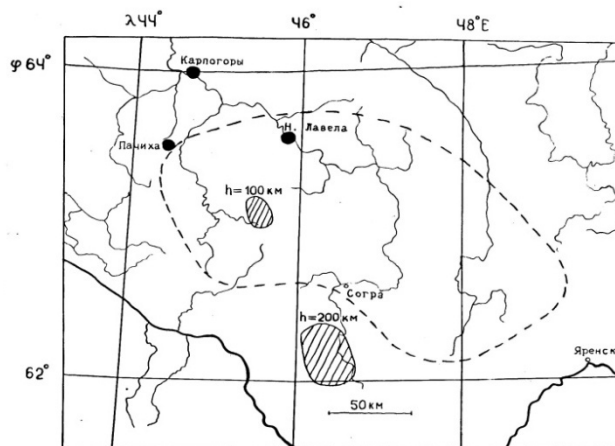


Рис. 3. Проекция пятна на землю при задаваемой высоте 100 и 200 км

Во время эксперимента «АРАКС» советской стороной в этом же регионе проводился другой эксперимент под руководством В.М. Чмырёва из московского Института земного магнетизма и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН). Целью эксперимента было изучение влияния низкочастотного излучения на физические процессы в атмосфере и магнитосфере. Группа ИЗМИРАН использовала сигналы мощного наземного низкочастотного передатчика, расположенного на географической широте около 60° вблизи Архангельска. Импульсы на частоте 12.5 кГц и длительностью 0.5 сек. имели период повторения 3 сек. В Ваймуше велась соответствующая регистрация очень низкочастотного (ОНЧ) излучения на нескольких частотах. Один из каналов соответствовал частоте передатчика 12.5 кГц и имел, естественно, весьма низкую чувствительность.

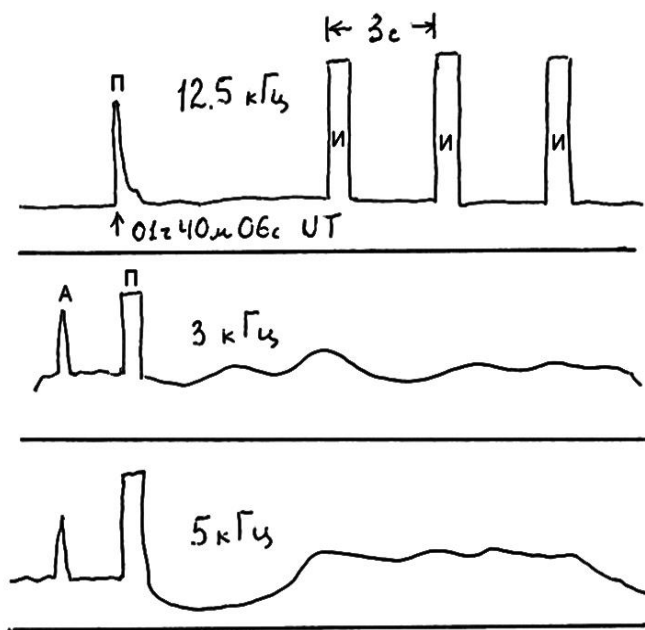


Рис. 4. Ориентировочная схема регистрограммы ОНЧ излучения во время появления пятна

По давности лет в ИЗМИРАН утеряны регистрограммы ОНЧ излучения, поэтому предлагается схематический рисунок, сделанный автором по памяти (рис. 4).

Время появления светящегося пятна точно соответствует так называемому антенному пробую на архангельском передатчике, при котором большая мощность излучается в широком диапазоне частот. Он хорошо заметен не только на каналах для приема естественного ОНЧ излучения, но и на канале, регистрирующем импульсы передатчика. Антенный пробой (на рис. 4 обозначен как П) возник при неудачной попытке включения передатчика в указанном режиме.

Незадолго перед пробоем на обычных приемных каналах был зарегистрирован свистящий атмосферик (А), из чего можно заключить о существовании магнитосферного дакта вблизи Архангельска в это время. Через некоторое время передатчик заработал в заданном режиме, излучая полусекундные импульсы (И).

Светящееся пятно явилось результатом высыпания захваченных электронов из дакта под воздействием мощного широкополосного импульса.

### Высыпание частиц под воздействием молниевых разрядов

Регистрация данного события, конечно, имела весьма малую вероятность. Было бы ошибочным полагать, что высыпания частиц из дакта – очень редкое явление на Земле, так как никакой антенный пробой не сравнится по мощности и эффективности излучения с молниевыми разрядами. В данном событии высыпание наблюдалось в том же полушарии, что и излучение, но разумно полагать, что высыпание имело место и на другом конце силовой трубки. Поэтому в области, магнитосопряженной с молниевым разрядом, можно ожидать высыпания захваченных частиц.

Подтверждением этой гипотезы послужило сообщение Ю.А. Надубовича [3] из Якутска. В его распоряжении были данные сети фотометрических наблюдений полярных сияний. Ю.А. Надубович обнаружил на записях фотометров кратковременные, порядка секунды, вспышки свечения неба в невозмущенное время. Такие отклонения пера самописца возможны по случайным причинам: удар по столу с самописцем или касание пера дежурным, неосторожная подсветка фотометра фонариком или автомашиной, запуск сигнальной ракеты и пр. Однако Надубович заметил совпадение таких отклонений на записях станций, отстоящих друг от друга на сотни километров, поэтому объяснить их возможно только вспышкой свечения неба на высоте около 100 км.

Это сообщение было проверено по данным фотометрической сети ПГИ. Несколько пар таких всплесков было обнаружено на станциях Лопарская, Апатиты, Кемь.

Анализ этих всплесков показал, что они сопровождаются атмосфериками, т.е. естественным радиоизлучением в диапазоне 1–10 кГц. Атмосферики вызываются молниевыми разрядами. Поскольку всплески имели место в зимнее время в высоких широтах, и к тому же в темное время, причиной сопутствующих им атмосфериков могли быть молнии только в южном, летнем полушарии.

В более ранней работе [4] сообщается о фотометрических наблюдениях в Турции миллисекундных световых импульсов. Импульсы наблюдались часто, до нескольких раз в час, зимой много чаще, чем летом, с максимумом в суточном ходе в 16 ч. мирового времени или ранее. Турция магнитосопряжена с африканским центром грозовой активности, которая максимальна там в 16 ч. по мировому времени.

О телевизионном наблюдении светового пятна в северной Финляндии на L=5.5 сообщалось в [5]. Оно было зарегистрировано 9 октября 1991 г. Пятно имело диаметр около 10 км.

Существенной особенностью явилась большая длительность свечения – 4 с. Явление сопровождалось свистом (whistler), начальная частота которого составляла 2.5 кГц.

### **Проект наблюдений высыпаний частиц из магнитосферы при молниевых разрядах**

Целенаправленных исследований по изучению высыпаний частиц из магнитосферы при молниевых разрядах пока не проводилось. Такие исследования представляют самостоятельную научную ценность, т.к. позволяют экспериментально определить условия канализации электромагнитных волн в силовые трубки магнитосферы, взаимодействия волны с частицами, образования дактов и их параметры и др. Полученные результаты были бы важны и тем, что могли использоваться при проведении активных экспериментов по воздействию на магнитосферу излучением наземных передатчиков.

Эксперимент по изучению высыпания частиц под действием грозовой активности, на наш взгляд, не представляет особых трудностей. Необходимо в ночное время фиксировать световые всплески фотометрическим и фотографическим способами и параллельно регистрировать ОНЧ излучение. Место эксперимента – область, сопряженная с регионом высокой грозовой активности в южном полушарии. На территории Российской Федерации таким местом может быть Северный Кавказ. Например, район Архыза сопряжен с точкой, координаты которой  $\varphi = -30^\circ$ ,  $\lambda = +49^\circ$ , это к юго-востоку от Мадагаскара. Частота молний в этом регионе около 1 км<sup>2</sup>/год. С помощью цифровых камер всего неба и фотометра можно просматривать круг на небе радиусом 150 км. Его площадь:  $S = \pi R^2 = 3.14 * 22500 \text{ км}^2 = 70650 \text{ км}^2$ , среднее число молний в круге за сутки – 193, за ночь – около 60.

Сезонный максимум грозовой активности в указанном районе приходится на октябрь–март, что и определяет время проведения эксперимента.

Неясным пока является вопрос о том, какие молнии могут приводить к высыпанию: все или только разряды облако – ионосфера. Представляется, что разряды облако – земля и облако – облако могут различаться по своей эффективности из-за разницы в конфигурации электромагнитного излучения.

Параметры приборов для исследования:

- фотометр всего неба с оптическим фильтром (или без него) с частотой регистрации 20–50 Гц;
- телевизионная камера всего неба с частотой съемки 5–25 кадр/сек.;
- регистрация ОНЧ излучений в диапазоне 0.5–3.0 кГц.

Наблюдения проводятся в ночное время в автономном режиме, утром просматриваются фотометрические записи, интервалы записей со световыми всплесками сохраняются, а остальное (в случае необходимости экономии памяти системы сбора данных) стирается. Длительность эксперимента – 2–4 недели, предпочтителен безлунный период.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Искусственная инжекция очень низкочастотных (ОНЧ) волн в ионосферу и магнитосферу Земли / В.М. Чмырёв и др. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23, №8. 2. EISCAT observations of pumpenhanced plasma temperature and optical emission excitation rate as a function of power flux / C.J. Bryers, M.J. Kosch, A. Senior, M.T. Rietveld, and T.K. Yeoman // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117, №A09301, doi:10.1029/2012JA017897. 3. Надубович Ю.А. Геофизические условия возникновения коротковременных оптических вспышек излучения ночного неба // Физика верхней атмосферы высоких широт: сб. 1975. Вып. 3. Якутск. С. 134–150. 4. Ögelman H. Millisecond time scale atmospheric light pulses associated with solar and magnetic activity // J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78, № 16. P. 3033–3039. 5. Manninen J. and Turunen T. Intensive short-lived ionospheric optical emission triggered by whistler // Proceedings of the 19th conference on atmospheric studies on August 10–14. Kiruna, Sweden, 1992. P. 161–166.

### **Сведения об авторе**

Ролдугин Валентин Константинович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник института;  
e-mail: rold\_val@pgia.ru

## ОЦЕНКА ФЛОТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ ПРОБЫ ПИТАНИЯ ОСНОВНОЙ НЕФЕЛИНОВОЙ ФЛОТАЦИИ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, Е.Д. Рухленко, Е.Г. Веселова**  
Горный институт КНЦ РАН

### Аннотация

Разработан подход к оценке флотационных свойств компонентов питания основной (обратной) нефелиновой флотации, позволяющий формулировать интегральные свойства псевдофаз многоскоростного многофазного континуума (ММК) флотации в рамках вычислительного эксперимента, проводимого с CFD (Computational Fluid Dynamics) моделью гетерогенной системы процесса флотации, адаптированной к эксплуатационным особенностям флотационной техники.

### Ключевые слова:

*CFD модель, гетерогенная система, флотация, нефелиновый концентрат.*

### Введение

В рассматриваемой CFD модели гетерогенной системы процесса флотации (ГСПФ) твердая фаза представлена множеством дисперсных псевдофаз, физико-химические свойства которых определены в результате анализа пробы питания основной (обратной) нефелиновой флотации, отобранной в цикле производства нефелинового концентрата на ОАО «Апатит». Модель позволяет исследовать поля скоростей и концентрации твердых фаз ГСПФ внутри первой камеры пневмомеханической флотационной машины ОК-38 нефелинового цикла. Всего в производственном переделе участвует одновременно три последовательно установленные двухкамерные машины ОК-38. Характеристики входящих и исходящих потоков модели соответствуют данным технологической схемы основной нефелиновой флотации на АНОФ-2 ОАО «Апатит».

Геометрия модели ГСПФ, ограниченная контурами камеры, статора и импеллера флотационной машины ОК-38, разработана в соответствии с конструкторской документацией компании Outokumpu в программном приложении Gambit. Расчетная сетка модели ГСПФ предусматривает применение в ходе вычислительного эксперимента технологии движущихся сеток (Dynamic Mesh). Вычислительный эксперимент над моделью проведен в модуле Fluent программного комплекса ANSYS 14.5.

### Цель и идея вычислительного эксперимента

Цель вычислительного эксперимента состояла в получении посредством CFD моделирования адекватной модели ГСПФ, позволяющей получать качественные и количественные характеристики распределений узких флотационных фракций нефелина на продукты различного минерального состава в камере флотационной машины ОК-38.

Идея работы заключается в использовании возможности применения результатов вычислительного эксперимента для получения сепарационных характеристик как действующей, так и вновь создаваемой флотационной техники и обоснования оптимальных технологических параметров обогащения питания основной нефелиновой флотации.

Использование вычислительного эксперимента для исследования ММК флотации позволяет избежать установки измерительных приборов и датчиков в рабочий объем камеры флотационной машины и при этом получать качественные и количественные данные о процессе, минимизировав необходимые для проведения подобного физического эксперимента материальные и временные ресурсы.

### Материал и методика вычислительного эксперимента

В качестве основы вычислительного блока модели была принята Эйлерова модель многофазного потока. ГСПФ рассматривается как стационарная система. К ней применимы законы сохранения массы, энергии и количества движения. Модель Эйлера основана на связи



этих законов и формализуется рядом соответствующих дифференциальных уравнений. При этом, исходя из пространственной ограниченности исследуемой ГСПФ, использование модели Эйлера позволяет сделать ряд существенных допущений в отношении как системы в целом, так и каждой псевдофазы в отдельности:

- система изобарна, т.е. магистральная и любая из вторичных псевдофаз испытывают постоянное равномерно распределенное давление;
- в силу ничтожности энергии локальных колебаний твердых частиц около их центров тяжести по сравнению с кинетической энергией ГСПФ полной энергией таких колебаний можно пренебречь;
- совокупности твердых частиц, представляющих любую одну из твердых псевдофаз, движутся в элементарных объемах (конечных элементах) модели ГСПФ подобно потоку псевдожидкой фазы. Тем самым в модели ГСПФ в любой момент времени можно выделить поток отдельной твердой псевдофазы, который подобно реальной жидкости характеризуется свойством вязкости;
- каждая из псевдофаз движется в модели ГСПФ одновременно со всеми остальными псевдофазами. В каждом элементарном объеме модели ГСПФ в любой момент времени могут быть обнаружены частицы, представляющие с различной вероятностью весь набор псевдофаз. В зависимости от принадлежности к той или иной псевдофазе разные частицы испытывают неодинаковое воздействие со стороны ГСПФ и в свою очередь влияют на движение и магистральной и иных вторичных псевдофаз. Модель Эйлера учитывает этот эффект взаимного влияния движения псевдофаз посредством введения различных (приведены ниже) математических моделей фактора сопротивления;
- явления вязкого трения и разница инерционных свойств различных псевдофаз обуславливают, даже при незначительных значениях скоростного режима потока, формирование зон турбулентной активности. Турбулентность негативно влияет на процесс флотации, что объясняется резким снижением в ее зоне количества элементарных актов флотации в силу значительных разностей центробежных составляющих скорости дисперсной газовой и различных твердых фаз;
- если представить мгновенное состояние ГСПФ, то объем, занимаемый ею, большей частью содержит магистральную фазу и в меньшей степени распределенные в нем вторичные псевдофазы. На долю каждой вторичной псевдофазы приходится лишь часть мгновенного объема ГСПФ. Псевдофазы движутся, взаимопроникая друг в друга, образуя в совокупности многоскоростной многофазный континуум (ММК). Теория ММК оперирует понятием объемной доли  $\alpha_q$  каждой, включая магистральную, псевдофазы.

Уравнения модели Эйлера имеют следующий вид:

уравнение сохранения массы для псевдофазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{с}} \right],$$

где  $\alpha_q$  – объемная доля,  $\rho_q$  – физическая плотность и  $\vec{v}_q$  – скорость –псевдофазы. Условия процесса и, соответственно, форма записи приведенного уравнения не предполагают межфазного массопереноса и наличия источников или стоков массы псевдофазы в модели ГСПФ;

уравнение сохранения импульса –псевдофазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \text{м}^2} \right],$$

где  $p$  – давление, равномерно распределенное между всеми псевдофазами;  $\bar{\tau}_q$  – тензор напряжений-псевдофазы, учитывающий ее сдвиговую и объемную вязкость;  $\vec{R}_{pq}$  – сила взаимодействия между псевдофазами ( $\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$ ;  $\vec{R}_{qq} = 0$ ):

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q); K_{pq} = K_{qp},$$

где  $K_{pq}$  – межфазный коэффициент обмена импульсом. Так же как уравнение сохранения массы, уравнение сохранения импульса не предполагает межфазного массообмена и наличия внутри ГСПФ источников и стоков массы псевдофаз. Кроме того, правая часть уравнения не учитывает роль т.н. эффектов подъема частиц в поле градиента скорости фазового потока. Такие эффекты существенны,

если частицы вторичной псевдофазы предполагаются сравнительно крупными или объединяются в виде плотноупакованных агрегатов. Также уравнение не учитывает влияния сторонних сил, которые побуждали бы частицы любой из вторичных псевдофаз ускоряться относительно магистральной фазы.

Для взаимодействий типа пузырек газа – жидкость использована универсальная модель сопротивления [1] с коэффициентом обмена:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p},$$

где  $q$  – индекс жидкой фазы,  $p$  – индекс газовой пузырьковой фазы; время релаксации пузырька:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_e};$$

функция сопротивления:

$$f = \frac{C_D Re}{24}, Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_q - \vec{v}_p| d_p}{\mu_e};$$

коэффициент сопротивления:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1 Re^{0,75});$$

эффективная вязкость жидкой фазы с учетом влияния компонентов ММК:

$$\mu_e = \frac{\mu_q}{1 - \alpha_p}.$$

Для взаимодействий типа твердая частица – жидкость использована модель сопротивления Вена и Ю [2] с коэффициентом обмена:

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s \alpha_l^{2,65}},$$

где  $C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0,15(\alpha_l Re_s)^{0,687}]$ ,  $Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l}$ .

Для взаимодействий типа твердая частица – пузырек газа использована модель сопротивления Шиллера и Науманна [3], определяемая по аналогии с универсальной моделью сопротивления за исключением вычисления коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса для пары вторичных фаз:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15 Re^{0,687}) / Re & Re \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases}, Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p|}{\alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r} d_{rp}.$$

Для взаимодействий типа твердая частица – твердая частица использована симметричная модель сопротивления Сиамлала и О’Бриена [4] без учета взаимного трения для разбавленных фаз с коэффициентом обмена:

$$K_{ls} = \frac{3\alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2}{2(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_l - \vec{v}_s|.$$

Уравнение сохранения энергии для псевдофазы:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \frac{\vec{\tau}_q}{\nabla \vec{v}_q} - \nabla \vec{q}_q \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{с}} \right],$$

где  $h_q$  – энтальпия  $q$  – фазы,  $\vec{q}_q$  – тепловой поток. В такой форме уравнение сохранения энергии в полной мере соответствует принятым выше допущениям, но в отличие от полной формы записи не учитывает источники и стоки энтальпии как результат, например, химической реакции или излучения, интенсивность теплообмена между фазами, энтальпию фазовых переходов первого рода.

Магистральной фазой модели является среда, обладающая физико-химическими свойствами водного раствора ПАВ малой концентрации со значениями рН в соответствии с регламентом реализуемой технологии получения нефелинового концентрата. Первой из вторичных псевдофаз является дисперсная фаза, каждый элементарный объем которой обладает физическими свойствами пузырька воздуха. Отнесение каждой твердой частицы к какой-либо вторичной псевдофазе модели

зависит от значения величин физических и химических свойств этой частицы, определяющих ее положение в интервалах соответствующих статистических распределений [5].

Первичные данные для формулировки условий однозначности CFD модели ГСПФ это данные о составе питания флотации, получаемые в результате гранулометрического, химического и минералогического анализов пробы. Необходимой составляющей этих данных является оценка раскрытия полезного минерала в классах крупности частиц. Таким образом, набор сведений о составе питания флотации состоит из  $i$ -классов крупности  $j$ -минералов и -сортов полезного минерала. При этом номер  $k$ , равный единице, соответствует полезному минералу с минимальным содержанием примесей в виде сростков («чистый минерал»), максимальный номер  $k$  соответствует полезному минералу с максимальным содержанием примесей («сопутствующий минерал»). Расчетные выходы классов крупности  $u_{im}$  и массовое содержание твердых псевдофаз позволили определить их объемные доли  $\beta_{vm}$  в потоке питания CFD модели ГСПФ, являющиеся параметрами субстанциональных уравнений гидродинамики.

В табл. 1 приведен гранулометрический и минеральный состав пробы питания основной нефелиновой флотации. В табл. 2 – минерально-фазовый состав нефелина в этой же пробе.

Для численной характеристики раскрытия минеральных фаз использовались следующие понятия и градации:

■ *свободные(или раскрытые) зерна или фазы* – частицы, которые визуально определяются как нефелин, не содержат включений других минеральных фаз, либо доля ( $x$ ) таких фаз занимает не более 5% объема зерна ( $0 < x < 5 \%$ );

■ *бедные сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет от 5 до 25% объема зерна ( $5 < x < 25 \%$ );

■ *средние сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет от 25 до 55% объема зерна ( $25 < x < 55 \%$ );

■ *богатые сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет от 55 до 75% объема зерна ( $55 < x < 75 \%$ );

■ *очень богатые сростки* – частицы нефелина, в которых доля другого минерала составляет более 75%.

В сростках выделяются:

- *бинарные сростки*, состоящие из двух (или преимущественно из двух) минералов, где наиболее часто встречаются такие как нефелин и эгирин, нефелин и полевои шпат, нефелин и слюды;

- *полиминеральные сростки* – трехкомпонентные сростки, состоящие из трех минералов, – обычно это нефелин-эгириновые сростки с примесью полевого шпата.).

В пробе доля бинарных сростков составляет 85%, полиминеральных – 15%. Среди бинарных сростков: 65% – нефелин-эгириновые, 15% – нефелин-полевошпатовые, 5% – нефелин-слюдяные.

Таблица 1

Минералогический состав пробы питания основной нефелиновой флотации

Классы, мм	Выход, %	Содержание минералов, вес %													Σ
		Нефелин	Эгирин	Полевой шпат	Сфен	Слюды	Апатит	Гидрослюды	Ильменит	Лампрофиллит	Цеолиты	Титаномагнетит	Гидроокислы Fe	Энигмагит	
-0.315+0.2	9.98	73.0	5.0	16.0	0.2	1.0	2.4	0.7	0.0	0.4	0.8	0.0	0.5	0.0	100
-0.2+0.16	11.93	73.0	8.0	13.1	0.6	0.8	2.0	1.0	0.2	0.2	0.5	0.0	0.6	0.0	100
-0.16+0.1	30.72	66.5	16.4	9.4	2.5	1.3	1.1	0.9	0.5	0.3	0.5	0.1	0.4	0.1	100
-0.1+0.071	17.58	59.0	21.2	9.0	2.8	2.0	0.9	1.1	1.5	1.2	0.4	0.3	0.3	0.3	100
-0.071	29.79	52.0	26.7	6.5	3.5	2.5	1.1	1.3	2.0	1.7	1.0	1.1	0.3	0.3	100
Итого:	100.0	62.3	18.2	9.6	2.4	1.7	1.3	1.0	1.0	0.9	0.7	0.4	0.4	0.2	100

Минерально-фазовый состав нефелина в пробе

Классы, мм	Выход, %	Доля минерала-примеси $x$ в сростках с нефелином, вес %.					
		$0 < x < 5$	$5 < x < 25$	$25 < x < 55$	$55 < x < 75$	$75 < x < 95$	$\Sigma$
-0.315+0.2	9.98	57.7	10.1	3.8	0.7	0.7	73.0
-0.2+0.16	11.93	60.6	7.6	3.9	0.6	0.3	73.0
-0.16+0.1	30.72	61.2	3.0	1.7	0.3	0.3	66.5
-0.1+0.071	17.58	55.5	2.2	1.3	–	–	59.0
-0.071	29.79	51.5	0.3	0.2	–	–	52.0
Итого:	100.00	56.9	3.3	1.6	0.2	0.2	62.2

На основании результатов обработки данных гранулометрического, минерального и минерально-фазового анализов содержание компонентов твердого в питании флотации приведено к виду, представленному в табл. 3. Объемное содержание твердых компонентов необходимо при формулировке условий однозначности рассматриваемой модели для проведения вычислительного эксперимента в программном комплексе ANSYS с целью изучения полей скоростей и распределения концентрации фаз ГСПФ.

По результатам химического анализа пробы питания содержание веществ, имеющих основной промышленный интерес, следующее:  $Al_2O_3$  – 23.69 % и  $P_2O_5$  – 0.55 %.

Таблица 3

Значения объемных содержаний сростковых фаз нефелина и сопутствующих минералов в твердой фазе пробы питания флотации нефелина

$j$	$k$	$i$	-0.315+0.2	-0.2+0.16	-0.16+0.1	-0.1+0.071	-0.071	Итого
		$\gamma_i$	0.1045	0.1239	0.3105	0.1738	0.2873	
1	1	Нефелин $0 < x < 5$	0.5895	0.6244	0.6478	0.6008	0.5713	0.6087
	2	Нефелин $5 < x < 25$	0.1032	0.0783	0.0318	0.0238	0.0033	0.0354
	3	Нефелин $25 < x < 55$	0.0388	0.0402	0.0180	0.0141	0.0022	0.0177
	4	Нефелин $55 < x < 75$	0.0072	0.0062	0.0032	0.0000	0.0000	0.0025
	5	Нефелин $75 < x < 95$	0.0072	0.0031	0.0032	0.0000	0.0000	0.0021
2		Эгирин	0.0383	0.0618	0.1302	0.1721	0.2222	0.1458
3		Полевой шпат	0.1622	0.1340	0.0988	0.0967	0.0716	0.1016
4		Сфен	0.0015	0.0046	0.0198	0.0227	0.0291	0.0192
5		Апатит	0.0195	0.0164	0.0093	0.0077	0.0097	0.0111
6		Слюды	0.0092	0.0074	0.0123	0.0194	0.0248	0.0162
7		Гидрослюды	0.0077	0.0111	0.0103	0.0129	0.0156	0.0121
8		Ильменит	0.0000	0.0011	0.0029	0.0090	0.0123	0.0061
9		Лампрофиллит	0.0031	0.0016	0.0024	0.0098	0.0143	0.0071
10		Цеолиты	0.0095	0.0060	0.0062	0.0050	0.0129	0.0082
11		Титаномагнетит	0.0000	0.0000	0.0006	0.0017	0.0063	0.0023
12		Гидроокислы железа	0.0031	0.0038	0.0026	0.0020	0.0021	0.0025
13		Энигматит	0.0000	0.0000	0.0007	0.0022	0.0023	0.0013
		Итого:	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Определение твердых псевдофаз модели основано на том, что их количество и состав в вычислительном эксперименте должны отвечать уровню его ожидаемой достоверности, технической оснащенности и времени, отведенному на его проведение. Для постановки данного вычислительного эксперимента на основе приведенного распределения твердых фаз пробы питания определено девять псевдофаз (узких флотационных фракций) в потоке питания CFD модели ГСПФ, интегральные свойства которых отражают степень вхождения в них реальных минералов. Для каждой из девяти

псевдофаз рассчитаны эффективные плотности и массовые доли  $Al_2O_3$  и  $P_2O_5$ . Учитывая, что минералы, входящие в псевдофазу модели, равновероятно формируют поверхности ее частиц, проведена оценка долей поверхности частиц каждой фазы, приходящихся на каждый фазообразующий минерал. Такая оценка обоснована известными зависимостями объема и площади поверхности частицы от ее эффективного диаметра. В табл. 4 приведены эффективные диаметры частиц и плотности псевдофаз модели, массовые доли  $Al_2O_3$  и  $P_2O_5$ .

Таблица 4

Значения объемных содержаний псевдофаз в потоке питания CFD модели

$\gamma_{im}$	0.2284	0.4843	0.2873	Итого
$d, mm$	0.2375	0.1155	0.0355	
Псевдофазы № 1–3	nef_1; $\beta_1 = 0.0362$	nef_2; $\beta_2 = 0.0725$	nef_3; $\beta_3 = 0.0374$	0.1461
$\rho$	2.625			
$Al_2O_3 / P_2O_5$	0.3448 / 0.0000			
Псевдофазы № 4–6	nef_4; $\beta_4 = 0.0048$	nef_5; $\beta_5 = 0.0041$	nef_6; $\beta_6 = 0.0003$	0.0092
$\rho$	2.952			
$Al_2O_3 / P_2O_5$	0.1745 / 0.0000			
Псевдофазы № 7–9	nef_7; $\beta_7 = 0.0109$	nef_8; $\beta_8 = 0.0333$	nef_9; $\beta_9 = 0.0274$	0.0716
$\rho$	2.811	3.167	3.304	
$Al_2O_3 / P_2O_5$	0.1337 / 0.0422	0.0603 / 0.0127	0.0392 / 0.0097	
Итого:	0.0518	0.1098	0.0652	

Для каждой из фаз модели определены энергетические константы ионов, входящих в структуры кристаллических решеток минералов, содержащихся в пробе питания основной флотации нефелина. При этом использовались значения энергетических констант ионов, приведенные в [6] и полученные на основе методики расчета [7] (табл. 5). Справочные и расчетные данные для оценки флотационных свойств компонентов питания обратной нефелиновой флотации отражены в табл. 6.

Таблица 5

Энергетические константы ионов, входящих в структуры кристаллических решеток минералов, содержащихся в пробе питания основной флотации нефелина

H	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe2+	Fe3+	Sr
0.32	1.55	0.37	0.45	2.15	4.95	8.60	14.40	0.36	1.75	8.40	2.12	5.15	1.58

Данные получены методом количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен по установленной связи между ее величиной и значениями энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала. Такой подход основывается на геоэнергетической теории А.Е. Ферсмана [8] и работах В.В. Зуева и др. [9], посвященных кристаллоэнергетике и оценке свойств твердых материалов.

Геоэнергетическая теория А.Е. Ферсмана рассматривает энергию ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, исходя из представлений о полном потенциале ионизации (энергетической константе,  $\epsilon_k$ ), присущем каждому входящему в решетку аниону или катиону. Формула, предложенная А.Е. Ферсманом:

$$U_v = 1071.5 \cdot \frac{\rho}{\mu} \sum_{i=1}^n \varepsilon_k j_i [\text{кДж/см}^3],$$

где  $U_v$  – объемная энергия ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала; 1071.5 – поправка на вклад ионов в энергию решетки минерала;  $\rho$  – плотность минерала, г/см<sup>3</sup>;  $\mu$  – молярная масса минерала, г/моль;  $n$  – количество сортов ионов, входящих в решетку;  $\varepsilon_k$  – энергетическая константа иона  $i$ -го сорта;  $j_i$  – количество ионов  $i$ -го сорта.

Таблица 6

Справочные и расчетные данные для оценки флотационных свойств компонентов питания обратной нефелиновой флотации

Минерал	Формула	$\frac{U_\mu, \text{кДж}}{\text{моль}}$	$\frac{U_v, \text{кДж}}{\text{см}^3}$	$\frac{E_s^{fs}, \text{Дж}}{\text{м}^2}$	$\frac{E_s^{ls}, \text{Дж}}{\text{м}^2}$	$k, \text{Н/м}$	$\Delta V$
Нефелин	$KNa_3[AlSiO_4]_4$	86481	391	1.28	1.26	0.013	1.087
Эгирин	$NaFe^{3+}[Si_2O_6]$	34395	521	1.61	1.65	0.076	0.896
Полевой шпат	$K[AlSi_3O_8]$	46621	445	1.42	1.43	0.045	1.032
Сфен	$CaTi[SiO_4]O$	28395	507	1.57	1.61	0.074	0.955
Апатит	$Ca_5[PO_4]_3F$	75991	498	1.55	1.58	0.072	0.846
Слюда	$KMg_3[Si_3AlO_{10}] \cdot (OH)_2$	60861	430	1.38	1.38	0.035	0.926
Гидрослюды	$Fe^{2+}Fe^{3+}Mg[Si_3AlO_{10}] \cdot (OH)_2 \cdot 4H_2O$	73044	346	1.17	1.13	>0	1.002
Ильменит	$FeTiO_3$	16255	508	1.58	1.61	0.074	1.000
Лампрофиллит	$Sr_2Na_3Ti_3[Si_2O_7]_2O_3(OH)$	98932	435	1.39	1.39	0.039	0.944
Цеолиты	$Na_2[Al_2Si_3O_{10}] \cdot H_2O$	58172	364	1.22	1.18	0.003	1.151
Титаномagnetит	$Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4 \cdot Fe_2^{2+}TiO_4$	40138	445	1.42	1.42	0.045	1.028
Гидроокислы Fe	$Fe^{3+}O(OH)$	9183	440	1.40	1.41	0.042	0.860
Энигматит	$Na_2Fe_5^{2+}Ti[Si_6O_{18}]O_2$	109829	483	1.51	1.54	0.066	0.930

Примечание. Расчетные данные:

$U_\mu$  – молярная энергия связи кристаллической решетки минерала;

$U_v$  – объемная энергия связи кристаллической решетки минерала;

$E_s^{fs}$  – поверхностная энергия границы раздела воздух при нормальных условиях – твердое;

$E_s^{ls}$  – поверхностная энергия границы раздела жидкость при нормальных условиях – твердое;

$k$  – флотуемость;

$\Delta V$  – структурная рыхлость минерала.

Большинство физико-химических свойств минералов может быть количественно описано с позиций удельных значений энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке. Исследования, проведенные в работе [5], позволяют проводить расчеты поверхностной энергии минералов по линейной эмпирической зависимости:

$$E_s = 0.0025 \cdot U_v + 0.3052 [\text{Дж/м}^2]$$

с достоверностью аппроксимации  $R^2=0.8919$ .

Основой для расчета скорости подачи питания при основной нефелиновой флотации в стационарном режиме явилась технологическая схема получения нефелинового концентрата на АНОФ-2. Фрагмент схемы в пересчете на операцию основной нефелиновой флотации приведен на рис.1.

Согласно конструкторской документации на флотационную машину ОК-38, площадь сечения загрузочного устройства подачи питания  $S_p = 0.4 * 1.4 = 0.56 \text{ м}^2$ . Расход питания.  $V_p = 431.6/3600 = 0.120 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тогда скорость подачи питания  $v_p = V_p/S_p = 0.214 \text{ м/с}$ .

Скорость подачи воздуха через канал вала импеллера флотационной машины также определена, исходя из штатных режимов работы ОК-38. При диаметре сечения канала вала импеллера  $d_i = 0.16 \text{ м}$  и расходе воздуха  $V_a = 0.25 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $v_a = 4V_a/\pi d_i^2 = 12.434 \text{ м/с}$ .

ММС в слабом поле				Условные обозначения			
100	0,65	215,3	333,7	$\gamma$ %	$\beta$ $P_2O_5$ %	$Q$ т/ч	$W$ $\text{м}^3/\text{ч}$
23,07				$\beta$ $Al_2O_3$ %	$\varepsilon$ $P_2O_5$ %	% тв.	$V$ $\text{м}^3/\text{ч}$
100	100	39,22	431,6	$\varepsilon$ $Al_2O_3$ %	$\varepsilon$ $P_2O_5$ %	% тв.	$V$ $\text{м}^3/\text{ч}$
Немагнитный продукт							
Основная нефелиновая флотация							
52,00	0,38	112,0	92,7	48,00	0,94	103,3	241,0
28,38				17,31			
64,00	30,61	54,71	153,7	36,00	69,39	30,00	277,9
Камерный продукт				Пенный продукт			

Рис. 1. Фрагмент технологической схемы получения нефелинового концентрата на АНОФ-2 в пересчете на операцию основной нефелиновой флотации

При построении CFD модели ГСПФ, работающей в стационарном режиме, важным моментом является максимально возможное соблюдение условий реального производства. К таким условиям, в частности, относится соотношение полных объемных выходов (камерный и пенный продукты) в том смысле, что если за единицу времени в камеру флотационной машины поступает постоянный совокупный объем веществ и процесс происходит изобарно, то такой же по величине объем должен выходить из камеры за тот же интервал времени. Также учтено следующее: если питание основной нефелиновой флотации поступает на операцию через загрузочное устройство подачи питания первой камеры в технологической цепи флотационной машины, то питанием второй камеры является камерный продукт первой камеры и т.д. Исходя из количества (двухкамерных) флотационных машин ОК-38 в технологической цепочке основной нефелиновой флотации на АНОФ-2 и предположения о равной интенсивности процесса флотации в каждой камере, количество которых ( $z$ ) равно шести, рассчитано соотношение полных объемных выходов для каждой камеры. При этом принято, что весь объем воздушной фазы, поступающий в любую из шести камер через каналы валов импеллеров, содержится в пенной фазе. Коэффициенты учета интенсивности флотации рассчитаны для жидкой и твердой фаз по формулам:

$$k_{water} = 1 - \sqrt[z]{\frac{W_{кам}}{W_{num}}} = 1 - \sqrt[6]{\frac{92.7}{333.7}} = 0.192231;$$

$$k_{solid} = 1 - \sqrt[z]{\frac{V_{кам} - W_{кам}}{V_{num} - W_{num}}} = 1 - \sqrt[6]{\frac{61}{97.9}} = 0.075817.$$

Рассчитанные значения расходов жидкой и твердой фаз в каждой из шести камер приведены в табл. 7.

В результате приведенных расчетов получены базовые параметры процесса флотации в первой камере флотационной машины, необходимые для контроля данных, получаемых в ходе вычислительного эксперимента (рис. 2).

Работу с программой можно представить в виде последовательности следующих шагов: загрузка расчетной сетки, выбор системы уравнений Эйлера, подключение стандартной  $k - \epsilon$  модели турбулентности, задание физических свойств веществ псевдофаз, определение магистральной фазы, определение вторичных псевдофаз, определение условий взаимодействия

фаз, активизация свойств расчетной области, активизация граничных условий модели, запуск программы, получение и обработка данных.

Таблица 7

Выходы жидкой и твердой фаз в пенный продукт каждой из шести камер

№ камеры	Жидкая фаза		Твердая фаза	
	Вход, м <sup>3</sup> /ч	Выход в пенный продукт, м <sup>3</sup> /ч	Вход, м <sup>3</sup> /ч	Выход в пенный продукт, м <sup>3</sup> /ч
1	333.7	64.147	97.9	7.423
2	269.6	51.816	90.5	6.860
3	217.7	41.856	83.6	6.340
4	175.9	33.810	77.3	5.859
5	142.1	27.310	71.4	5.415
6	114.8	22.061	66.0	5.004
Итого	333.7	241.0	97.9	36.9

И, наконец, для создания модели процесса в первой камере определены условия однозначности по соотношению полных объемных выходов (табл. 8).

Таблица 8

Баланс объемных выходов в первой камере основной нефелиновой флотации

Поток	$W, \text{м}^3/\text{ч}$	$V_s, \text{м}^3/\text{ч}$	$V_a, \text{м}^3/\text{ч}$	$\Sigma, \text{м}^3/\text{ч}$	Итого
Питание	333.7	97.9	900	1331.6	1
Полный объемный выход пенного продукта	64.147	7.423	900	971.570	0.730
Полный объемный выход камерного продукта	269.553	90.477	0	360.030	0.270



Рис. 2. Качественно-количественные базовые параметры CFD модели ГСПФ

В модели определялись массовые потоки псевдофаз модели через поверхности ввода питания и выходов камерного и пенного продуктов, а также объемное содержание фаз в расчетной области модели.



Так, приняв, что для момента времени модели  $\tau(c):mf_i$  – массовый поток  $i$ -й псевдофазы через поверхность ввода питания (кг/с);  $ec_i$  – массовый поток  $i$ -й псевдофазы через поверхность выхода камерного продукта (кг/с);  $ef_i$  – массовый поток  $i$ -й псевдофазы через поверхность выхода пенного продукта (кг/с);  $v_i$  – объемный интеграл  $i$ -й псевдофазы модели ( $\text{м}^3$ );  $\rho_i$  – плотности  $i$ -й псевдофазы ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), обработка полученной числовой информации осуществлялась в следующем порядке:

массовый баланс  $G$  твердых псевдофаз модели:

$$G = 1 - \sum_{i=1}^n (ec_i + ef_i) / \sum_{i=1}^n p_i;$$

текущее содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  питания на входе в модель:

$$\beta_p^{Al_2O_3} = \sum_{i=1}^n (\beta_i^{Al_2O_3} (ec_i + ef_i)) / \sum_{i=1}^n (ec_i + ef_i),$$

$$\beta_p^{P_2O_5} = \sum_{i=1}^n (\beta_i^{P_2O_5} (ec_i + ef_i)) / \sum_{i=1}^n (ec_i + ef_i);$$

выходы камерного и пенного продуктов в модели, получаемые в вычислительном эксперименте:

$$\gamma_c = \sum_{i=1}^n ec_i / \sum_{i=1}^n (ec_i + ef_i); \gamma_f = \sum_{i=1}^n ef_i / \sum_{i=1}^n (ec_i + ef_i);$$

содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  в продуктах модели, получаемые в вычислительном эксперименте:

$$\beta_c^{Al_2O_3} = \sum_{i=1}^n (\beta_i^{Al_2O_3} ec_i) / \sum_{i=1}^n ec_i; \beta_f^{Al_2O_3} = \sum_{i=1}^n (\beta_i^{Al_2O_3} ef_i) / \sum_{i=1}^n ef_i,$$

$$\beta_c^{P_2O_5} = \sum_{i=1}^n (\beta_i^{P_2O_5} ec_i) / \sum_{i=1}^n ec_i; \beta_f^{P_2O_5} = \sum_{i=1}^n (\beta_i^{P_2O_5} ef_i) / \sum_{i=1}^n ef_i;$$

извлечение  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  в продукты модели, получаемые в вычислительном эксперименте:

$$\varepsilon_c^{Al_2O_3} = \frac{\gamma_c \beta_c^{Al_2O_3}}{\beta_{mf}^{Al_2O_3}}, \varepsilon_c^{P_2O_5} = \frac{\gamma_c \beta_c^{P_2O_5}}{\beta_{mf}^{P_2O_5}}, \varepsilon_f^{Al_2O_3} = \frac{\gamma_f \beta_f^{Al_2O_3}}{\beta_{mf}^{Al_2O_3}}, \varepsilon_f^{P_2O_5} = \frac{\gamma_f \beta_f^{P_2O_5}}{\beta_{mf}^{P_2O_5}}.$$

### Результаты вычислительного эксперимента и краткие выводы

Результаты вычислительного эксперимента приведены по состоянию модели ГСПФ на момент 560 сек. процесса.

Получены поля скоростей ГСПФ в целом и каждой дисперсной фазы в отдельности. Данная информация позволяет выявить в объеме ГСПФ зоны гидродинамической активности, которые характеризуются образованием локальных турбулентных потоков, снижающих вероятность элементарных актов флотации, а также зоны, где гидродинамическая активность ГСПФ низка, что способствует образованию застойных областей с пониженной концентрацией газовой фазы. Тем самым формируется полная картина расположения зон ГСПФ, в которых проявляются гидродинамические условия, в различной степени способствующие процессу флотации. На рис. 3\* представлены поля скоростей магистральной фазы и вторичной псевдофазы, каждая частица которой обладает свойствами пузырька воздуха, в среднем сечении объема ГСПФ.

Получены индикаторные распределения твердых псевдофаз (рис. 4, 5). Индикатором распределения является объемная доля псевдофазы в потоке питания модели. Индикаторное распределение позволяет оценить характер положения фазы в ГСПФ по сравнению с распределением фазы в питании процесса, тем самым выявляя тенденцию заполнения фазой рабочего объема флотационной камеры.

\* На рис. 3–6 проекция модели выбрана таким образом, что направление движения внешнего потока питания слева направо, выход пенного продукта по внешней нормали от верхнего среза проекции, вращение импеллера правовинтовое (ось  $-Z$ ).

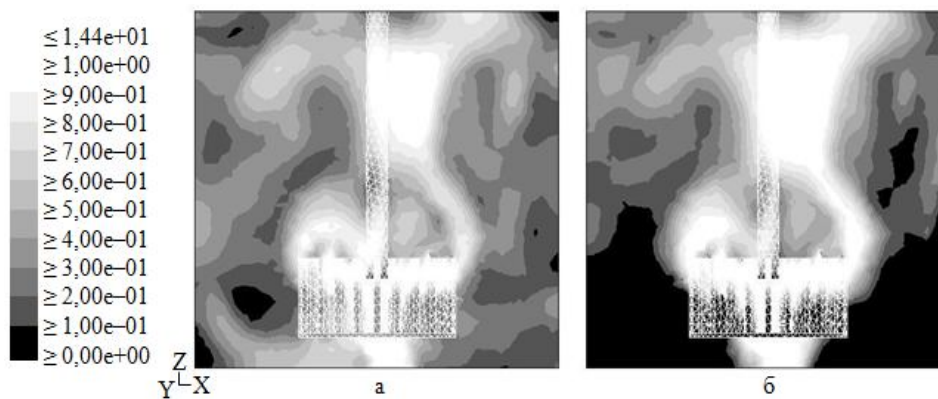


Рис.3. Поля скоростей (магнитуда, м/с) магистральной фазы (а) и вторичной псевдофазы, каждая частица которой обладает свойствами пузырька воздуха (б)

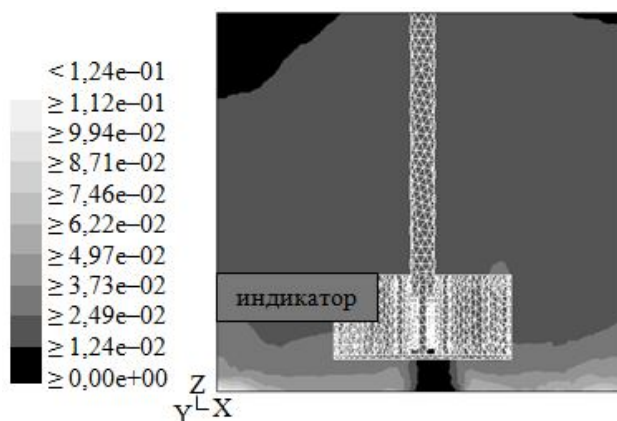


Рис. 4. Индикаторное распределение гидрофильной псевдофазы «nef\_1», имеющей в потоке питания объемное содержание  $3,63e-02$  и расход  $11,388$  кг/с

Получены средневзвешенные распределения концентраций твердых псевдофаз. Центр распределения определен как среднее арифметическое суммы объемных долей твердых псевдофаз модели, равное  $4,18e-02,0$ . Средневзвешенное распределение позволяет установить качественную и количественную прогнозные оценки формирования камерного и пенного продуктов.

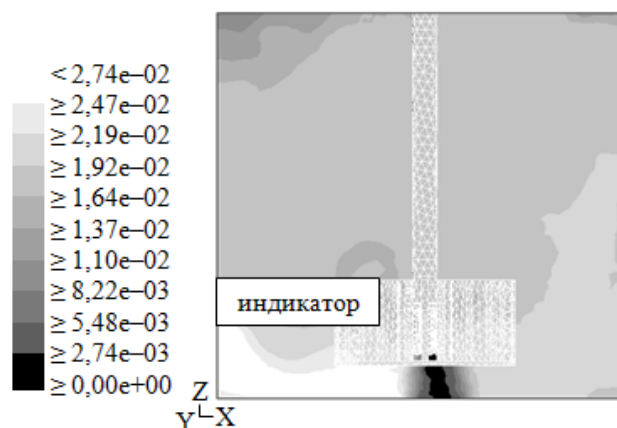


Рис. 5. Индикаторное распределение гидрофобной псевдофазы «nef\_9», имеющей в потоке питания объемное содержание  $2,74e-02$  и расход  $10,849$  кг/с

Наблюдаемый массовый дисбаланс ГСПФ  $G = 3,26\%$  (рис. 7) обуславливает отклонение полученных текущих значений технологических показателей от базовых (см. рис. 2 и табл. 9, 10). Моделируемый процесс флотации протекает в условиях высокоградиентных полей массообмена в объеме порядка  $38$  м<sup>3</sup> при интенсивных гидродинамических нагрузках, вызываемых вращением

импеллера, подачи и диспергацией газовой фазы, формированием в придонных областях камеры подвижного псевдоожиженного слоя, который преимущественно содержит частицы гидрофильных фаз.

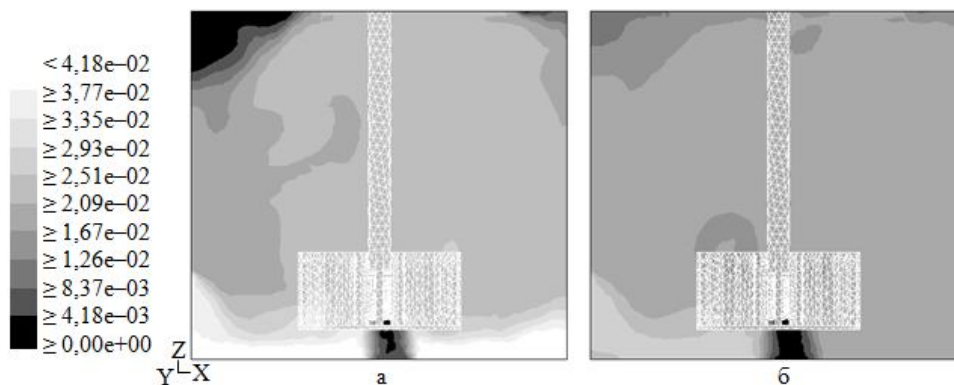


Рис. 6. Средневзвешенные распределения гидрофильной псевдофазы «nef\_1» (а), имеющей объемное содержание в ГСПФ  $1.08e-01$  и гидрофобной псевдофазы «nef\_9» (б), имеющей объемное содержание в ГСПФ  $2.74e-02$

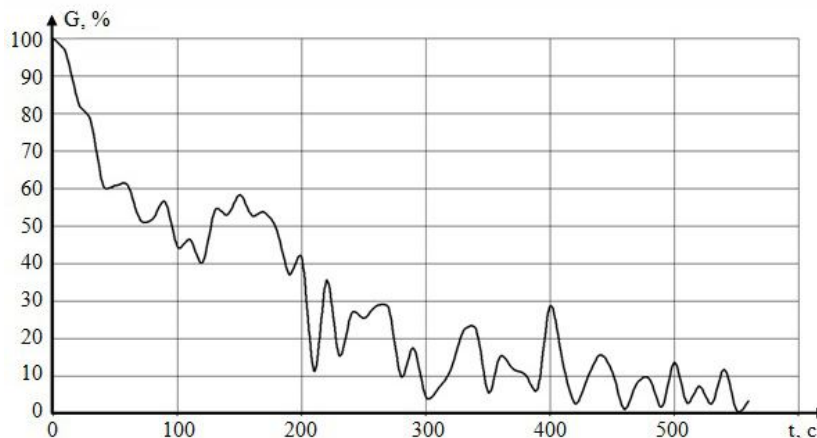


Рис. 7. График массового баланса твердых псевдофаз модели

Таблица 9

Выходы камерного и пенного продуктов в модели

Параметр	Камерный продукт модели			Пенный продукт модели		
	Расчет	Результат	$\Delta$	Расчет	Результат	$\Delta$
$\gamma$	89.61%	89.71%	0.11%	10.39%	10.29%	-0.97%

Вычислительный эксперимент, проведенный над CFD моделью гетерогенной системой процесса основной (обратной) флотации нефелина, дает представление о гидродинамике системы, позволяет количественно оценить технологические параметры флотации, выявляет закономерности распределения концентраций и скоростей компонентов ГСПФ.

Таблица 10

Содержание и извлечение  $Al_2O_3$  и  $P_2O_5$  в продуктах модели

Параметр	$Al_2O_3$			$P_2O_5$		
	Расчет	Результат	$\Delta$	Расчет	Результат	$\Delta$
$\beta_k$	24.44%	24.61%	0.69%	0.52%	0.53%	0.95%
$\varepsilon_k$	92.42%	93.19%	0.83%	84.31%	85.49%	1.38%
$\beta_f$	17.29%	16.95%	-2.01%	0.83%	0.82%	-0.73%
$\varepsilon_f$	7.85%	7.36%	-2.96%	15.69%	15.39%	-1.95%

Исследование ГСПФ с применением компьютерного CFD моделирования позволило получить информацию о ее функционировании. Такие данные достаточно информативны с точки зрения технологических показателей обогащения. ANSYSFluent позволяет получать интегрально-дифференциальные оценки физических и статистических параметров псевдофаз в любой области исследуемой системы в каждый момент времени как в графическом, так и в числовом виде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kolev N.I. Multiphase Flow Dynamics 2: Thermal and Mechanical Interactions. Springer, Berlin, Germany, 2nd edition edition, 20051994.
2. С.-Y.Wen, Y.H.Yu. Mechanics of Fluidization. Chem. Eng. Prog. Symp.Series, 62:100–111, 1966.
3. Schiller L., Naumann Z., Ver Z. Deutsch. Ing., 77:318, 1935.
4. Syamlal M. The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1987.
5. Тихонов О.Н. Теория сепарационных процессов. Ч. 1. Технический университет: учеб. пособие. СПб., 2003.
6. Бокй Г.Б. Кристаллохимия. М.: Недра, 1971.
7. Рабинович В.А. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. Л.: Химия, 1977.
8. Ферсман А.Е. Геохимия. М; Л: ОНТИ, Химтеорет, 1936.
9. Зув В.В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов / В.В. Зув, Л.Н. Поцелуева, Ю.Д. Гончаров. СПб., 2006.

#### Сведения об авторах

Скороходов Владимир Федорович – д.т.н., зав. лаб. новых обогатительных процессов и аппаратов; e-mail: skorohodov@goi.kolasc.net.ru

Никитин Роман Михайлович – ведущий технолог лаборатории новых обогатительных процессов и аппаратов; e-mail: remnik@yandex.ru

Рухленко Елена Дмитриевна – ведущий технолог инженерного центра; e-mail: lenar@goi.kolasc.net.ru

Веселова Елена Геннадьевна – технолог I категории инженерного центра; e-mail: root@goi.kolasc.net.ru

УДК 622.02.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ДАМБ НЕРАЗРУШАЮЩИМ СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

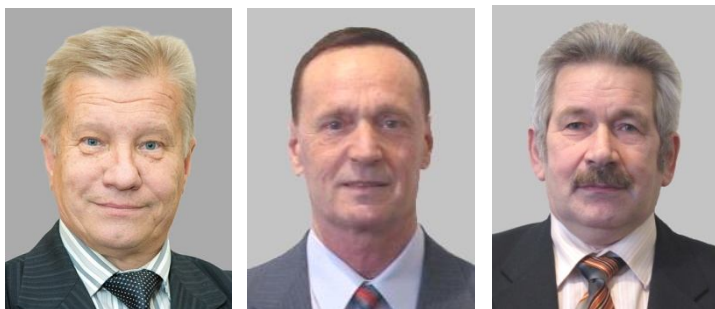
**Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов, Е.В. Кабеев**  
Горный институт КНЦ РАН

#### Аннотация

Для оценки качества уплотнения грунтов дамб в технологическом цикле строительства предложены критерии, основанные на взаимосвязи параметров сейсмических волн с уплотнением грунтов с использованием метода сейсмической томографии. Представлена методика и результаты ее использования при строительстве дамбы «Олений ручей» ОАО «СЗФК».

#### Ключевые слова:

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



Исходя из требований обеспечения экологической безопасности горного производства, защитные сооружения типа грунтовых дамб сегодня широко применяются на горнорудных предприятиях Кольского п-ова. Безопасная, безаварийная эксплуатация этих сооружений напрямую связана с возможностью возникновения в толще

грунтов зон разуплотнения как при их строительстве, так и при дальнейшей эксплуатации сооружений. В условиях арктического климата Заполярья с возможностью внутреннего промерзания грунтов,

образования линз льда в зимнее время и их оттаивания в летнее, а также влияние грунтовых вод делают задачу локализации зон разуплотнения внутри уплотняемого слоя в процессе строительства достаточно актуальной, а контроль качества их уплотнения становится неотъемлемой частью всего технологического процесса строительства.

Принятые в настоящее время прямые методы оценки плотностных характеристик грунтов способами отбора проб, шурфов не дают полного представления о распределении плотностных характеристик как в толще грунтов, так и по протяженности сооружения. При мощности грунтовой дамбы, составляющей более 2–3 м, эффективным является использование оперативных методов поверхностной сейсморазведки с томографической обработкой данных, основанных на взаимосвязи скоростей сейсмических волн и уплотнений грунта [1].

К числу основных требований при разработке экспертной полевой методики оценки качества уплотнения грунтов дамбы можно отнести в первую очередь ее оперативность, определяемую регламентом технологии работ по уплотнению грунтов, и необходимую достоверность. Для выполнения этих требований использован аналитико-экспериментальный подход, включающий два методических этапа:

- этап аналитической оценки допустимого интервала измеряемого параметра в соответствии с проектными допусками на величину уплотнения грунтов;

- этап экспериментальной проверки достоверности оцененного допустимого интервала измеряемых параметров на специально созданном экспериментальном эталонном по уплотнению блоке замещенного грунта.

Согласно рекомендациям СНиП 3.02.01-87 [2], для контроля качества послойной укладки грунта, представляющей собой обычно смеси в различных пропорциях обломочного скального грунта и щебня, следует применять коэффициент (степень) уплотнения  $m$  – отношение плотности сухого грунта ( $\rho_{ic}$ ) горной массы к максимальной плотности сухого грунта  $\rho_{cmax}$ , которая может быть достигнута при уплотнении. Тогда, чтобы избежать недоуплотнения, схема контроля должна удовлетворять условию:

$$m \geq m_{\text{проектн.}} \quad (1)$$

где  $m_{\text{проектн.}}$  – коэффициент уплотнения, устанавливаемый проектом в зависимости от класса капитальности, конструктивных особенностей объекта и сейсмичности района.

К настоящему моменту накоплено много данных о соотношении между плотностью грунта  $\rho_i$  и скоростями продольных волн  $V_{pi}$ . С достаточной степенью достоверности эти зависимости описываются степенным выражением вида:

$$\rho_i = a V_{pi}^\beta \quad (2)$$

где  $a$ ,  $\beta$  – эмпирические коэффициенты, определяемые при лабораторных испытаниях проб грунтов.

Тогда, с учетом (2), получим:

$$m = \left( \frac{V_{pi}}{V_{p \max}} \right)^\beta \quad (3)$$

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

Таким образом, задача аналитического этапа сводится к определению допустимого диапазона скоростей ( $V_{pi} \div V_{p \max}$ ), удовлетворяющего проектно заданному уплотнению  $m$ . Методика оценки  $V_{p \max}$  сводится к следующему. Вначале оцениваются максимально достижимые плотности грунта  $\rho_{c \max}$  и допустимый интервал уплотнения ( $\rho_{c \max} \div m \rho_{c \max}$ ). Для этого можно использовать целый ряд известных методик [3, 4]. Установленный допустимый размах оценочных плотностных характеристик грунта позволяет определить и соответствующий ему размах допустимых характеристик непосредственно измеряемых параметров грунтов на площадке, т.е. скоростей упругих сейсмических волн. Для этого используются известные зависимости пористости грунта (трещинной пустотности) и скорости сейсмической волны [5]:

$$n_i = (V_{p0} / V_{pi} - 1) / (V_{p0} / V_{p \max} - 1) \quad (4)$$

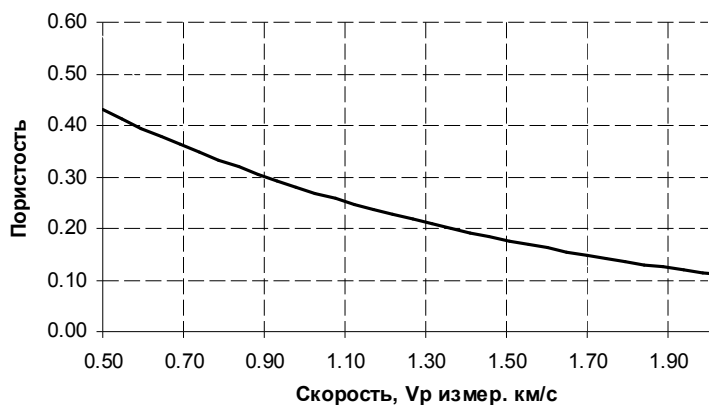
где  $V_{p0}$  – скорость продольной волны в скальной отдельности грунта;

$V_{p \text{ измер.}}$  – скорость продольной волны в грунте, измеренная в реальных натуральных условиях;

$V_{p \text{ зап.}}$  – скорость продольной волны в заполнителе пор грунта (для воздуха  $V_{p \text{ зап.}}=0.30$  км/с).

Для сухого грунта, принимая, что заполнитель порового пространства – воздух, графически эта зависимость представлена на рис. 1.

По графику легко оценивается искомый диапазон разрешенных скоростей в засыпке грунта, соответствующий заданным показателям пористости.



показателю станет неадекватной. Для оценки фактического состояния грунтов используется *Рис. 1. Взаимосвязь пористости грунта и скорости продольной волны*

поперечной сейсмических волн. Соотношение скоростей продольной и поперечной сейсмических волн, как известно [5], позволяет оценивать коэффициент Пуассона среды (коэффициент поперечной деформации) – характеристику состояния и деформируемости среды. Он определяется согласно выражению:

$$\nu = (1 - 2 \cdot \frac{V_s^2}{V_p^2}) / (2 \cdot (1 - \frac{V_s^2}{V_p^2})),$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона среды;  $V_p$ ,  $V_s$  – скорости продольной и поперечной волны, соответственно.

Диапазон изменения коэффициента Пуассона от 0 до 0.5 охватывает весь возможный спектр состояний среды от упруго-хрупкого, характерного для коренных скальных горных пород ( $\nu = 0-0.25$ ), до пористо-пластичного состояния с характерными значениями коэффициента Пуассона 0.30–0.35 (щебень, пески, глины и пр.). Для жидких сред величина  $\nu$  приближается к 0.5. Таким образом, влагонасыщение грунтов способствует росту величин коэффициента Пуассона среды. Согласно данным РСН 66–87 [6], для смесей обломочных грунтов и морены разница в показателях  $V_s/V_p$  сухих и водонасыщенных грунтов может достигать 6–7 раз, что обеспечивает надежность оценки влияния водонасыщения на данные натуральных измерений.

Обязательное условие адекватности применения предлагаемых геофизических показателей – предварительная их отработка и уточнение в специально созданном на участке дамбы эталонным блоке грунта с проектными показателями уплотнения.

С использованием сейсмотомографической обработки, как показали результаты проводимых исследований, детальность сейсмических разрезов для грунтовых плотин существенно повышается (до 0.5–1.0 м), что вполне достаточно при решении инженерных задач. Получаемые в результате мониторинга детальные распределения скоростей продольных и поперечных упругих волн в вертикальных сейсмических разрезах в теле дамбы, дают информативный материал при анализе вариаций свойств и состояния грунтов плотин. При этом решаются следующие задачи:

■ детализация внутренней структуры тела дамбы и ее основания с выявлением структурных аномалий с учетом конструктивных особенностей, причем нарушенные зоны оснований

диагностируются локальными снижениями высотных отметок плотных грунтовых слоев плотин и образованием «воронок» (провалов) на томограммах скоростей сейсмических волн;

■ выявление и локализация разуплотненных зон в разрезах дамбы, в зонах аэрации, в береговых зонах примыкания, по границам с основаниями;

■ оценка физико-механических свойств грунтов (плотность, пористость) в натуральных условиях эксплуатации гидро-технических сооружений.

Томографическая обработка сейсмических данных выполняется с помощью пакета программ «Х-Томо» (разработка X-GeoLtd). Сами измерения выполняются с использованием многоканальных цифровых сейсмостанций.

Наиболее часто применяемый тип данных – относительные задержки сейсмической волны в обследуемой среде. Используя разработанные геофизические показатели, методика позволяет сопровождать мониторинг состояния грунтовых сооружений, локализовывать в них разуплотненные зоны. Прямая кинематическая задача – это задача трассировки лучей в заданной скоростной модели при заданной конфигурации источников и приемников волн. Базовый алгоритм трассировки XТомо основан на фундаментальных законах волнового движения – принципах Гюйгенса и Ферма.

Решение обратной задачи реализует томографическое обращение, т.е. оптимальный подбор скорости на решетке с фиксированной геометрией. Основное предположение сейсмической томографии состоит в том, что невязка времен, связанных с лучом, вызвана, в первую очередь, вариациями скорости, а во вторую – локальным изменением траектории луча. Методика контроля была реализована при строительстве защитной дамбы хвостохранилища «Олений ручей» ЗАО «СЗФК».

Вмещающие моренные грунты по объекту «Олений ручей» имеют следующие наименования: песок гравелистый; гравийный грунт; песок пылеватый. В данном случае, для определения допустимого интервала скоростей сейсмических продольных волн использованы результаты лабораторных определений физико-механических свойств грунтов. Последние были получены специалистами минералогической лаборатории «Кольского геологического информационно-лабораторного центра» по 17 пробам.

Очень важным моментом методики геотехнического контроля, как упоминалось выше, является установление граничных значений величин скоростей упругих сейсмических волн в грунтах отсыпки, а для контроля качества послойной укладки грунтов следует применять коэффициент (степень) уплотнения  $m$ . Согласно существующему проекту строительства, коэффициент уплотнения грунта в толще засыпки должен быть в пределах  $m = 0.95-1.0$ .

Первая задача состоит в корректном выборе величины  $\rho_{cmax}$ .

Как уже упоминалось, при определении максимальной достижимой плотности грунта  $\rho_{cmax}$  используется целый ряд способов. Уплотнение грунтов под действием работающего виброкатка происходит только в результате сближения частиц скелета. Под влиянием внешнего воздействия на контактах частиц возникают сжимающие и сдвигающие силы. При определенной интенсивности этого внешнего давления начинается перемещение отдельных частиц, и они укладываются плотнее. При этом объем пор уменьшается, а плотность грунта увеличивается. Для подобной технологии и типов грунтов целесообразно использование методики ВНИИГа (г. С-Петербург) [3], по которой максимальная плотность сухого разнородного грунта может рассчитываться из выражения:

$$\rho_{cmax} = \frac{\rho_0 \cdot \sqrt[5]{K_{60,10}}}{0.62 + \sqrt[5]{K_{60,10}}},$$

где  $\rho_0$  – плотность твердых частиц грунта (удельный вес), например, для кварцевого песка, составляющего основу используемой для засыпки морены,  $\rho_0 = 2.67 \text{ г/см}^3$ ;  $K_{60,10} = d_{60}/d_{10}$ , где  $d_{60}$  – диаметр частиц, меньше которого в данном грунте содержится 60% частиц;  $d_{10}$  – то же, для 10% частиц.

Определяется на основе оценки грансостава грунтов по результатам лабораторных определений. Для испытанных 17 проб грунта:  $K_{60,10} = \frac{(15.0 - 33.6)}{22.7}$ ;  $\rho_{cmax} = 1.95 \text{ г/см}^3$ .

Минимально допустимая плотность скелета:

$$\rho_{\text{сmin}} = \rho_{\text{сmax}} \cdot m = 1.95 \cdot 0.95 = 1.85 \text{ г/см}^3.$$

Допустимая минимальная пористость грунта составит:

$$n_{\text{min}} = (2.67 - 1.95) / 2.67 = 0.27$$

Если принять, что заполнитель порового пространства грунта отсыпки – мелкодисперсные фракции грунта с вариацией скоростей  $V_{p \text{ зап}} = 0.18\text{--}0.25$  км/с, теоретический допустимый диапазон изменения скоростей волн в грунте, исходя из заданной пористости грунта, определенной по известному выражению (4):  $n_{\text{max}} = (2.67 - 1.85) / 2.67 = 0.31$ , составит  $V_{p \text{ min}} = 0.6\text{--}0.8$  км/с.

Для построения скоростных разрезов использована регистрация времен первых вступлений преломленных сейсмических волн при продольном сейсмическом профилировании поверхности участка.

Сейсмоизмерения производились с использованием 24-канальной цифровой сейсмостанции «Elliss» (сертификат соответствия рег. № ССПП 01.1.1.–125). При проведении сейсмического профилирования установлены следующие параметры регистрации: окно частотного диапазона аппаратуры – до 500 гц, период дискретизации – 0.5 мс, длина записи – до 1.0 сек., шаг расстановки сейсмоприемников – 2.0 м, длина одной расстановки сейсмоприемников (24 шт.) – 46.0 м. Расчеты скоростных кинематических разрезов при моделировании и при обработке данных натуральных наблюдений выполнены с использованием программного томографического пакета «ХТомо». В качестве начальной скоростной модели среды выбрана трехслойная среда с параметрами скоростей, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики грунтовых слоев отсыпки дамбы, принятые для кинематической модели

Тип грунта по состоянию	Диапазон скоростей $V_s$ , км/с	Диапазон скоростей $V_p$ , км/с	Характеристика слоя грунта
1	0.15–0.30	0.2–0.50	Пески сухие, (зона аэрации)
2	0.15–0.30	0.60–0.9	Уплотненная морена
3	0.6–0.8	1.–1.8	Коренная морена

Приведенная дифференциация грунтов по состоянию в зависимости от величин скоростей продольной волны является эмпирической. Аналогичным образом выполнена дифференциация грунтов по степени их увлажнения, исходя из показателя  $V_s/V_p$  (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики грунтовых слоев отсыпки дамбы по показателю  $V_s/V_p$

Тип грунта по состоянию	Соотношение $V_s/V_p$	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Характеристика слоя грунта
I	0.26–0.35	0.42–0.45	сильно увлажненные грунты
II	0.36–0.44	0.35–0.40	грунты увлажненные, плотные
III	0.45–0.62	0.25–0.35	грунты плотные, естественной влажности $W=7\text{--}10\%$ ,

В качестве примера, на рис. 2а,б – результаты измерений и последующей сейсмотомографической обработки в виде вертикальных разрезов изменений скоростей продольной волны и соотношения  $V_s/V_p$  для одного их профилей для эталонного и контролируемого участков дамбы.

Цветовой палитрой выделены зоны различных интервалов скоростей продольных сейсмических волн. Как видно из томограмм, реальный диапазон скоростей близок ожидаемому и составляет 0.40–1.8 км/с. С ростом глубины от свободной поверхности к основанию коренной морены наблюдается рост величин скоростей, обусловленный ростом плотности грунтов дамбы за счет естественной гравитации, уплотнения и увлажнения. Более низкие значения скоростей характерны для верхней части разрезов в зоне аэрации. В то же время довольно отчетливо прослеживается характеристическое, наиболее частое значение скоростей, присущее верхней части всех



представленных разрезов. Это интервал скоростей  $V_p = 0.60\text{--}0.90$  км/с. Как показано выше, для данных грунтов этот интервал характеризует наибольшую реальную сжимаемость скелета грунта под воздействием внешнего уплотнения. Такое состояние грунтов свидетельствует о кондиционности их уплотнения. И наоборот, принимаем участки разрезов, характеризующиеся скоростями  $V_p < 0.60$  км/с, как некондиционные, недоуплотненные до проектных значений. Из приведенных томограмм видно, что подобные участки лишь фрагментарно фиксируются по профилю контрольного участка (желтая палитра рис. 2)

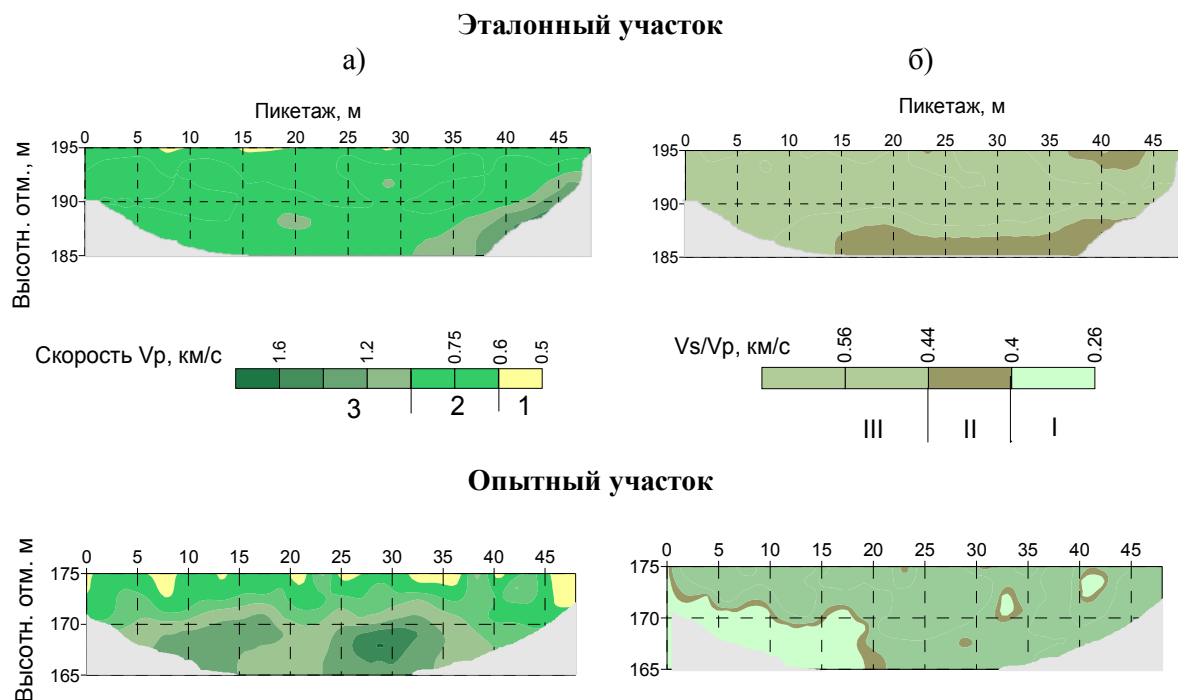
Сопоставляя полученные экспериментальные данные, данные корреляций по лабораторным исследованиям, а также аналитические оценки, интервал «разрешенных» значений скоростей продольных волн в моренных насыпных грунтах дамбы  $V_p = 0.60\text{--}0.90$  км/с можно считать обоснованным. Тогда, используя выражение для расчета плотностей грунтов естественной влажности из тарировочного графика лабораторных испытаний:

$$\rho = 2.10 \cdot V_p^{0.07},$$

а плотность скелета грунта, исходя из уровня средней естественной влажности  $W = 8\%$ :

$$\rho_c = (2.10 \cdot V_p^{0.07}) / 1.1 = 1.95 \cdot V_p^{0.07},$$

можно получить расчетный диапазон реальных плотностей скелета грунта, оцениваемый по величинам скоростей для всего скоростного разреза дамбы.



1 – грунты недостаточно уплотненные ( $\rho_c < 1.85$  г/см<sup>3</sup>);

2 – грунты удовлетворяют условию уплотнения (коэфф-т уплотнения  $m = (1.0\text{--}0.95)$ ;  $\rho_c = 1.85\text{--}1.95$  г/см<sup>3</sup>);

3 – грунты плотные, естественная морена основания с валунными включениями ( $\rho_c \geq 1.96\text{--}2.06$  г/см<sup>3</sup>)

I – сильно водонасыщенные грунты ( $\mu = 0.42\text{--}0.45$ );

II – грунты увлажненные, плотные ( $\mu = 0.35\text{--}0.40$ );

III – грунты плотные, естественной влажности  $W = 7\text{--}10\%$ , ( $\mu = 0.25\text{--}0.35$ );  $\mu$  – коэффициент Пуассона

*Рис. 2. Классификация грунтов верховой дамбы ГОКа «Олений ручей» по данным натурного геофизического обследования в эталонном и опытном блоках грунта по скоростям  $V_p$  (а) и  $V_s/V_p$  (б)*

Наряду с оценкой уплотнения по скоростям продольных волн, на рис. 2б представлены данные об изменении соотношений  $V_s/V_p$  в вертикальных разрезах дамбы. Согласно принятым критериям,

в основном своем большинстве грунты опытного участка дамбы характеризуются как плотные с естественной влажностью  $W=7-10\%$  (III категория рис. 2б). Из рисунка видно, что полученные экспериментальные данные на опытном эталонном участке дамбы позволяют классифицировать грунты засыпки по степени уплотнения и увлажненности на основе анализа изменения геофизических показателей сейсмических волн – скоростей продольных волн  $V_p$  и соотношений скоростей  $V_s/V_p$ , в соответствии с табл. 2.

В приповерхностной части дамбы контролируемого участка фиксируются участки скоростей по величинам, меньшим пороговых разрешенных значений (желтая палитра рис. 2). Они приурочены непосредственно к поверхности дамбы и не удовлетворяют требованиям достаточности уплотнения.

На пикетах 0–20 м профилей по показателям соотношения скоростей  $V_s/V_p$  фиксируются зоны намочения грунтов (светло-зеленая палитра рис. 2) в глубине толщи дамбы на отметке 170 м. В то же время глубинных разуплотнений в теле дамбы не установлено.

Таким образом, проведенный инструментальный сейсмотомографический мониторинг уплотнения грунтовой низовой дамбы ГОКа «Олений ручей», выполненный на различных высотных отметках гребня в процессе отсыпки дамбы, показал, в основном, полное соответствие показателей уплотнения грунтов проектным значениям. Диапазон допустимых плотностей скелета отсыпаемого грунта в приповерхностной толще составляет  $1.85-1.95 \text{ г/см}^3$ , обеспечивая диапазон коэффициентов уплотнения  $m=0.95-1.0$ . Методика сейсмической пространственно-временной томографии (СПВТ) внедрена в технологический регламент строительства дамбы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов Н.Н.* Использование методов сейсморазведки при оценке качества уплотнения насыпных грунтов// Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 109–112. 2. СНиП 3.02.01-87 – Земляные сооружения, основания, фундаменты. Госстрой РФ. 3. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве, РД34 15.073-91. Л.: ВНИИГ, 1991. 4. Рекомендации для проектирования и строительства каменноземляных и каменнонабросных плотин с применением способов упрочнения, П 15-74. Л.: ВНИИГ, 1975. 5. *Савич А.И., Яценко З.Г.* Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 213с.

#### Сведения об авторах

*Абрамов Николай Николаевич* – к.т.н., старший научный сотрудник; e-mail: [abramov@goi.kolasc.net.ru](mailto:abramov@goi.kolasc.net.ru)

*Епимахов Юрий Александрович* – д.т.н., зав. лабораторией; e-mail: [root@goi.kolasc.net.ru](mailto:root@goi.kolasc.net.ru)

*Кабеев Евгений Владимирович* – ведущий технолог; e-mail: [root@goi.kolasc.net.ru](mailto:root@goi.kolasc.net.ru)

## РАЗВИТИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

**Е.П. Башмакова, В.С. Селин**

Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина КНЦ РАН

### Аннотация

Рассматриваются пространственные аспекты развития экономики Российского Севера и Арктики и роль в них нефтегазового комплекса. Проведен анализ сильных и слабых сторон, угроз и возможностей положительной динамики отрасли. Обоснованы основные технико-технологические и организационные возможности добычи углеводородов на Арктическом шельфе.

### Ключевые слова:

*экономика, Север, Арктика, пространство, нефть, газ, углеводороды, комплекс, кластер, модернизация, инновации.*



Для России значение научного направления «пространственная экономика» очень велико. Огромная территория на Евразийском континенте, окаймляемая морями трех океанов, и разнообразие природных, демографических, этнокультурных, экономических, политических и других условий в различных частях страны определяют многие непреходящие особенности истории, современности и будущего России. Поэтому любая полноценная стратегия социально-экономического развития

России должна включать в себя важнейшие пространственные аспекты и отражать их во всех направлениях государственной политики.

Стратегии «точечной экономики» для России совершенно неприемлемы. Экономика России – пространственно неоднородный организм, функционирующий на основе вертикальных (центр – регионы) и горизонтальных (межрегиональных) экономических, социальных и политических взаимодействий и входящий в систему мирохозяйственных связей. В рамках этой пространственной парадигмы ключевыми проблемами государственной социально-экономической политики являются разумное сочетание регионального многообразия, сохранения целостности национального пространства и его интеграции в глобализирующийся мир. Функционирование и развитие национальной экономики как пространственной системы поддерживается федеративным государственным устройством, политическими, правовыми и экономическими институтами федерализма [1].

Экономическое пространство Российской Арктики имеет достаточно противоречивые характеристики. В целом это макрорегион пионерного освоения, слабозаселенный (плотность населения – 0,3 чел/км<sup>2</sup> при среднем показателе по стране 8,5), с очаговым распределением производственных узлов и центров. С другой стороны, при численности населения около 1% от населения Российской Федерации здесь производится более 4% ВВП страны. Ресурсно-сырьевые запасы Арктической зоны РФ составляют по стоимостным оценкам не менее 20% суммарных запасов страны, а с учетом Арктического шельфа – более 30%.

Эта «двойственность» экономического пространства нашла отражение в Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности, где предполагается достижение стратегических национальных приоритетов на основе устойчивого социально-экономического развития. В экономическом блоке предусматривается развитие ресурсной базы и совершенствование ее использования на основе перспективной техники и технологий, инновационной динамики инфраструктуры арктической транспортной системы и информационно-телекоммуникационного комплекса.

Что касается нефтегазовой отрасли, то ее модернизация в Стратегии предусматривается по целому ряду направлений:

а) формирование проектов организации комплексного изучения континентального шельфа и прибрежных территорий, подготовка запасов углеводородного сырья к их освоению на основе государственной программы разведки континентального шельфа и освоения его минеральных ресурсов, которая обеспечит существенный прирост балансовых запасов полезных ископаемых арктических морских месторождений;

б) реализация крупных инфраструктурных проектов, предусматривающих интеграцию Арктической зоны Российской Федерации с освоенными районами России; освоение Тимано-Печорской нефтегазовой провинции и месторождений углеводородов на континентальном шельфе Баренцева, Печорского и Карского морей, полуостровов Ямал и Гыдан;

в) объединение ресурсов и возможностей государства, бизнеса, науки и образования для формирования конкурентоспособного научно-технологического сектора в области разработки и внедрения передовых технологий, включая разработку новых или адаптацию существующих к арктическим условиям на базе профильных технологических платформ;

г) разработка и внедрение новых видов техники и технологий в области рационального природопользования, освоения морских месторождений полезных ископаемых и водных биологических ресурсов, а также предотвращения и ликвидации аварийных разливов нефти в ледовых условиях.

Нефтегазовый комплекс играет различную, но неизменно очень большую роль в социально-экономическом развитии арктических регионов Российской Федерации. В Ненецком и Ямало-Ненецком автономных (ЯНАО) округах он обеспечивает производство доминирующей доли валового регионального продукта. В целом по Арктической зоне комплекс производит 60% промышленной продукции: более 50 млн тонн нефти и около 500 млрд м<sup>3</sup> газа. В «мазутозависимой» Мурманской области и Чукотском автономном округе энергетика выступает серьезным удорожающим, а значит, и сдерживающим фактором развития. Хотя в перспективе ситуация и в них может существенно измениться, в том числе по мере освоения ресурсов Арктического шельфа.

Развитие нефтегазового комплекса, учитывая его высокую экспортную ориентацию, в значительной мере будет зависеть от состояния мировых энергетических рынков, проводимой развитыми и развивающимися странами политики энергосбережения. Так, в 2010–2012 гг. серьезный «удар» по российской газовой отрасли (а заодно и по угольной) нанесла так называемая «сланцевая» революция в США. Масштабные работы в этом направлении проводит и Китай, так что емкость этого наиболее потенциально привлекательного рынка пока не очень «просчитывается». Что касается Европейского рынка, куда поступает более 80% нашего экспорта нефти и газа, то европейские страны планируют к 2030 г. на 30–40% сократить удельное энергопотребление [2].

Если говорить об инновационной сфере, то основные проблемы обеспечения комплекса отечественным оборудованием связаны с недостаточно высокой его конкурентоспособностью по техническим параметрам и слабой информированностью производителей о потребностях в оборудовании. Так как у российских производителей нет единой технической нормативной базы, тормозится инновационное развитие. Отсутствие кооперации и взаимной заинтересованности у производителей и потребителей приводит к изготовлению российскими заводами устаревшего оборудования, не соответствующего современным технологиям нефтегазовой отрасли и международным техническим требованиям. Очевидно, что эта проблема вряд ли может быть решена без жесткого программно-целевого вмешательства государства.

Береговая транспортно-технологическая инфраструктура Арктики развита недостаточно, в том числе: специализированные порты, перегрузочные терминалы, эстакады для слива-налива добываемых углеводородов, береговые базы, мощности судоремонта для нужд арктического танкерного и вспомогательного флота, специализированное гидрометеорологическое и навигационно-гидрографическое обеспечение, системы связи в аварийно-спасательных операциях. Большие инвестиции потребуются также для развития социальной инфраструктуры и жилого фонда.

Если попытаться провести краткий анализ перспектив освоения Арктического шельфа, то можно выявить следующие проблемы и возможности (табл. 1).

## SWOT-анализ перспектив развития нефтегазового комплекса

<b>Сильные стороны</b>	<b>Возможности</b>
1. Стратегические ресурсы углеводородов, наличие уникальных и крупных месторождений 2. Возможности наращивания ресурсного потенциала 3. Благоприятное географическое положение и транспортные возможности, особенно в Западной Арктике	1. Перспективное увеличение спроса на мировых рынках 2. Обеспечение развития экономического пространства Арктики 3. Положительное влияние глобального потепления на условия добычи и транспортировки 4. Модернизация национальной промышленности, включая химические, машиностроительные, нефтегазовые комплексы, судостроение и развитие других сопутствующих отраслей
<b>Слабые стороны</b>	<b>Угрозы</b>
1. Отсутствие апробированных технологий разработки месторождений 2. Недостаточные возможности специализированного и вспомогательного флота 3. Слабое развитие береговой инфраструктуры и систем обеспечения грузопотоков 4. Высокие капитальные затраты и низкая окупаемость 5. Недостаточное развитие и конкурентоспособность отечественного машиностроения	1. Высокие колебания спроса и ужесточение конкуренции на мировых рынках 2. Суровые природно-климатические условия Нарушения береговой инфраструктуры в условиях глобального потепления 3. Недостаточность отечественных и зарубежных инвестиций 4. Неясность схем (в т.ч. соглашений о разделе продукции) участия зарубежного капитала в проектах освоения морских месторождений

Основой государственной стратегии арктического нефтегазового комплекса должна стать, как уже говорилось выше, инновационная составляющая, вследствие чего законодательная поддержка инновационного развития и стимулирования приобретает особое значение. Необходимо создать экономические условия для большей ориентации топливно-энергетического комплекса на внутренний рынок. Одной из важнейших мер в этом направлении должна стать разработка проекта ускоренного развития химии углеводородов с созданием необходимых стимулов. И, конечно, стратегической задачей является повышение конкурентоспособности всего отечественного машиностроения, включая нефтегазовое.

Освоение топливно-энергетического потенциала Арктического шельфа России способно сыграть серьезную стабилизирующую роль в динамике добычи нефти и, особенно, газа, нивелируя или смягчая возможный спад уровней добычи из-за истощения континентальных месторождений, который прогнозируется рядом экспертов на период до 2030 г. Основными направлениями, по которым будет происходить модернизация нефтегазового комплекса, можно считать [3]:

- дальнейшее совершенствование правил недропользования с применением таких рычагов, как лицензии; инновационная, тарифная и налоговая политики;
- стимулирование процесса прироста запасов углеводородов посредством налоговых преференций, изменения принципов получения лицензий на изучение и освоение недр;
- повышение интересов субъектов Российской Федерации к изучению и освоению недр территорий на принципах «второго ключа», в том числе в механизме соглашений о разделе продукции;
- координация усилий центра и регионов, обеспечение их лучшего взаимодействия с ресурсными корпорациями, совершенствование системы управления деятельностью компаний нефтегазового сектора;
- перевод государственного регулирования (включая законодательное) в русло создания эффективной системы модернизации нефтегазового комплекса и обслуживающих его отраслей, в первую очередь машиностроения.

Что касается перспектив развития экономического пространства российских Севера и Арктики на основе модернизации нефтегазового комплекса, то ниже, учитывая ограниченность в возможностях

изложения материала, основное внимание будет уделено только технико-технологическим и организационным аспектам модернизации.

Несмотря на низкий уровень инновационной активности компаний, разрабатывающих месторождения углеводородного сырья, динамика ее изменения все же внушает определенный оптимизм. Достаточно быстро растет количество заключенных соглашений, как по экспорту, так и по импорту технологий с зарубежными странами, еще быстрее увеличивается стоимость самого предмета соглашений. На мировом рынке технологий укрепляются позиции отечественных производителей: получение средств от экспорта технологий растет гораздо более высокими темпами, чем платежи за импортированные технологии. Переоценивать эти достижения, однако, не следует. Стартовая база в получении средств от продажи технологий в нефтегазодобывающей промышленности была настолько ничтожной относительно масштаба отрасли, что результаты говорят скорее не о достижениях в использовании потенциала отрасли, а о том, как слабо он использовался.

Крупные компании – лидеры российского сырьевого сектора – сравнительно недавно приступили к формированию инновационных стратегий, лишь единицы из них при этом позиционируются как стратегические новаторы. Из всего спектра сырьевых отраслей Севера только металлургия – наиболее продвинутой в технологическом смысле отрасль, которая характеризуется высоким уровнем передела первичного сырья, наличием нескольких компаний, активно ведущих научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР). Результатом этого стали: позитивная динамика технологической структуры, стабильно высокая инвестиционная активность, рост глобальной конкурентоспособности.

Таблица 2

Основные нефтегазовые компании России [5]

Компания	Выручка в 2011 г., млрд долл.	Чистая прибыль в 2011 г., млрд долл.	Доказанные запасы (нефтяной эквивалент), млн т	Добыча углеводородов в 2010 г., млн т
«ЛУКОЙЛ»	123.1	12.82	2760	100.3
«Роснефть»	83.4	12.88	2432	114.0
ТНК-ВР	54.2	9.05	1536	86.6
«Газпром-нефть»	44.0	5.05	992	50.2
«Сургутнефтегаз»	43.2	8.39	н.д.	63.8
«Татнефть»	20.9	2.33	954	23.3
«Башнефть»	17.0	2.0	336	12.8

Таблица 3

Дополнительная добыча нефти компанией ОАО «ЛУКОЙЛ», полученная в результате применения методов нефтеотдачи пластов, млн тонн

2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
22.07	24.19	23.75	22.95	23.04	22.0

Однако в последние 5 лет корпорации нефтегазового сектора быстро прогрессируют в инновационной сфере. Лидером здесь является ОАО «ЛУКОЙЛ», создавшее крупный исследовательский центр\*, в том числе занимающийся проблемой повышения отдачи пластов. Если говорить о сегодняшних проблемах, то компания активизирует геологоразведочные работы на новых участках в России, где удалось получить лицензии, в частности, в Ненецком автономном округе.

\*В состав научно-проектного комплекса группы «ЛУКОЙЛ» входят 2 головных института бизнес-сегментов («Геологоразведка и добыча» и «Переработка и сбыт»), включающие 7 филиалов в регионах деятельности компании. В организациях комплекса работают около 4 тыс. сотрудников. Расходы на НИОКР компании выросли с 1708 млн руб. в 2007 г. до 5116 млн руб. в 2011 г.

«ЛУКОЙЛ» имеет самые высокие доказанные запасы нефти среди всех российских компаний (табл. 2). Внедрение современных методов повышения отдачи пластов и увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН) – вторая часть добычной стратегии, характерная в последние годы для российских месторождений «ЛУКОЙЛа». Средний КИН по всем месторождениям России падает еще с 1960-х гг., и это означает, что до последнего времени нефть в стране добывалась нерационально. На объектах компании КИН составляет 0.28, и это соответствует среднероссийскому уровню. Однако уже в самых ближайших планах поставлена задача его увеличения до 0.32 [4].

Специалисты компании считают, что теоретически КИН можно увеличить до 0.5 и даже до 0.6, именно такие показатели достигнуты на месторождениях Волгоградской и Калининградской областей. В табл.3 представлены дополнительные объемы нефти, полученные «ЛУКОЙЛ» за счет повышения нефтеотдачи пластов [6].

Объективно необходимо развитие прикладной науки нефтегазового комплекса для отработки месторождений Арктического шельфа, как неотъемлемого звена в цепочке воспроизводства инноваций, которая предусматривала бы комплексный подход к формированию и поддержке приоритетов ресурсно-инновационной стратегии. При этом определенные задачи прикладной науки должны решаться сегодня с помощью науки фундаментальной, поскольку происходит постоянное усложнение решаемых задач. Обоснование и подготовка инновационных проектов для освоения шельфовых месторождений углеводородного сырья является сложным и длительным процессом, по существу, пакетом комплексных исследований. В рамках данного аналитического обзора рассмотрены только основные проблемы и возможные решения по месторождениям, планируемым к освоению в ближайшей перспективе.

Для изучения геологического строения акваторий весьма широко применяются геофизические, главным образом, сейсмические методы исследований. Геофизические суда обладают достаточно хорошей мореходностью и значительной автономностью плавания, что позволяет им большой период времени работать на профиле практически круглосуточно. Кроме того, они «вооружены» современными геофизическими комплексами, обеспечивающими проведение всех модификаций сейсмических методов, включая 3D, а также контроль и предварительную обработку материалов в море.

Благодаря высокой производительности и хорошей технической оснащенности геофизических судов, морские геофизические исследования обеспечивают значительно более высокое качество и информативность материалов при затратах в несколько раз ниже, чем при проведении работ на суше. Так, если стоимость 1 км профиля 2D на Баренцевом море стоит 300–500 долл., то на прилегающей суше, где требуется прокладка просеки, бурение скважин, эта стоимость доходит до нескольких тыс. долл.

Относительно невысокая стоимость морских геофизических работ и их повышенная информативность позволяют значительно увеличить область применения геофизических методов, используя их для построения и уточнения трехмерной модели месторождения после бурения первых поисковых скважин, а также обеспечить тем самым условия для существенного уменьшения числа морских поисково-разведочных скважин (стоимость каждой из них в настоящее время может превышать 50 млн долл.).

Многолетние исследования ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – ГазпромВНИИГАЗ» показали, что весьма большое значение для освоения морских месторождений нефти и газа имеют вопросы их комплексного освоения:

■ во-первых, это создание единого добывающего комплекса для разработки месторождений. Такой подход позволяет разрабатывать небольшие месторождения в качестве сателлитов более крупных месторождений. При этом для месторождений-сателлитов весьма актуально применение облегченных дешевых платформ с минимальным технологическим обустройством, необходимым для подачи продукции на головные технологические объекты. Возможно здесь и применение подводных добычных комплексов [7];

■ во-вторых, комплексное освоение месторождений суши и моря. В экстремальных природно-климатических условиях экономически эффективное освоение уникальных по запасам морских месторождений возможно только при наличии адекватной уже существующей береговой инфраструктуры. Оптимальным представляется сдвиг начала освоения морских месторождений,

необходимо ориентироваться на период снижения добычи на месторождениях суши, что позволит использовать высвобождающиеся мощности береговой инфраструктуры.

Немаловажным инновационным фактором для оптимизации затрат при освоении группы месторождений является возможность использования средств, генерируемых ранее введенными месторождениями, для обустройства и разработки последующих объектов. Проведенные ВНИИГАЗом расчеты показывают, что при последовательной разработке группы морских месторождений, насчитывающей порядка семи объектов, объем привлекаемых инвестиций может составлять до 30% от необходимого объема капитальных вложений.

В мировой практике разработки морских месторождений широкое применение находят горизонтальные скважины, возможности проходки которых постоянно возрастают. В настоящее время уже обеспечивается отход горизонтального ствола скважин на расстояние до 12 км; допустима проходка нескольких горизонтальных стволов из одного вертикального. Каждая из таких скважин может заменить несколько вертикальных или наклонных скважин. При этом, наряду с сокращением непосредственных затрат на строительство скважин, уменьшаются и затраты на сооружение гидротехнических сооружений, поскольку их размеры в определенной мере зависят от числа располагаемых устьев скважин.

Одним из наиболее активно развивающихся направлений по оптимизации затрат на обустройство морских месторождений в настоящее время стало применение подводных систем разработки. Это направление традиционно было ориентировано на освоение, главным образом, глубоководных месторождений. Одним из наиболее ярких примеров здесь может служить обустройство норвежского газового месторождения Ormen Lange на глубинах моря порядка 1 тыс. м. Применение подводных добычных комплексов позволяет на начальной стадии избежать строительства стационарных или плавучих гидротехнических сооружений [8].

Этот компонент обустройства отодвигается по времени на ту стадию эксплуатации газовых месторождений, когда возникают проблемы с поддержанием давления в трубопроводах, и для их решения требуется установка компрессорных станций – подводных или на технологических платформах. В последнем случае добычные комплексы превращаются в смешанные, сохраняя при этом достаточно высокую эффективность, благодаря экономии средств на начальной, самой дорогой с позиций учета фактора времени, стадии освоения месторождения. Эта экономия по крупному глубоководному месторождению может составлять более 1 млрд долл.

Новым направлением в области применения подводных технологий добычи может стать освоение прибрежных месторождений газа, расположенных на относительно небольших глубинах в условиях замерзающих акваторий. Применение в таких условиях подводных добычных комплексов позволяет, во-первых, значительно (до двух раз) сократить капитальные вложения на строительство гидротехнических сооружений, стоимость которых измеряется сотнями миллионов долларов, во-вторых, расширить площадь дренирования залежей эксплуатационными скважинами. В результате этого значительно увеличивается темп отбора запасов и, соответственно, повышается эффективность разработки месторождений. Кроме того, близкое расположение мелководных месторождений к берегу позволяет сооружать компрессорные станции на берегу, ограничившись только необходимой отсыпкой грунта.

Для глубоководных газовых месторождений, находящихся на больших расстояниях от побережья и локализованных в акваториях, временно или постоянно покрытых льдом, подводные добычные устройства имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными платформенными комплексами. У норвежских компаний есть значительный опыт по подводному закачиванию. Еще в 1986 г. в Северном море метод испытан на трех скважинах с обустройством закачки на глубине 135 м. При этом удалось сократить затраты на разработку месторождения на 70%. Последующие работы «Statoil» на норвежском континентальном шельфе сделали компанию крупнейшим оператором морских проектов в мире и вторым по величине оператором с подводным закачиванием продукта. Именно этот опыт активно применялся «Газпромом» при разработке проекта освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения [8].

Технология подводного закачивания имеет очевидные преимущества по сравнению с традиционным «сухим» закачиванием, когда устье скважин находится на платформе или на берегу. В случае подводного закачивания бурение ведется с плавучего сооружения (платформы или судна) через подводный модуль, заранее спущенный на дно в районе предполагаемого



бурения. Модуль снабжен определенным количеством отверстий (обычно 4 или 6), через которые и осуществляется бурение.

На модулях монтируется устьевое оборудование для каждого отверстия. К примеру, если для вывода Штокмановского проекта на полную мощность потребуется 24 скважины, то может быть установлено 4 модуля с 6-ю отверстиями или 6 модулей с 4-мя отверстиями в зависимости от конфигурации площади обработки. Подводное закачивание особенно выгодно тогда, когда установка платформ невозможна или крайне нежелательна (большие глубины, сложная ледовая обстановка, крупные биологические ресурсы в водной толще и т.п.). Как правило, в подводном варианте скважины непосредственно присоединяются к трубопроводу, осуществляющему транспорт продукта.

Если же транспорт многофазной продукции на берег технически и технологически осуществим, то вся продукция скважин без какой-либо предварительной подготовки подается на берег через трубопровод, соединяющий скважину с береговыми сооружениями по подготовке и переработке. Многофазный транспорт в усеченном виде может представлять собой транспорт газоконденсатной смеси без примеси воды (которая либо еще не содержится в добываемой продукции, либо отделена в системе первоначальной подготовки на платформе или на судне). Такую продукцию называют двухфазной (нефть-газ или газ-конденсат) в отличие от трехфазной, где присутствует еще и вода.

Выбор системы транспортировки во многих случаях является определяющим при принятии решения о способах обустройства глубоководных промыслов. Сложность и многофакторность выбора хорошо иллюстрируется многолетней историей подготовки к освоению Штокмановского газоконденсатного месторождения.

Компания «Statoil» представила 5 вариантов технических решений для обустройства месторождения. Первый из них представляет полностью подводное освоение. По второму варианту над месторождением помещается судно, которое выполняет поддерживающую функцию. В третьем решении у судна больше функций: на нем расположена вся техника, сюда поступает продукция из скважины и проходит отделение конденсата и подготовка газа к транспортировке по трубопроводу. Два последних варианта предполагают строительство платформы для освоения Штокмановского месторождения: либо расположение ее между месторождением и берегом на глубине не более 50 м, либо установка плавающей платформы непосредственно над месторождением и осуществление на ней полного процесса подготовки газа (этот вариант близок к третьему, но с более полным циклом подготовки и производством электроэнергии). Можно отметить, что во всех решениях производство сжиженного природного газа (СПГ) предлагается осуществлять только на берегу [9].

Из предложенных пяти вариантов эксперты NorskHydro считают предпочтительной технологию подводного освоения потому, что в этом случае появляется выбор: поставлять потребителям сжиженный или сетевой газ. Так, по расчетам норвежских специалистов, на второй и более поздних стадиях проекта возникает возможность альтернативных рынков: уже к 2015 г. на европейском рынке может появиться потенциальная ниша для штокмановского газа. Более того, трубный газ для Европы на второй стадии проекта будет даже более вероятен, чем СПГ. Использовать для его транспортировки можно будет высвобождающиеся мощности трубопроводных систем в Северном море [8].

В российской и мировой практике пока нет опыта освоения месторождений углеводородов в акваториях с постоянным или временным ледовым покровом. Поэтому Приразломное месторождение в Печорском море является, по существу, полигоном, где отрабатываются инновационные технологии добычи нефти в таких условиях с использованием ледостойкой платформы для ледовых покровов до 2 м. Аналогичные платформы, разрабатываемые для Охотского и Балтийского морей («Орлан», «Моликпак» и др.), рассчитаны на гораздо меньшую толщину (менее 1 м) и давление льда.

При реализации проекта Приразломного нефтяного месторождения компания «Роснефть» сделала ставку на использование научного потенциала и технологических мощностей передовых российских предприятий – флагманов отечественного судостроения и морской техники, таких как ФГУП «ПО «Севмашпредприятие» и МП «Звездочка» в Архангельской области, ЦКБ морской техники «Рубин», ЦНИИ им. А.Н.Крылова, ЦНИИ КМ «Прометей» в Санкт-Петербурге, ОАО «Выборгский судостроительный завод». В ряде случаев из-за отсутствия опыта проектирования и изготовления оборудования для условий Арктического шельфа российские компании активно сотрудничали с зарубежными партнерами. В результате, более 40 компаний из 15 стран привлечены к поставкам оборудования для морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП)

«Приразломная». Наиболее широкое сотрудничество налажено с компаниями Норвегии, Великобритании, Италии, США, Германии, Голландии и Швеции [10].

Основной элемент обустройства Приразломного месторождения – стальная гравитационная ледостойкая платформа, общий объем капитальных вложений в проектирование и строительство которой составляет около 1 млрд долл. США. Создание морских ледостойких платформ представляет собой новую не только для российской, но и для мировой науки и промышленности организационно-техническую проблему, затрагивающую комплекс взаимосвязанных задач. Выполнение проектных работ потребовало развития прикладных исследований в области гидрометеорологии, инженерной геологии, ледотехники, физики конструкционных материалов. Была проведена оптимизация элементов конструкций, демпфирующих возможные колебания платформы, выбрана схема сборки и транспортировки платформы на месторождение по мелководным акваториям северных морей России. Выбор рациональных конструкционных решений в различных районах корпуса платформы позволил адаптировать их к изготовлению на российских судостроительных предприятиях.

Платформа обладает собственной плавучестью и доставляется на месторождение с установленным производственным комплексом. В эксплуатационном режиме она опирается на дно моря без дополнительного крепления. Устойчивость ее на грунте обеспечивается за счет собственного веса, водяного и бетонного балласта. Установка МЛСП на дно моря будет обеспечена с точностью отклонения от вертикали  $\pm 5^\circ$  в любом направлении. На платформе будут размещены емкости для хранения подготовленной к транспортировке нефти в объеме, соответствующем 5–6-суточной производительности в период максимального уровня добычи.

Проект освоения Приразломного месторождения является пилотным для российских и мировых компаний на Арктическом шельфе в тяжелых ледовых условиях. Поэтому «Роснефть» уделяет особое внимание вопросам безопасности, надежности оборудования и применяемых материалов, качеству производимых работ. Принцип нулевого сброса – один из основных принципов, заложенных в проект. Существующие инновационные технологии позволяют реализовать этот принцип даже в суровых арктических условиях. В частности, все продукты бурения будут полностью утилизированы путем закачки в специальную поглощающую скважину [10].

Что касается организационных вопросов развития экономического пространства Арктики на основе модернизации нефтегазового комплекса, то они должны базироваться на кластерных стратегиях. Кластерная политика региональной власти должна быть органично встроена в контекст инновационной трансформации регионов, что означает увеличение экономической роли сектора услуг, возрастание мобильности, гибкости и интеллектуальности основных производственных процессов в добыче ресурсов и их переработке. Она ориентирована на обеспечение постепенной трансформации прежнего индустриального комплекса, который был создан во многих регионах Российской Арктики в период советского освоения, в наукоемкий конкурентоспособный постиндустриальный кластер. Это сложная системная задача, требующая взаимной адаптации и модернизируемых комплексов, и всей инфраструктуры северной территории их дислокации.

Преимущество кластерного подхода состоит в том, что он позволяет комплексно, системным образом рассматривать ситуацию в группе взаимосвязанных предприятий, относящихся к разным отраслям. Кроме того, кластерный подход дает возможность использовать в качестве основы стратегии развития кластера инициативы, выдвинутые и реализуемые лидерами бизнеса, которые, таким образом, гарантируют успешную реализацию.

Достижение успеха при развитии кластеров – это совместная задача бизнеса и органов власти соответствующего уровня (федеральной, региональной и муниципальной – в зависимости от масштаба кластера и существующих задач по его развитию); только взаимопонимание и готовность к сотрудничеству между ними гарантируют положительные результаты. Важнейшим элементом кластерного принципа является установление постоянного диалога всех участников процесса – малых и крупных предприятий, соответствующих властных структур, сервисных и научно-исследовательских организаций, системы профессионально-технического образования, СМИ и др.

Подход к региональному развитию, основанный на кластерах, уже начинает входить в практику России. Первое направление – формирование высокоэффективных индустриальных кластеров с помощью крупных целевых инвестиций, реализующих принцип инвестиционного лидера, то есть крупной конкурентоспособной компании. Другой путь – придание основным экономическим

регионам, городам или агломератам статуса особых зон, где иностранным инвесторам предоставят особые льготы, если они будут развивать специфические промышленные кластеры. Прямые иностранные инвестиции могут способствовать созданию конкуренции между местными и иностранными фирмами, между отечественными и иностранными инвесторами, что обеспечит промышленную модернизацию, благодаря новым идеям, профессионализму, разнообразию стратегий и поддержке НИОКР.

Кроме совместимости с сетевой организацией и формированием необходимых институтов, концепция кластеров хорошо подходит для осуществления относительно более широких по охвату стратегий экономического роста. При этом главная ее особенность – это сочетание микро-, мезо- и макроэкономических аспектов. На микро- и мезоуровнях кластерные инициативы могут быть частью стратегий, стимулирующих региональные процессы, с незначительным прямым вмешательством государственного сектора. На макроуровне кластерные стратегии служат средством достижения целей промышленной политики, воздействуя на структурные изменения, повышение конкурентоспособности, усиление инновационной направленности, могут быть составным элементом федеральных «подходов», в рамках которых государственный сектор выбирает в качестве активного инструмента развития определенные доминирующие отрасли экономики.

Кластеризацию в большей степени связывают с развитием инноваций и технологий, и в гораздо меньшей степени – с сырьевыми направлениями. Однако в современной ситуации сама разведка, добыча и переработка сырья становятся все более наукоемкими и высокотехнологичными, что обусловлено, с одной стороны, более высокими требованиями к экологическим параметрам этих процессов, а с другой стороны, все более сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями разведки и разработки месторождений. Особенно это относится к морским и шельфовым месторождениям углеводородного сырья, эксплуатация которых в условиях Арктики требует новых наукоемких технологий и в процессе добычи, и в процессе переработки и транспортировки. Это окажется под силу только мощному альянсу российских и международных научных и технических сил. Таким образом, сама сырьевая ориентация экономики Севера и Арктики может стать мощным стимулом формирования не только промышленных кластеров, связанных с сырьевой северной и арктической специализацией, но и высокотехнологичных инновационных кластеров. Представляется, что технологическую и инновационную модернизацию экономики России можно начинать и с сырьевых отраслей, тем более что создание кластеров на этой основе не противоречит ни кластерной теории, ни мировому опыту государственной политики на соответствующих территориях, накопленному как северными странами – Норвегией, Канадой, Финляндией, Данией, так и южной страной – Австралией.

Несмотря на то что полноценных кластеров в регионах Севера Российской Федерации до настоящего времени не создано, можно говорить о высоком потенциале формирующихся в ряде секторов экономики кластерных инициатив, эффективное развитие которых будет определять появление новых производств и услуг, способных конкурировать с ведущими мировыми игроками.

Значительный потенциал для формирования кластеров имеют наиболее развитые (старопромышленные) регионы, такие как Мурманская, Архангельская области, Республика Коми, а также некоторые районы Восточной Сибири: Республика Саха (Якутия), значительная часть Красноярского края и др. В этих областях сосредоточен промышленный научно-технический, образовательный потенциалы и проживает значительная часть всего населения Севера.

Лидерами в формировании новых подходов к экономическому развитию выступают субъекты Федерации, связанные с добычей углеводородного сырья. К ним относятся Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа, которые располагают уникальными ресурсами нефтегазовой промышленности и присутствием крупных российских и зарубежных транснациональных компаний, вкладывающих средства в освоение углеводородных и минеральных ресурсов, в развитие транспортных магистралей, технологическое перевооружение и модернизацию экономики территорий своей деятельности.

Нефтегазовые кластеры северного и арктического макрорегиона пока формируются в виде отдельных опорных узлов и центров. Однако в дальнейшем возможна их кооперация и интеграция в той или иной форме, с созданием межрегиональных и национальных (возможно и транснациональных) мегакластеров. Необходимость повышения конкурентоспособности углеводородного сырья месторождений арктического шельфа является важной национальной задачей. Для этого в Западной

Арктике имеются все необходимые условия: наличие устойчивого спроса на нефть и СПГ, конкуренция среди производителей внутри отрасли на национальном и международном уровнях, предприятия родственных и поддерживающих отраслей. Кластеры могут оказать стимулирующее воздействие на предприятия машиностроения, металлообработки, оборонно-промышленный, судостроительный и транспортный комплексы, то есть стать локомотивом развития высокотехнологичных отраслей в российской экономике в целом. Это должно обеспечиваться направлением в высокотехнологичные отрасли части финансовых потоков, создаваемых в топливно-энергетическом комплексе и сырьевых отраслях, обеспечивая мультипликативный эффект.

*Старопромышленные регионы.* На территории Мурманской области существуют необходимые предпосылки для создания нефтегазового кластера [11]. Кластер обеспечен научным сопровождением и может существенно воздействовать на рынок труда и подготовку высококвалифицированных кадров. По существу, образование кластера связано только с началом масштабного освоения углеводородного сырья Западной Арктики, при этом не исключено появление на полуострове сопутствующих микрокластеров на базе различных аспектов промышленного освоения нефтегазовых месторождений.

Серьезных технологических решений потребуют сам отбор и транспортировка газа со Штокмановского месторождения\*, что создает предпосылки для формирования крупных инновационных центров. Освоение Штокмановского газоконденсатного и нефтяного Приразломного месторождений создают реальные условия для формирования конкурентоспособного и перспективного нефтегазового кластера, который может перерасти в мегакластер.

Создание в Мурманской области некоммерческой организации «Ассоциация поставщиков нефтегазовой промышленности «Мурманшельф»», учредителями которой являются: Министерство промышленности, транспорта и энергетики Мурманской области, Союз промышленников и предпринимателей, Северная торгово-промышленная палата, а кроме того, вхождение в состав организации более 200 предприятий промышленности, строительства, транспорта, сервисных, логистических, финансовых и образовательных учреждений можно рассматривать как начальную фазу формирования промышленного кластера в соответствии с общепринятой методикой. Ассоциация «Мурманшельф» уже в значительной степени выполняет функции координационного центра и проводит активную политику подготовки предприятий-поставщиков и трудовых ресурсов к работе по обеспечению нефтегазовой отрасли. Членами Ассоциации являются также зарубежные компании, в ее работе участвует норвежская ассоциация поставщиков «Петра Арктик», то есть присутствуют и трансграничные взаимодействия.

Эксплуатация топливно-энергетических ресурсов шельфа Баренцева моря позволит повысить эффективность региональной экономики, привлечь крупные отечественные и иностранные инвестиции, трудовые и технологические ресурсы, играть значительную роль в обеспечении энергетической безопасности страны и в развитии международного сотрудничества, особенно со странами Скандинавии. Интерес к ресурсам Баренцева моря в мире огромен, оно может стать новым европейским энергетическим центром глобального масштаба.

В Стратегии социально-экономического развития *Республики Коми* формирование кластерной политики не обозначено, структурная экономическая политика ориентирована на создание комплексов, но цели и задачи создания комплексов довольно близки к тем мероприятиям, которые могут в дальнейшем обеспечить переход к кластерным формированиям [12].

Развитие нефте- и газоперерабатывающей промышленности и формирование нефтегазового кластера в Республике Коми возможно за счет увеличения глубины переработки углеводородного сырья, применения новых прогрессивных технологий, улучшения качественных и экологических характеристик товарной продукции, завершения строительства Усинского нефтеперерабатывающего завода; строительства в ООО «ЛУКОЙЛ-Ухтанефтепереработка» новой установки по первичной переработке нефти; реализации проекта «Реконструкция производства по переработке конденсата на Сосногорском газоперерабатывающем заводе» (ООО «Газпромтрансгаз Ухта»), сотрудничества Правительства Республики Коми и организаций нефте- и газоперерабатывающей промышленности в вопросах экономического развития, экологической безопасности, социальной ответственности,

---

\* Сроки освоения ШГКМ (Штокмановское газоконденсатное месторождение) отложены на неопределенное время, но это не исключает возможности возвращения к вопросу его разработки, а, следовательно, и решения проблем, связанных с его эксплуатацией.

развития инфраструктуры; совершенствования системы профессиональной подготовки и переподготовки кадров, привлечения квалифицированных кадров.

Целью развития нефтегазового комплекса Республики Коми является обеспечение устойчивого роста добычи нефти и газа на основе рационального, комплексного и эффективного использования запасов месторождений углеводородного сырья, повышение конкурентоспособности продукции нефтегазового комплекса на основе рационализации его технологической и товарной структуры, создание условий для взаимовыгодного сотрудничества субъектов освоения нефтегазовых ресурсов Тимано-Печорской провинции; реализация мегапроекта «Ямал», позволяющего вовлечь в разработку мелкие газовые месторождения, что повлечет переоценку перспектив развития газодобычи в районах западного склона Полярного и Приполярного Урала.

*Лидеры в освоении нефтегазовых ресурсов.* В период до 2020 г. *Ненецкий автономный округ* останется одним из самых перспективных регионов России для развития нефтегазодобычи и формирования на этой основе нефтегазового кластера, что во многом будет влиять на его роль и место в общероссийской экономике и глобальной системе разделения труда. Формирование газохимического и нефтеперерабатывающего кластеров(комплексов), включающих завод по сжижению природного газа, развитие трубопроводной системы с выходом на Индигу, газопровод «Кумжинское – Индига», выступает долговременным стратегическим ориентиром.

Целью развития округа – выход на траекторию устойчивого долгосрочного социально-экономического роста, предполагающего учет взаимных интересов институтов государственной власти, гражданского общества, нефтегазовой промышленности и коренного населения с опорой на повышение экологической совместимости экономической деятельности с окружающей средой в интересах повышения уровня и качества жизни. Дальнейшее освоение природно-ресурсной базы и активное подключение к транспортно-транзитным и экспортно-сырьевым коридорам России будут открывать новые возможности для развития, связанные с разработкой новых месторождений и формированием транспортно-логистической инфраструктуры, в том числе активизацией перевозок по Северному морскому пути.

На территории *Ямало-Ненецкого автономного округа* сегодня добывается более 90% российского газа, значительные объемы нефти и газового конденсата. Газовая отрасль, сконцентрированная в настоящее время на четырех крупнейших месторождениях в центральной части округа, в перспективе будет развиваться за счет вовлечения в разработку более глубоких горизонтов на действующих месторождениях, освоения крупных объектов на полуостровах Ямал (Бованенковское нефтегазоконденсатное, Тамбейская группа месторождений) и Гыдан, в шельфовой зоне восточной части округа (Крузенштерновское, Харасавейское, Ленинградское, Русановское), а также за счет внедрения прогрессивных технологий добычи и транспортировки углеводородов [13].

Нефтегазовый и газо-химический кластеры ЯНАО будут ориентированы на расширенное воспроизводство минерально-сырьевой базы добычи нефти, газа и газового конденсата; развитие транспортной инфраструктуры, диверсификацию поставок природного газа и организацию поставок СПГ; создание научной и инновационной инфраструктуры для нужд кластеров.

Модернизация и развитие нефтегазового комплекса Российской Арктики, включая освоение шельфа, на основе использования кластерных стратегий может существенно изменить пространственную организацию экономики этого мегарегиона и дополнительно обеспечить к 2030 г. выпуск до 50 млн тонн нефти и не менее 150 млрд м<sup>3</sup> природного газа, что окажется важнейшим фактором в обеспечении энергетической безопасности страны.

Статья подготовлена в рамках проведения исследований по программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 31

«Роль пространства в модернизации России: природный и социально-экономический потенциал».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гранберг А.Г. Программа фундаментальных исследований пространственного развития России и роль в ней Северо-Западного региона // Экономика Северо-Запада. 2009. № 1(38). С.5–10.
2. Цукерман В.А. О стратегии инновационного развития регионов Севера, связанной с освоением морских ресурсов // Север и рынок. 2011. № 2(29). С.69–72.
3. Шталь Г.И. Нефть и газ Российского Севера // Российский Север: модернизация и развитие: сборник. М.: изд. Федер. собрания РФ, 2012. С.82–89.
4. Вашков А. Вперед смотрящий, а потому живучий / А. Вашков, Д. Сиваков // Эксперт. 2011. №48 (781). С. 26–34.
5. 400 крупнейших компаний России // Эксперт. 2011. № 39 (772).
6. ОАО НК «ЛУКОЙЛ». Справочник

аналитика. 2012. Режим доступа: [http://www.lukoil.ru/materials/doc/Books/2012/Lukoil\\_DB\\_rus.pdf](http://www.lukoil.ru/materials/doc/Books/2012/Lukoil_DB_rus.pdf) 7. Мнацаканян О. Перспективы развития геолого-разведочных работ на шельфе арктических морей / О. Мнацаканян, А. Столбов // Морской сборник. 2008. № 6. С. 56–62. 8. HYDROВлическое предложение // Нефтяная вертикаль. 2006, № 11. С. 85–87. 9. Штокман: пять вариантов Statoil // Нефтяная вертикаль. 2005. № 12. С. 81–83. 10. Чернов И. Приразломное // Нефтяная вертикаль. 2005. № 16. С. 64–67. 11. Башмакова Е.П. Может ли Мурманская область стать «локомотивом роста»? // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2006. № 1. С. 32–41. 12. Стратегия экономического и социального развития Республики Коми на период до 2010 г. Режим доступа: <http://rkomu.ru/services/strategia/> 13. Стратегия социально-экономического развития Сибири и Дальнего востока на период до 2025 года. Режим доступа: <http://dfo.gov.ru/index.php?id=80>

### Сведения об авторах

Башмакова Елена Петровна – к.э.н., ученый секретарь; e-mail: [bashmakova@iep.kolasc.net.ru](mailto:bashmakova@iep.kolasc.net.ru)  
Селин Владимир Степанович – д.э.н., профессор, главный научный сотрудник;  
e-mail: [silin@iep.kolasc.net.ru](mailto:silin@iep.kolasc.net.ru)

УДК 332.14:620.9 (985)

## СЦЕНАРНЫЙ ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРА РОССИИ

С.С. Туинова

Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина КНЦ РАН

### Аннотация

Выполнена попытка прогноза развития альтернативной энергетики для Севера России на основе сценарного подхода, который строится на общей теории управления. Даны некоторые рекомендации правового и институционального характера органам государственного и местного управления.

### Ключевые слова:

*альтернативная энергетика, сценарии, прогноз.*



### Введение

Истощение запасов и усложнение добычи углеводородного топлива делает актуальными исследования развития альтернативной энергетики.

Цель данного исследования – на основе анализа проблем и тенденций альтернативной энергетики в северных странах и регионах РФ оценить эффективность различных направлений развития этой энергетики и роль государства в этих процессах. Попытаться выполнить сценарный прогноз развития альтернативной энергетики на Европейском Севере РФ. Подготовить некоторые рекомендации правового и институционального характера органам государственного и местного управления.

Целевые показатели объема производства электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и ее потребления в совокупном балансе производства и потребления электрической энергии утверждены для 2010 г. – 1.5% (факт < 1%), для 2015 г. – 2.5% и для 2020 г. – 4.5% без ГЭС установленной мощностью более 25 МВт. Созданное в 2009 г. при Минэнерго Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российское энергетическое агентство» (ФГБУ РЭА) с 2012 г. увеличило число своих задач [1], но при этом исчезли заявленные ранее: участие в соответствующем законотворчестве, мониторинг бюджетной сферы и оперативное управление реализацией госпрограммы. Значит, ФГБУ РЭА не имеет сейчас опорной мониторинговой информации о положении дел в регионах для прогноза. Со статистикой в стране проблемы в целом [2]. Поэтому автором использована достаточно общая теория управления, которая позволяет объективно оценивать субъективную информацию [3].

### Методика исследования

Оценка мнений множества специалистов экспертного сообщества приближает к пониманию тенденций, на основе чего разработаны сценарии и выполнен прогноз. Кроме того, автор попытался

использовать метод противопоставления противоположных мнений для поиска истины [4]. Экспертное сообщество пришло к заключению, что нет единого глобального решения энергообеспечения, однако можно найти оптимальное решение для какого-то ограниченного географического региона. При этом исходными данными являются все известные и применяемые методы получения энергии, а также новые, находящиеся на стадиях исследования и конструкторской разработки. Анализ этих методов и их возможного применения для конкретного места требует технической компетентности не только автора возможного проекта, сценария, но и подготовленности потребителя. Хотя мировое сообщество заявляет, что глобальную энергетику ожидают большие перемены [5], российскому заказчику сценариев, увы, важнее получить доводы на продолжение финансирования и о выгоды сохранения действующих проектов. Добыча углеводородов со дна северных морей возрастает. В этой связи усиливается спор мировых держав за Арктику. Россия претендует на единоличную монополию, но в техническом плане слабее (вероятно, существенно) других северных стран, которые готовы освоить глубинные запасы и считают, что богатства Земли принадлежат всему человечеству, а не одной стране. Несмотря на обращение мирового рынка в сторону ВИЭ (конец эпохи дешевых углеводородов), в России очень сильны структуры, заинтересованные в развитии традиционной энергетики: собственники исходных ресурсов, поставщики топлива, оборудования. Мнение из русскоязычного онлайн-обсуждения: «Новые энергетические разработки не выгодны владельцам энергомонополий точно так же, как не выгодны счастливые, здоровые люди тем, кто имеет прибыль от проституции, наркотиков, алкоголя и фармакологии. Миром правит капитал, люди гибнут за металл».

Вместе с тем, в мире идут сильные интеграционные подвижки для обеспечения бесперебойной работы глобального рынка энергоресурсов [6]. ЕС и Россия развивают общий рынок энергоресурсов (в основном газа), идут реформы со схожими заявленными целями: эффективный рынок энергии в интересах потребителей, долгосрочное инвестирование в энергетику, соблюдение экологических норм [7]. Россия заявила об особом значении для страны Арктической зоны РФ [8]. Высок интерес скандинавских стран к Европейскому Северу России [9–11]. Изучение норвежских сценариев для российской части Баренц-региона доказывает эффективность выбранного подхода [12]. По гранту Великобритании Центр по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ) в 2012 г. выполнил оценку российской политики повышения энергоэффективности [13]. Международная финансовая корпорация (IFC) в 2011 г. проанализировала ситуацию в России в области новой энергетической политики [14]. В работе использованы данные российского агентства по прогнозированию балансов в электроэнергетике (АПБЕ, в англ. версии REFA – Russian Energy Forecasting Agency) [15]. Представленные экспертные мнения о главных движущих силах и факторах, тенденциях и угрозах, которые влияют на развитие экономики в целом и альтернативной энергетики в частности на Европейском Севере России, использованы при прогнозировании.

## Результаты и обсуждение

Здесь рассматриваются 4 сценария (рис. 1). Идея названий сценариев взята из упомянутой работы IFC «Пробуждение Зеленого Великана» (Waking the Green Giant).

С момента исчезновения СССР произошедшие в энергетике реформы привели к появлению новых действующих лиц на игровом поле. Так, после политико-экономических потрясений 1990-х гг. стало понятно, что необходима независимость от действующих стареющих энергоснабжающих сетей. И первыми это осознали высокопоставленные люди. Именно в их среде стало престижным иметь собственное отдельно стоящее жилье с независимыми современными источниками энергоснабжения. В наших сценариях это первые «зелёные малыши» (от англ. Green Dwarfs) – GD1.

Примерно в это же время наиболее продвинутые представители малого бизнеса стали кустарным образом создавать собственные энергетические установки, чтобы обеспечить независимость от постоянно дорожающих поставок энергоснабжающих монополистов. В сценариях этот авангард частного не крупного российского бизнеса – GD2. Примером GD2 является сельскохозяйственное предприятие в поселке Лейпи Мурманской области, которое с 2004 г. благодаря собранным из брошенных ж/д цистерн метантэнков, отказалось от использования мазута. GD3 – это инициативы в частном жилом секторе и транспорте, позволяющие не зависеть от энергоснабжающих монополистов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что с начала 2000-х гг. появление «зелёных малышей» в России стало устойчивым явлением, которое, однако, никак не регистрирует официальная статистика. Выход в 2011 г. публикации IFC будем считать объявлением появления «зелёного великана» (от англ.

Green Giant) – GG. В рассматриваемых здесь сценариях GG – это государственные инициативы (сверху) по внедрению альтернативной энергетики на объектах бюджетной сферы и крупной промышленности.

По первому, наиболее пессимистичному сценарию с условным названием «ни малышей – ни великанов» (рис. 2) прогноз альтернативной энергетики в структуре генерации на графике показан желтым цветом и не поднимается выше предсказанного в 2010 г. руководителем агентства по прогнозированию балансов в электроэнергетике И. Кожуховским.

Этот сценарий может получить развитие в случае, если отношение власти к альтернативной энергетике будет расходиться с заявленными политическими целями. То есть не произойдет существенных подвижек в структуре генерации за счет ввода мощностей альтернативной энергетики на уровне крупного российского бизнеса: «великан» будет исключительно бумажным. «Малышки» по-прежнему будут существовать на нелегальном положении без всякой государственной поддержки, в отдельных случаях «попадать под раздачу» региональных монополистов, которые будут физически уничтожать желающих стать независимыми. Понятно, что такой сценарий повлечет за собой социально-экономическую внутрирегиональную напряженность, не будет способствовать улучшению имиджа страны, сохранению экологии.

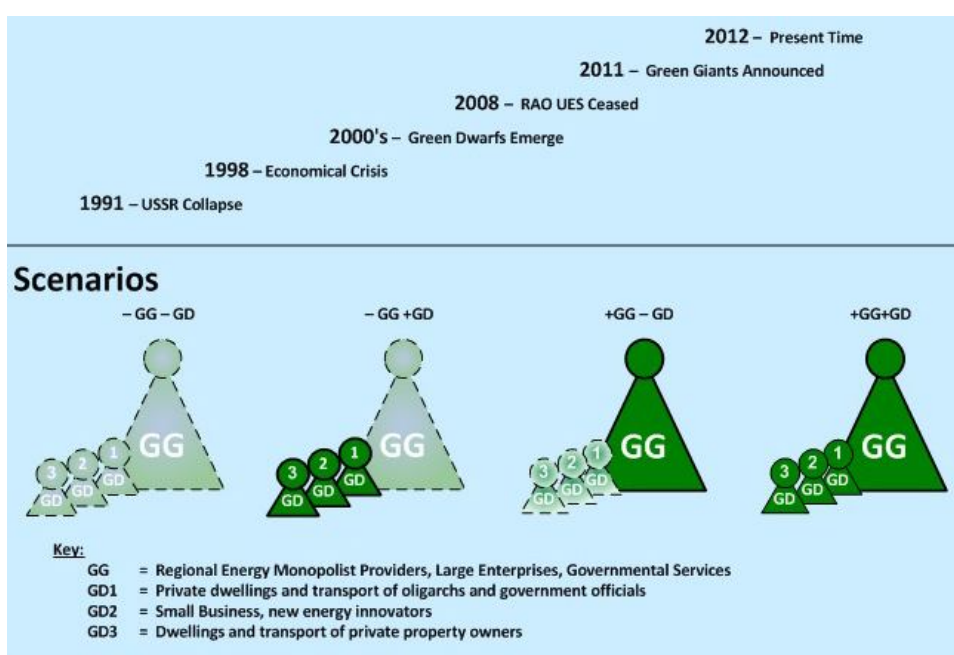


Рис. 1. Сценарии развития альтернативной энергетики на Европейском Севере РФ

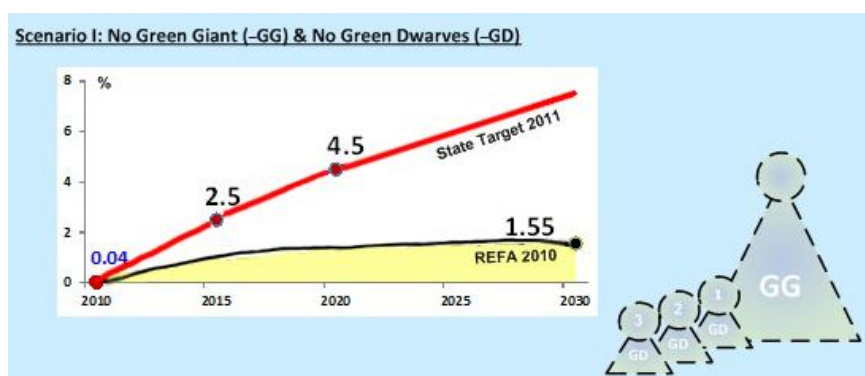


Рис. 2. Сценарий I для альтернативной энергетики «Ни малышей – ни великанов»

Второй сценарий «Малышки без великана» (рис. 3) прогнозирует некоторое увеличение доли альтернативной энергетики в структуре энергобаланса по сравнению с первым.



Гипотетически такой сценарий, при котором крупные мероприятия по внедрению ВИЭ – «великаны» – из-за недоразвитых механизмов по привлечению инвестиций задержатся, а «малышей» завлекут налоговыми льготами и легализуют, кажется наименее вероятным. Но поскольку GD («малыши») развиваются сами, не требуя крупных внешних инвестиций, и могут принести существенный вклад, если их пример будет размножен, то есть вероятность, что российское руководство может использовать эту возможность. Такое развитие снизу лучше, чем никакого, поскольку дает возможность населению чувствовать себя более защищенным и уверенным в завтрашнем дне, а значит, снимает социальную напряженность. Такой сценарий вряд ли выведет Россию на лидерские позиции по альтернативной энергетике, но в определенной мере будет способствовать улучшению экологической ситуации и имиджа страны.

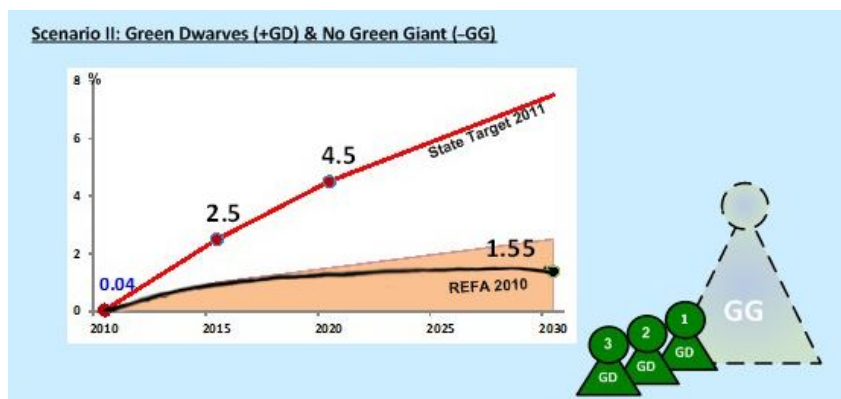


Рис. 3. Сценарий II для альтернативной энергетики «Малыши без великана»

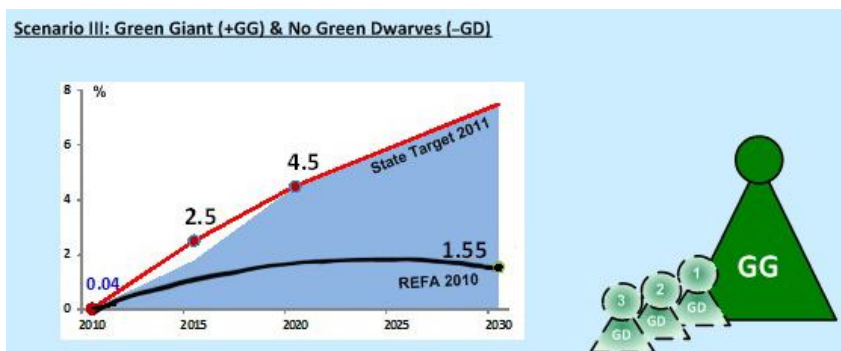


Рис. 4. Сценарий III для альтернативной энергетики «Великан без малышей»

Третий сценарий «Великан без малышей» (рис. 4) кажется более вероятным, чем предыдущий, потому что он наиболее соответствует заявленным государственным политическим целям. Хочется верить, что Россия может начать осуществлять цель, отмеченную в Стратегии социально-экономического развития страны до 2020 г., занять ведущее положение в мире по ВИЭ. Прогноз по нему приближается к заявленным государственным целевым показателям и предполагает, что темп ввода мощностей ВИЭ за пределами 2020 г. сохранится. Выполненная в 2012 г. в ЦЭНЭФ оценка российской политики повышения энергоэффективности помогает осознать, что показатель 2015 г. (2.5% ВИЭ в балансе страны) вряд ли может быть достигнут, поскольку уже накопилось отставание за счет неразвитости государственных стимулирующих механизмов. Третий сценарий предполагает, что эта проблема будет преодолена достаточно быстро, чтобы цель 2020 г. все-таки была достигнута. «Малыши» по этому сценарию остаются на существующем нелегальном положении. Несомненно, развитие событий по этому сценарию принесет весомый вклад в дело защиты экологии, поднимет престиж страны.

Четвертый сценарий «Великан с малышами» (рис. 5) – самый оптимистичный из представленных, поскольку предполагает полномасштабное развитие крупных проектов по запуску

мощностей ВИЭ (великаны) и легализацию частных инициатив снизу (малыши), то есть их одновременное дружное сосуществование. Смелое воображение рисует перспективу, когда население живет в удобных домах даже не с нулевым потреблением, а типа «энергия плюс»: энергии вырабатывается больше, чем потребляется, излишками делятся или развивают свое потребление (зимний сад или парник, например). Развита инфраструктура – дороги, электрические сети, связь. Крупное промышленное производство действует устойчиво, с минимальным потреблением ископаемых видов топлива и количеством отходов. Россия действительно является одним из лидеров в области альтернативной энергетики.

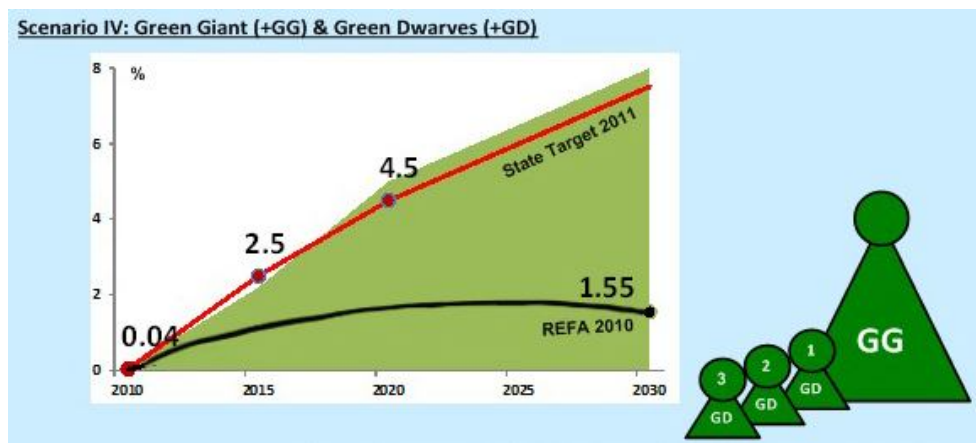


Рис. 5. Сценарий IV для альтернативной энергетики «Великан с малышами»

Рассмотренные здесь сценарии развития альтернативной энергетики на основе оценки мнений экспертного сообщества, анализа тенденций и противопоставления мнений могут быть использованы для России в целом и для регионов Европейского Севера РФ в частности. Выполненная прогнозная оценка позволяет сделать следующие *выводы и дать рекомендации*:

- в России есть огромный потенциал и политическая воля для развития альтернативной энергетики, и это утверждение справедливо также для северных регионов. Россия стремится обрести достойное положение среди стран-лидеров в области внедрения альтернативной энергетики;
- развитие альтернативной энергетики в регионах Европейского Севера РФ должно определяться экономическими особенностями вмещающих территорий и общей направленностью государственной политики страны в сфере повышения энергетической эффективности на основе использования возобновляемых источников энергии;
- в настоящее время, однако, несмотря на 10-летие законодательной деятельности в направлении альтернативной энергетики, энергосбережения и энергоэффективности (свыше 70 документов), Россия находится примерно на сотом месте в мире по использованию ВИЭ\*. Причины неуспеха не только в малоэффективных решениях или некачественном их исполнении, но и в уникальных российских условиях, в которых приходится действовать – нигде в мировой Арктической зоне нет населенных пунктов такого масштаба, как в России, то есть мы не всегда можем непосредственно, без адаптации использовать в нашем жилищном секторе технические приемы, опробованные в других странах;
- однако в России есть умельцы и накоплен замечательный собственный опыт, которым можно по праву гордиться. Чтобы этот опыт получил более широкое распространение, следует включать государственные меры поддержки. При этом зарубежный опыт дает возможность опираться на него и оперативно развивать собственную нормативную базу;
- полное и рациональное использование выделенных средств в российских специфических

\* Из-за противоречивости нормативной базы и сложности организации закупок по энергосервисным контрактам (ЭСКО) их продвижение идет медленно. Кроме того, бюджетом ежегодно планомерно изымается 3% экономии, что снижает возможности ЭСКО компенсировать свои затраты в рамках контракта.

условиях проблематично\*\*. Рекомендуется:

- упростить процедуру участия зарубежных инвесторов в крупных проектах по альтернативной энергетике, принять меры по установлению рыночных обязательств в энергоэффективности, обязательных целей по сокращению выбросов парниковых газов;

- развивать энергетическую эффективность в промышленности (не только энергетические аудиты, но и заключение долгосрочных (на 5–12 лет) целевых соглашений по повышению энергоэффективности между правительством и энергоемкими промышленными холдингами), принять меры по продвижению энергетической эффективности на малых и средних предприятиях, обязать энергоснабжающие компании повышать энергоэффективность у потребителей, запустить схемы опыта развитых стран применения гибких инструментов;

- распространять зарубежный опыт по продвижению пассивных домов, домов с нулевым потреблением энергии и домов типа «энергия плюс», устранить недостатки нормативной базы, документы низкого качества\*\*\*;

- формировать эффективную местную политику в области развития альтернативной энергетике, создавать по возможности новые рабочие места, связанные с реализацией выбранной энергетической политики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт ФГБУ «Российское энергетическое агентство». Режим доступа: <http://www.rosenergo.gov.ru/>
2. *Гладилин И.* Бывший директор НИИ статистики Василий Симчера представил реальные данные. Дата опубликования 14.11.2011. Режим доступа: <http://www.km.ru/v-rossii/2011/11/14/ekonomicheskaya-situatsiya-v-rossii/obnarodovana-shokiruushchaya-pravda-ob-isti>
3. Он-лайн библиотека: Категории достаточно общей теории управления. Режим доступа: [http://www.plam.ru/bisliit/dostatochno\\_obshaja\\_teoriya\\_upravljenija/p5.php](http://www.plam.ru/bisliit/dostatochno_obshaja_teoriya_upravljenija/p5.php)
4. Энгельс Ф. Анти-Дюринг. 1878. Изд-во: Институт К. Маркса и Ф. Энгельса. 359 с. Режим доступа: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s01/z0001015/st000.shtml>
5. *Черница С.* Новая энергетика набирает ход. Аналитика – Генерация энергии. Опубликовано 27.05.11. Режим доступа: <http://energyland.info/analtic-show-71955>
6. Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge UK, 2012.1865 p.
7. Dynamics of Energy Governance in Europe and Russia. Edited by Caroline Kuzemko, Andrei V. Belyi, Andreas Goldthau and Michael F. Keating. Printed in Great Britain by CPI Antony Rowe, Chippenham and Eastbourne. 2012. – 292 p.
8. Стратегия развития Арктической Зоны РФ и обеспечение национальной безопасности на период до 2020 г. (проект). М., 2010. 241с.
9. Sweden's strategy for the Arctic region. Regeringskansliet. Printed by XGS Grafisk Service, 2011.50 p.
10. Finland's strategy for the Arctic region. Prime Minister's Office Publications, 8/2011. 94p.
11. The Norwegian Government's High North Strategy. Norwegian Ministry of Foreign Affairs, 2006. № 1.73 p.
12. Bjorn Brunstad, Eivind Magnus, Philip Swanson, Geir Honneland, Indra Overland. Big Oil Playground, Russian Bear Preserve or European Periphery? The Russian Barents Sea Region towards 2015. Eburon Delf. 2004. 271 p.
13. *Башмаков И.А.* Сравнение российской политики повышения энергоэффективности с мерами, принятыми в развитых странах. ЦЭНЭФ / *И.А. Башмаков, В.И. Башмаков.* М., 2012. 67 с.
14. Renewable Energy Policy in Russia: Waking the Green Giant. Copyright © 2011 International Financial Corporation (IFC) Russia Renewable Energy Program. 70 p.
15. Официальный сайт российского агентства по прогнозированию балансов в электроэнергетике. Режим доступ: [http://www.e-arbe.ru/5years/sc\\_2012\\_2030/index.php](http://www.e-arbe.ru/5years/sc_2012_2030/index.php)
16. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2009 г. № 1225 «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности».
17. Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 07.06.2010 №273 "Об утверждении Методики расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях».
18. Постановление Правительства №1225.
19. Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации № 273.
20. Постановление Правительства РФ от 12 июля 2011г. № 562 «Об утверждении перечня объектов и технологий, имеющих высокую энергетическую эффективность, осуществление инвестиций, создание которых является основанием для предоставления инвестиционного налогового кредита».

#### Сведения об авторе

*Туинова Светлана Сергеевна* – к.э.н., научный сотрудник; e-mail: [touinova@iep.kolasc.net.ru](mailto:touinova@iep.kolasc.net.ru)

\*\* Положение о субсидировании региональных программ, например, приняли осенью 2011 г. С учетом процедур подготовки заявок и их рассмотрения в регионы деньги попали в разгар отопительного сезона, когда многие работы провести уже невозможно.

\*\*\* В настоящий момент нормативная база построена так, что средство-аудит подменяет цель-энергоэффективность [см.16, 17]. Критерии отбора оборудования по индексу энергоэффективности сформулированы не совсем корректно [см. 18, 19, 20]. Блокируется возможность замещения одних ресурсов другими и внедрение возобновляемых источников энергии, замещающих традиционные (см. формулировку статьи 24 ФЗ №261). Цель снижения удельного расхода на 15% за 5 лет должна быть сформулирована для всего муниципального образования или для распорядителя средств государственного бюджета, а не для каждого бюджетного учреждения (распорядитель сам определит, на каких учреждениях можно получить экономию, а где нельзя, цель нужно формулировать для всей совокупности коммунальных ресурсов, взвешенных по ценам базового года, а не для каждого в отдельности).

**3-я Международная научно-практическая конференция «Инновационное и безопасное сотрудничество в Баренцевом/Евроарктическом регионе»**  
**КНЦ РАН, 29–31 августа 2013 г.**

Конференция продолжила тематику двух первых собраний, проведенных в Киркенесе и Архангельске. Ее организаторами выступили Национальный институт исследований глобальной безопасности (НИИГлоБ) и КНЦ РАН при поддержке Дипломатической академии МИД России, Российской академии естественных наук, Российского фонда высоких технологий, Общества «Знание» России, Международного и Норвежского Баренц-секретариатов. Своей целью конференция поставила научно-практическое осмысление конкретных задач, вытекающих из Декларации о сотрудничестве в Баренцевом/Евроарктическом регионе (Киркенесской декларации-2), которая была подписана 4 июня 2013 г. премьер-министрами и высокими представителями стран-членов Совета Баренцева/Евроарктического региона.

На конференции было представлено 11 докладов, с двумя из них выступили представители компании Arctic Development Реми Странд и Арильд Волан (Норвегия). Участники собрания отметили, что 20 лет назад, когда начиналась реализация первой Киркенесской декларации, Баренц-регион был окраиной Европы. Страны Баренц-региона сумели превратить свою периферийность из недостатка в преимущество, выйдя на прямые зарубежные контакты с соседями. Благодаря этому было выстроено взаимное доверие. Сегодня Баренцев регион называют моделью приграничного сотрудничества в Европе и политики устойчивого развития, что может послужить для других стран образцом того, как соседствующие государства могут решать споры мирным путем, способствуя открытию значительного потенциала региональной и европейской интеграции. Однако Арктика по-прежнему является геополитическим и экономическим магнитом, чье притяжение усиливается в связи с тенденциями потепления климата, открывающими новые перспективы в развитии транспорта, добычи полезных ископаемых и т.д. А значит, нужно и дальше договариваться о правильном взаимодействии, думать о поддержании устойчивого развития мира в обострившихся из-за событий в Сирии военно-политических условиях. Президент НИИГлоБ, Чрезвычайный и Полномочный Посланник РФ в отставке Анатолий Смирнов напомнил, что задача эксперта – предложить грамотное меню, задача политика – не ошибиться в выборе блюд. На встречах в Норвегии (в сентябре – министров транспорта в Нарвике, в октябре – министров иностранных дел в Тромсё) политики планируют конкретизировать вторую Киркенесскую декларацию, и в меню, которое они выберут, необходимо вложить правильную научную составляющую.

Конференция подтвердила необходимость воссоздания рабочей группы по информационным технологиям в Баренц-регионе, и данное предложение будет внесено. Организаторы конференции намерены продвигать идею создания социальной сети Баренцева региона, где будут заняты эксперты рабочей группы.

На конференции также отмечалось, что всё более тесным становится взаимодействие между образовательными и исследовательскими учреждениями Баренцева региона, благодаря чему он может и должен стать регионом знаний без границ.

**Всероссийская (с международным участием) конференция «Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах»**  
**ГИ КНЦ РАН, 8–12 июля 2013 г.**

Конференция продолжает серию мероприятий того же научного профиля, что и проведенные в последние годы Научным советом по проблемам геохимии и Научным советом по проблемам геологии докембрия Отделения наук о Земле РАН.

Заслушаны и обсуждены около 40 научных устных и 30 стендовых докладов, авторами которых являются более 150 специалистов, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов. Представлены геологические организации из 14 зарубежных стран: Австралия, Азербайджан, Болгария, Бразилия, Германия, Казахстан, Китай, Норвегия, Польша, Таджикистан, Турция, Узбекистан, Украина, Эстония и многих городов России: Алма-Аты, Апатиты, Душанбе, Екатеринбург, Иркутск, Кызыл, Магадан, Москва, Мурманск, Новосибирск, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Сыктывкар, Чита.

Особенностью конференции является более региональный характер предоставленных докладов, стремление авторов использовать при датировании разные изотопно-возрастные методы и различные минералы-геохронометры, добиваться согласованности результатов или/и определять причины расхождений в получаемых разными методами возрастными и генетическими определениями.

В докладах, вопросах и особенно в дискуссиях отчетливо прозвучало, что расшифровка сложнейшей длительной истории формирования и преобразования древних докембрийских комплексов пород и руд с получением корректных результатов требует детального геолого-петрологического и минералого-геохимического анализа исследуемых объектов. Каждая корректно получаемая возрастная или изотопно-петрологическая характеристика не может быть оставлена без рассмотрения или выброшена из базы данных. Активно обсуждались доклады по определению возраста и геодинамике процессов эклогитизации в Беломорском домене Балтийского (Фенноскандинавского) щита. Ряд докладов был посвящен разработкам по геологии, геофизике, петрологии, геохимии, металлогении конкретных объектов ВСкБОИП (Е.В. Шаркова, П.А. Серова, В.Т. Филатовой, А.Г. Пахалко и др.)

Международная группа исследователей (доклад К.А. Докукиной и др. «Мезоархейская-палеопротерозойская эволюция Беломорской эклогитовой провинции Фенноскандинавского щита (ассоциация Гридино)») обосновала геолого-петрологическими и изотопно-возрастными данными архейский возраст (2.79–2.73 млрд лет) формирования тел эклогитов в субдукционных геодинамических обстановках и длинную полиметаморфическую эволюцию этих пород вплоть до эпохи 1.9 млрд лет назад.

Большой интерес у участников конференции вызвали имеющиеся данные и интерпретации по новому типу крупнейших внутриплитных плюмовых структур – базитовых обширных изверженных (БОИП-ВЛИП). В докладе Ф.П. Митрофанова «Палеопротерозойская Восточно-Скандинавская БОИП (ВСкБОИП-EScVLIIP) плюмовой природы» был показан глобальный размер этой эпиархейской провинции, занимающей территории Кольского п-ова, финской Лапландии, Карелии, севера фундамента Русской плиты (по М.В. Минцу) и включающей все рифтогенные осадочно-вулканогенные прогибы, синхронные с ними высокобарные гранулитовые пояса, рои даек и массивы многофазных и расслоенных ультрабазит-базитовых интрузивов, сформированные в эпохи сумия, сариолия и ятулия в интервал времени 2.52 ~ 2.2 млрд лет назад, т.е. в период от завершения стабилизации архейского суперконтинента Кенорленда до появления офиолитов Иормула Свекофеннского палеоокеана и рифтов Печенги красноморского типа.

Еще одна важная проблема – длительность и многократность формирования щелочных ассоциаций в Кольской геологии – была подробно рассмотрена в докладах Т.Б. Баяновой, А.А. Арзамасцева, М.Н. Петровского, Д.Р. Зозули, В.Р. Ветрина и др. По их многочисленным и хорошо проработанным геолого-геохронологическим данным, щелочной магматизм от ультраосновного до кислого состава в разных структурах Кольского п-ова с разной металлогенией, в т.ч. современно ультраважной – редкометалльной, известен и в конце архея (2.8–2.6 млрд лет), и в раннем и среднем протерозое и, конечно, с начала до середины палеозоя. Интраконтинентальный внутриплитный характер этого магматизма свидетельствует о ранней и зрелой коровой стабилизации структур и, возможно, о плюмовой природе его, может быть, в режиме «горячих точек».

Таким образом, не обсуждая здесь иных интересных докладов, посвященных другим геологическим объектам и в других регионах России и зарубежья, например, гранитоидам, санукитоидам, золоторудным объектам, псевдотахилитам и пр., подчеркнем, что комплексным мультидисциплинарным исследованиям специально отмеченных нами проблем плюмовых процессов, докембрийских эклогитов, гранулитов и анортозитов, древнейших щелочных пород и др. пора посвятить специальные региональные и российские симпозиумы и конференции.

После конференции были проведены 3 геологические экскурсии: «Архейский геодинамический полигон Воче-Ламбина» (руководитель к.г.-м.н. Л.Н. Морозова), «Хибинский щелочной массив» (руководитель к.г.-м.н. А.К. Шпаченко); «Мончегорский рудный район» (руководитель к.г.-м.н. Ю.Н. Нерадовский).

## **Международный научный семинар «Океанографические и биологические базы данных в оценке современных климатических процессов»**

**ММБИ КНЦ РАН, 27–28 июня 2013 г.**

Основная тема семинара – обсуждение, пожалуй, самой большой проблемы, стоящей перед человечеством в XXI веке, – изменения климата, так как сопутствующие климатическим

флуктуациям процессы, механизмы обратной связи и взаимодействия могут оказать драматические и беспрецедентные воздействия на морскую экологию. Фитопланктон – ключевой компонент морской экосистемы, фиксации атмосферного углерода, он составляет основной источник пищи для зоопланктона, а также для формирования базы пищевых цепей океана. Цель семинара – обсуждение методических тонкостей использования данных мониторинга морских планктонных сообществ, сравнение полученных экологических показателей и результатов численного моделирования для получения комплексного видения глобальных процессов в планктонных сообществах и их роли в оценке нагрузки на окружающую среду и рисков, связанных с истощением природных ресурсов. Задача семинара и проекта в целом – обсуждение новых знаний о планктонных океанических сообществах и их реакции на окружающую среду и изменение климата.

В работе семинара приняли участие представители 9 научных организаций России, Норвегии, Великобритании, Италии, ЮАР и Бразилии. На семинаре было представлено 14 устных сообщений, посвященных процессам и динамике планктонных сообществ; методам отбора и анализа проб; анализу первичных данных и управлению ими; расширенным статистическим данным и анализу временных рядов; дистанционному зондированию и экологическим показателям; моделированию океанологических процессов.

## **2-я Российская конференция с международным участием «Новые подходы в химической технологии минерального сырья. Применение экстракции и сорбции»** ***ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Санкт-Петербург, 3–6 июня 2013 г.***

На базе Санкт-Петербургского государственного технического института (Технологического университета) прошла 2-я Российская конференция с международным участием «Новые подходы в химической технологии минерального сырья. Применение экстракции и сорбции». Организаторами выступили: ИХТРЭМС КНЦ РАН, СПбГТИ (Технологический университет), группа компаний «Росредмет», Институт химии ДВО РАН. Конференция организована при участии Отделения химии и наук о материалах РАН, научных советов РАН по химической технологии, физической химии и неорганической химии, Российского фонда фундаментальных исследований.

В работе конференции приняли участие 308 специалистов, представляющих государственные органы Российской Федерации, промышленные холдинги и предприятия, научно-исследовательские и образовательные организации, в том числе 45 иностранных участников из Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Казахстана, Словакии, Узбекистана, Украины, Франции, Эстонии, 10 членов РАН, 2 члена иностранных академий, 48 докторов наук, 65 кандидатов наук, более 50 представителей промышленных предприятий. География участников конференции из России очень обширна – от Дальнего Востока до Северо-Запада. Следует особо отметить большое число молодых участников конференции – более 70 чел.

Всего было сделано 16 пленарных, 94 устных и 68 стендовых докладов. Значительное число докладов посвящено рациональному использованию минерально-сырьевой базы, научному обоснованию технологических схем переработки сырья, синтезу, изучению свойств и применения новых материалов. Большое внимание уделено использованию методов сорбции и экстракции для выделения, очистки и разделения соединений редких и цветных металлов, а также вопросам синтеза и изучения свойств сорбентов и экстрагентов. Обсуждены вопросы экологической безопасности и экономические проблемы комплексной переработки сырья.

Среди рассмотренных прикладных работ по переработке сырья присутствуют варианты технологий, обоснованные не только на стадиях физико-химических исследований, но также прошедшие проверку от лабораторного до промышленного масштабов и рекомендуемые для внедрения.

Проблемы рационального использования природных ресурсов, синтеза новых функциональных материалов и их применения являются чрезвычайно сложными и объединяют усилия творческих коллективов различных академических и отраслевых институтов, университетов и производств России и других стран. Материалы конференции позволяют отметить плодотворную координацию и интеграцию исследований при решении приоритетных задач фундаментальных и прикладных отраслей наук. Организаторы конференции выражают надежду, что она послужит стимулом для дальнейшего развития комплексных междисциплинарных исследований от сырья и малоотходных технологий до высокотехнологичных продуктов, определяющих уровень развития промышленности.

Материалы научной конференции изданы в 2-х томах. 1 том содержит пленарные доклады, материалы секции 1 «Комплексная переработка минерального сырья и техногенных отходов», секции

2 «Технология извлечения и разделения редких и редкоземельных элементов», секции 3 «Научные основы и перспективы применения процессов экстракции в технологиях». Во 2 томе содержатся материалы секции 4 «Синтез сорбционных материалов и их применение для решения экологических проблем» и секции 5 «Получение и свойства функциональных материалов. Аппаратурное оформление процессов сорбции и экстракции».

Решения конференции:

- отметить, что *конференция* прошла успешно, ее результаты будут способствовать координации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области химической технологии, материаловедения и в смежных областях;

- действующая система налогообложения не стимулирует собственников на внедрение новейших технологий, рациональное использование недр, вовлечение в эксплуатацию малых месторождений с низким содержанием полезных компонентов;

- обратиться в бюро Отделения химии и наук о материалах с просьбой рассмотреть вопросы ориентации РАН на выполнение не только фундаментальных исследований, но и практических задач;

- опубликовать информацию о проведенной Конференции в журнале «Химическая технология» и на сайте конференции;

- провести очередную конференцию в 2016 г;

- направить решение конференции в Президиум РАН, бюро ОХНМ РАН, Комитет по науке и образованию Государственной думы РФ, Министерство образования и науки РФ, Министерство промышленности и торговли РФ, Федеральное агентство по науке и инновациям, Межведомственную комиссию по изучению производительных сил;

- выразить благодарность руководству Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, СПбГТУ (ТИ) и ИХТЦ *ООО* «Русредметтехнологии и оборудование» за хорошую организацию проведения конференции. Объявить благодарность активным ее организаторам.

**XXXI Конференция молодых ученых ММБИ КНЦ РАН «Океанография и биология арктических морей», посвященная 135-летию со дня рождения советского зоолога и гидробиолога Дерюгина Константина Михайловича  
ММБИ КНЦ РАН, 21–22 мая 2013 г.**

В работе конференции приняли участие 79 человек. Заслушан и обсужден 31 доклад молодых ученых, аспирантов и студентов Мурманского морского биологического института, Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича, Мурманского государственного технического университета, Мурманского государственного гуманитарного университета, Научного центра «Российские космические системы».

Конференция открылась пленарным докладом Н.М. Адрова «Дерюгинский период морской науки и высшего образования», который был посвящен биографии и основным научным достижениям великого ученого, а также некоторым современным проблемам арктической океанографии, которые предстоит решать новому поколению ученых. Сообщения молодых ученых базировались в основном на современных данных, полученных в ходе выполнения экспедиционных и экспериментальных исследований в Северной Атлантике и Западной Арктике. Большинство работ традиционно носило экологический характер и ставило своей целью изучение биологии отдельных звеньев морских экосистем. На конференции широко обсуждались вопросы биоразнообразия, биопродуктивности северных акваторий, влияния климатических флуктуаций на морскую флору и фауну. Особый интерес был проявлен слушателями к докладам, посвященным изучению бактериопланктона и микропланктонных сообществ прибрежных вод Кольского п-ова. Широкую дискуссию вызвал доклад, посвященный различным методикам определения возраста хрящевых рыб Баренцева моря.

Выступающие в дискуссии члены ученого совета ММБИ КНЦ РАН отметили широкую гамму представленных сообщений, охватывающих все звенья экосистем арктических морей. Большинство докладов, по мнению выступающих, были сделаны по материалам законченных научных исследований, содержали большое количество новой научной информации и интересные выводы. В своих выступлениях ведущие ученые отмечали наиболее понравившиеся доклады как зрелых ученых: С.В. Малавенда и Д.Р. Дикаевой, так и начинающих молодых специалистов – выпускников 2011–2012 гг.: М.А. Павловой, А.И. Желудковой, Д.А. Фарион. Также высокие оценки и хвалебные отзывы

прозвучали в адрес Е.В. Смирновой, П.С. Ващенко, И.О. Нехаева, Д.В. Пуговкина. Вместе с тем, в речах выступающих прозвучала и критика по поводу заслушанных научных сообщений. М.В. Макаровым было высказано сожаление, что при достаточно высоких темпах и уровне научных исследований в целом, в современных морских биологических работах наметилась стагнация и отсутствие новых путей и решений для фундаментальных научных вопросов. К началу научного мероприятия были изданы материалы конференции, а также монография Н.М. Адрова «Дерюгинские рубежи морской биологии», которая была вручена всем докладчикам конференции.

По итогам творческого конкурса, проводимого среди сотрудников ММБИ, победителями стали: Д.В. Пуговкин, М.П. Венгер, М.А. Павлова, Д.А. Фарион, И.О. Нехаев.

### **XIII Международная научная студенческая конференция «Проблемы Арктического региона» ММБИ КНЦ РАН, 14 мая 2013 г.**

Проведенная конференция продолжила усилия, направленные на организацию постоянно действующей научной конференции студентов и аспирантов, имеющей целью исследование процессов в Арктическом регионе, повышение уровня образования и привлечения талантливой молодежи для работы в науке, промышленности и высшей школе.

В организации и проведении конференции приняли участие сотрудники, аспиранты и студенты институтов КНЦ РАН и их базовых кафедр при вузах Кольского Заполярья, учащиеся и молодые ученые из Карелии, Архангельска, дружественных организаций Норвегии и США. На конференции был представлен один заказной доклад и 85 докладов от 120 авторов. Работа конференции происходила по пяти секциям: «Биология и медицина» (11 докладов), «Гуманитарные, социальные и экономические проблемы» (17 докладов), «Информационные технологии и математические методы» (23 доклада), «Морская биология» (19 докладов) и «Экология Севера» (15 докладов). По результатам представленных докладов жюри конференции выделило по три доклада на каждой секции, авторы были награждены дипломами и подарками.

В результате проведения конференции: студентами был приобретен опыт выступлений на конференциях международного характера; выпущены тезисы представленных докладов на CD и в твердом переплете; студенты были ознакомлены с современным состоянием в области научных проблем Арктического региона; выявлены победители и наиболее яркие представители студенческой молодежи; накоплен опыт проведения международных конференций; подготовлена почва для проведения будущих конференций, а также иных подобных мероприятий в регионе.

### **I Региональная конференция «Почвоведение на Кольском полуострове и соседних территориях», посвященная памяти профессора Владимира Николаевича Переверзева ПАБСИ и ИППЭС КНЦ РАН, 25–29 апреля 2013 г.**

В работе конференции приняли участие представители 6 научно-исследовательских институтов и 4 вузов из 7 городов России. Среди участников конференции – сотрудники ИППЭС, ПАБСИ и ИХТРЭМС Кольского научного центра РАН (г. Апатиты), Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (г. Москва), Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН (г. Санкт-Петербург), Института леса КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), Института экологических проблем Севера УрО РАН (г. Архангельск), Государственного заповедника «Пасвик» (пос. Раякоски Мурманской области). Высшая школа на конференции была представлена Московским педагогическим государственным университетом, Петрозаводским государственным университетом, Кольским филиалом Петрозаводского государственного университета (г. Апатиты), Апатитским филиалом Мурманского государственного технического университета. В работе конференции приняла активное участие научная молодежь.

Конференция открылась пленарными докладами Г.М. Кашулиной «Научный вклад проф. В.Н. Переверзева в развитие почвоведения», Г.А. Евдокимовой «Путешествия в ландшафтах Кольского Севера с проф. В.Н. Переверзевым» и Т.И. Литвиновой «Вклад проф. В.Н. Переверзева в исследования почв высоких широт Арктики – остров Западный Шпицберген», которые были посвящены биографии и основным научным достижениям замечательного ученого-почвовода. Всю свою творческую жизнь в течение 55 лет Владимир Николаевич проработал в Полярно-альпийском ботаническом саду-институте КНЦ РАН, защитив кандидатскую диссертацию (1965); докторскую (1986), став профессором (1991) и Заслуженным работником сельского хозяйства РФ (2006). С 1968 г. и до последнего дня он заведовал лабораторией почвоведения.

Всего на конференции были заслушаны и обсуждены 24 доклада по следующим вопросам:



- генезис, география и классификация почв Севера;
- почвы как среда обитания живых организмов;
- роль почв в круговороте веществ и функционировании Северных экосистем;
- антропогенные изменения Северных почв;
- рекультивация нарушенных территорий.

В рамках конференции была проведена Региональная молодежная школа-семинар по теме «Почвенные исследования на Кольском полуострове». В школе-семинаре участвовали 15 чел. – молодые ученые ПАБСИ КНЦ РАН, а также студенты старших курсов Кольского филиала Петрозаводского государственного университета и Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета. В программу школы вошли лекции ведущих специалистов Полярно-альпийского ботанического сада-института и Института проблем промышленной экологии Севера по направлениям: «Экосистемные и глобальные функции почв» (Г.М. Кашулина), «Экологические проблемы Мурманской области» (Г.А. Евдокимова), «Почвенная фауна Кольского полуострова» (И.В. Зенкова). В рамках семинара была также проведена экскурсия по лаборатории химических и оптических методов анализа ИХТРЭМС КНЦ РАН (В.И. Петрова).

## **VII Межрегиональная молодежная научно-практическая конференция «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий»**

*ИХТРЭМС КНЦ РАН, 10–12 апреля 2013 г.*

Конференция организована Отделением химии и наук о материалах РАН, Научным советом РАН «Научные основы химической технологии», Институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, ФГОУ ВПО Мурманским государственным техническим университетом, Администрацией Мурманской области, Министерством образования и науки Мурманской области.

Представленные доклады включают результаты исследований по разработке научных основ переработки комплексного сырья и техногенных отходов гидро- и пирометаллургическими методами, синтезу, изучению свойств и применению новых функциональных материалов. Рассмотрены вопросы сорбции и экстракции цветных и редких металлов с использованием различных типов сорбентов и экстрагентов. В работах молодых ученых широко раскрывается проблематика производства стройматериалов в Мурманской области, предложены некоторые пути их решения с использованием техногенных отходов.

Организаторы конференции выражают надежду, что она послужит стимулом для дальнейшего развития комплексных исследований сложной отечественной сырьевой базы, ускорения внедрения малоотходных, экономически эффективных схем, включая высокие технологии современных функциональных материалов.

Материалы конференции будут интересны для студентов вузов в определении выбора будущей специализации, а также молодым ученым и специалистам, аспирантам очной и заочной форм обучения, работающим в области химии, химических технологий и материаловедения.

## **X Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия**

*ГИ КНЦ РАН, РФФИ, Кольское отделение РМО, 7–10 апреля 2013 г.*

Сессия этого года юбилейная и посвящена 150-летию со дня рождения акад. В.И. Вернадского. Также в этом году исполняется 130 лет со дня рождения акад. А.Е. Ферсмана. Кроме того, недавно ушел из жизни акад. Н.П. Юшкин (в течение многих лет – председатель Комиссии по истории РМО), начавший геологическую карьеру на Кольском п-ове (выпускник Хибинского горно-химического техникума). Этим выдающимся геологам была посвящена не только историческая секция, так или иначе они определили акценты всей научной сессии. Работали секции «Геология и геофизика» (11 докладов), «Месторождения полезных ископаемых» (7 докладов), «Общая и генетическая минералогия» (4 доклада) и «Технологическая и экспериментальная минералогия» (6 докладов). Кроме того, были представлены 10 стендовых докладов. В рамках секции «Геология и геофизика» прошла Международная научно-техническая конференция АФ МГТУ «Наука и образование 2013», в составе которой действует базовая для Геологического института КНЦ РАН кафедра геологии и полезных ископаемых.

Среди авторов состоявшихся докладов – 90 научных сотрудников из Апатитов (ГИ, ГоИ, ИХТРЭМС и ЦНМ КНЦ РАН; АФ МГТУ), Благовещенска (ИГиП ДВО РАН), Воронежа (ВГУ), Заполярного (ГМК «Печенганикель»), Иркутска (ИЗК СО РАН), Кировска (Историко-краеведческий

музей, Госархив Мурманской обл.), Красноярска (ИГДГГ СФУ), Ломоносова (ФГУ НИИ «Полярная морская ГРЭ»), Махачкалы (ИГ ДНЦ РАН), Мирного (ЗЯ НЦ АН РСЯ), Москвы (ГЕОХИ, ГТМ и ИФЗ РАН; НИИ и Музей антропологии МГУ; МГРИ-РГГРУ), Мурманска (ПГИ КНЦ РАН), Новосибирска (ИНХ СО РАН), Петрозаводска (ИГ КарНЦ РАН), Ростова-на-Дону (ИАЗ ЮНЦ РАН), Санкт-Петербурга (ИГД РАН, СПбГУ), Сыктывкара (ИГ Коми НЦ УрО РАН), Ухты (УГТУ), Хабаровска (LLC «WesternPacificMinerals») и Читы (ЗабГУ). Международное участие обеспечили коллеги из Геологической службы Финляндии (Рованиеми, Хельсинки, генеральный директор проф. E. Ekdahl, региональный директор северного офиса K. Piittikajnen, д-р P. Johansson, д-р J. Pihlaja) и Университета Дели (д-р A. Saikia). Таким образом, X Ферсмановская научная сессия подтвердила статус всероссийской с международным участием и обеспечила альянс научных сотрудников из институтов РАН, госуниверситетов и производственных организаций, обменявшихся новейшими результатами в различных областях геологии и полезных ископаемых Кольского региона. Почти все доклады помещены в Трудах научной сессии в виде полнотекстовых статей.

Со вступительным словом на английском языке к участникам научной сессии обратился председатель оргкомитета директор Геологического института КНЦ РАН проф. Ю.Л. Войтеховский.

После вступительного слова прозвучали пленарные доклады на английском языке: E. Ekdahl «GTKasa governmental geo-agency in Finland»; P. Johansson, J. Pihlaja «Attempts to promote gay tourism in Barents region»; «Saikia Host rock constraints on the gold mineralization in the Aravalli-Bundelkhand proto-continent, Northern Indian Shield». Они были посвящены результатам исследований по проектам, выполняемым сотрудниками Геологического института КНЦ РАН с финскими (Геологическая служба Финляндии) и индийскими (Университеты Дели и Шринагара) коллегами.

Кроме того, на конференции были представлены стендовые и заочные доклады, принятые к опубликованию в Трудах научной сессии.

Общие дискуссии стали неотъемлемой частью ферсмановских научных сессий и начинаются выступлениями председателей секций, акцентирующих внимание участников на актуальных проблемах своей области знаний и на том, как они были освещены в представленных докладах. Такая постановка задает тон активным дебатам, поскольку позволяет одновременно высветить список актуальных проблем и дать оценку прозвучавшим докладам. Так, на X Ферсмановской научной сессии активно обсуждались следующие теоретические и прикладные проблемы:

- необходимость обеспечения России своим стратегическим минеральным сырьем в условиях глобализации и доступности источников для транснациональных компаний;
- комплексный характер руд Кольского п-ова, недоизвлечение ряда компонентов в концентрат и недостаточно строгое законодательство в этом вопросе;
- категория уникальных месторождений полезных ископаемых и принципиальная невозможность их прогнозирования;
- неподтверждение запасов полезных ископаемых и перспективные методы их оценки;
- генетическая классификация золоторудных месторождений;
- понятие минерального вида и целесообразность объединения в минеральные серии;
- природные минералы и их синтетические аналоги.

В заключение для желающих была организована экскурсия в Музей геологии и минералогии им. И.В. Белькова Геологического института КНЦ РАН. На этом X Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия, посвященная 150-летию со дня рождения акад. В.И. Вернадского, завершила свою работу.

### **Международная научно-практическая конференция «Европейский Север: инновационное освоение морских ресурсов (образование–наука–производство)» ИЭП КНЦ РАН, 13–18 марта 2013 г.**

Институтом экономических проблем им. Г.П. Лузина совместно с Мурманским государственным техническим университетом в рамках Всероссийского фестиваля науки проведена Международная научно-практическая конференция «Европейский Север: инновационное освоение морских ресурсов (образование–наука–производство)».

Конференция посвящена рассмотрению возможностей перехода к инновационной экономике северных регионов России. Особое внимание уделено роли науки и образования в этих процессах, экономическим инструментам обеспечения инновационного развития организаций, системе коммуникаций как фактору повышения эффективности развития Севера, вопросам теории и практики экономики, проблемам теории и практики управления инновационными процессами,

международным проблемам инновационного освоения морских ресурсов, инновационным образовательным технологиям.

Материалы конференции опубликованы в научно-информационном журнале «Север и рынок: формирование экономического порядка», №1/2013.

### **Школа молодых ученых по морской биологии «Классика и современность» ММБИ КНЦ РАН, 27–28 февраля 2013 г.**

Главная цель научного мероприятия – привлечение внимания творческой научной молодежи региона (школьников, студентов, аспирантов) к проблемам океанологии и морской биологии, изучению биоресурсов арктических морей, освоению новых современных методик познания окружающего мира, а также развитию более тесных контактов между научной общественностью академических и ведомственных институтов и вузов Кольского Заполярья: ММБИ КНЦ РАН, МГТУ и ПИНРО. Школа проводилась уже в четвертый раз. В качестве докладчиков и слушателей в ней приняли участие около 200 студентов, аспирантов, школьников гимназий № 5 и № 9 г. Мурманска. Во время проведения Школы слушателям были предложены лекции ведущих ученых Мурманска и Санкт-Петербурга, посвященные истории становления морских биологических исследований в Арктике, современному состоянию биоресурсов Баренцева моря. Для школьников были подготовлены лекции и блицконкурс по вопросам общей биологии.

В рамках научного мероприятия состоялось 3 разных конкурса научных работ студентов, школьников и аспирантов. На базе Мурманского морского биологического института проходил конкурс научных работ аспирантов, в рамках которого было представлено 20 стендовых сообщений аспирантов ММБИ КНЦ РАН, МГТУ и ПИНРО. Конкурс начался с пленарного доклада «Экспедиционное изобразительное искусство на Кольском Севере. Ведущими учеными ММБИ И ПИНРО были прочитаны научно-популярные лекции: «Эволюционные и экологические аспекты паразитизма в морских биоценозах» и «Опыт генотипирования арктической трески баренцевоморской популяции». Победители научного конкурса получили памятные подарки. По материалам аспирантской сессии было принято решение выпустить сборник тезисов.

### **36-й ежегодный семинар «Физика авроральных явлений» ПГИ КНЦ РАН, 26 февраля – 1 марта 2013 г.**

В семинаре приняли участие около 80 чел. (из них более 30 – из других городов России) из 19 научно-исследовательских институтов и университетов. Было представлено 46 устных докладов и 61 стендовый. Надо отметить довольно большое представительство молодых ученых:

кафедра Физики Земли СПбГУ – 7 чел.; Отдел медико-биологических проблем КНЦ РАН – 5 чел.; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт – 2 чел.; Нижегородский и Калининградский университеты – по 1 чел.; Мурманский государственный технический университет – 1 чел. Больше всего молодых сотрудников, представлявших доклады, было от Полярного геофизического института КНЦ РАН (12 чел.).

Семинар посвящен обсуждению новейших результатов, полученных российскими учеными в области исследования геофизических процессов, наиболее интенсивно проявляющихся на широтах авроральной и субавроральных зон. Актуальность тематики семинара подтверждается большим количеством крупных международных проектов по исследованию ближнего космоса (в том числе международная программа Living With a Star, программы GEM и CEDAR, поддерживаемые Национальным научным фондом США, программа Международный гелиофизический год), а также большим числом международных ежегодных конференций по космо-геофизике. В то же время апатитский семинар является единственным регулярным мероприятием такого рода в России.

Тематика семинара:

#### *1. Магнитосферные бури и суббури:*

- теория геомагнитных бурь и суббурь (структура полярных сияний и ионосферных токов во время геомагнитных бурь и суббурь);

- результаты спутниковых исследований магнитосферных процессов во время суббурь.

#### *2. Плазменные оболочки Земли, токи в магнитосферно-ионосферной системе:*

- зоны вторжений авроральных частиц и структура магнитосферы;
- экспериментальное исследование и моделирование токовых систем и конвекции в магнитосферно-ионосферной системе;
- высокоширотная ионосфера.

3. *Волновые явления, взаимодействие волн и частиц в магнитосферно-ионосферной системе:*

- наземные и спутниковые исследования характеристик низкочастотных излучений;
- теория генерации низкочастотных волн в магнитосферной плазме;
- высыпания энергичных частиц и полярные сияния, связанные с генерацией низкочастотных излучений;

- исследования характеристик альфвеновского и шуманновского резонаторов.

4. *Процессы в системе Солнце–Земля, космическая погода:*

- рекуррентные потоки и солнечные вспышки (генерация, эффекты в солнечном ветре, в магнитосфере и атмосфере);

- космические лучи;
- приземный озон в высоких широтах;
- явления в глобальной атмосферной электрической цепи;
- влияние солнечной активности на атмосферные явления и биологические объекты.

Ежегодно издаются Труды семинара. В рамках конференции уже несколько лет проводится конкурс для молодых ученых с вручением диплома за лучшую публикацию.

**Адров Н.М. Дерюгинские рубежи морской биологии (к 135-летию со дня рождения К.М. Дерюгина) / Н.М. Адров; Муман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2013. 164 с.**

Монография посвящена научной, организаторской и педагогической деятельности классика морской биологии Константина Михайловича Дерюгина (1878–1938). Приводятся результаты его исследований Северного Ледовитого и Тихого океанов, Кольского залива и озера Могильного. Обсуждаются взаимосвязи адвективно-конвективных процессов и сезонной динамики жизненных циклов планктона, бентоса и нектона. Рассматриваются проблемы науки и образования в так называемый «дерюгинский период» (1920–1937 гг.) и последующие годы в научных учреждениях Севера и Дальнего Востока, в создании которых принимал участие ученый.

Книга предназначена широкому кругу читателей, интересующимся историей освоения океана, и специалистам, занимающимся проблемами выявления закономерностей взаимодействия океана, атмосферы и биосферы.

**История семьи Жидких на фоне поморской культуры: исследование и публикация по материалам Г.Ф. Белошицкой / общ. ред. и вступительная статья И.А. Разумовой; подготовка текстов, составление и комментарии О.В. Змеевой, И.А. Разумовой. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 184 с.**

Издание знакомит с историко-культурным наследием современной поморской семьи на примере потомков старинного рода Жидких из г. Кандалакша Мурманской области. Оно включает историю рода, написанную Г.Ф. Белошицкой (Жидких), и материалы семейного архива: фотографии, документы, описания детских игр послевоенных лет, тексты песен, исполнявшихся в кругу семьи, и др. Публикация текстов сопровождается аналитическими материалами, словарем этнографической и диалектной поморской лексики, историко-этнографическим и фольклористическим комментариями, которые представляют опыт отдельно взятой семьи в контексте отечественной истории и культуры.

Издание адресовано этнографам, фольклористам, историкам, студентам, обучающимся по гуманитарным специальностям, работникам образования и культуры, а также широкому читателю, который интересуется семейной историей, прошлым края и Кандалакши, поморской культурой.

**Кобылинская Г.В. Региональная инвестиционная система: тенденции развития и направления совершенствования / Г.В. Кобылинская, А.Н. Чапаргина. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 164 с.**

Исследуется комплекс проблем, связанных с функционированием и развитием инвестиционной системы, выявляется ее место в социально-экономическом развитии региона с учетом северной специфики, определяются возможные пути совершенствования инвестиционного процесса, направленные на реализацию существующих внутренних резервов регионального развития. Центральное место в монографии занимает исследование процессов финансового обеспечения инвестиционной деятельности в регионах сырьевой направленности с выявлением основных факторов, сдерживающих инвестиционную активность. Специфика проблем в регионах данного типа учитывается при разработке предложений по преобразованию инвестиционной сферы с целью повышения эффективности ее функционирования.

**Почвоведение на Кольском полуострове и соседних территориях (памяти проф. В.Н. Переверзева): материалы I Региональной конф. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 93 с.**

1-я Региональная научная конференция «Почвоведение на Кольском п-ове и соседних территориях» (памяти проф. В.Н. Переверзева) посвящена широкому кругу фундаментальных и прикладных проблем почвоведения северных регионов. В сборнике опубликованы материалы 20 докладов. Значительная часть докладов посвящена генетическим особенностям почв северных регионов (Кольский п-ов, Карелия, Архангельская область, Шпицберген) и вкладу профессора В.Н. Переверзева в изучение генезиса и географии почв Севера. Большое внимание участниками конференции было уделено микробиологическим исследованиям естественных и антропогенно нарушенных почв. На конференции также были затронуты различные методологические, методические и инновационные аспекты рекультивации нарушенных северных территорий; вопросы исследования почв в современном антропогенезе и лизиметрические исследования, как наиболее информативные показатели современных почвенных процессов.

**Приймак Т.И. Экологические аспекты гипергенеза минерального сырья в условиях Субарктики / Т.И. Приймак, А.П. Зосин, В.А. Маслобоев. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 108 с.**

При освоении минеральных ресурсов в условиях низкой ассимиляционной способности экосистем Севера не учитывается возможность восстановления природных ресурсов. Воздействие на среду обитания складываемых забалансовых руд, отходов обогащения, загрязненных сточных вод, а также фильтрационных вод хвостохранилищ обуславливает необходимость разработки природоохранных мероприятий, учитывающих низкие средние температуры региона, невозможность минерального и природного сырья.

На примере некоторых рудных предприятий Мурманского территориально-промышленного комплекса исследована современная ситуация с обращением с минерально-сырьевыми ресурсами и предложены способы решения возникающих экологических проблем.

**Птицы северных и южных морей России: фауна, экология) / [Отв. ред. П.Р. Макаревич]; Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 294 с.**

Приведены современные данные о видовом составе, численности, особенностях распределения и экологии птиц Баренцева, Белого, Азовского и Черного морей по материалам многолетних полевых и лабораторных исследований. Описаны и проанализированы сезонные и многолетние изменения орнитофауны на открытых акваториях северных и южных морей России. Проведена комплексная оценка состояния авифауны в традиционных районах гнездования и зимовки на побережье Мурмана и в южной части Азовского моря, показана ее зависимость от климатических условий, доступности пищевых объектов и антропогенного влияния. На примере серебристых чаек города Мурманска изучены основные черты феномена "синантропизации" морских птиц. Представлены результаты эколого-паразитологических исследований морских птиц Баренцева, Карского и Азовского морей, определена степень негативного воздействия гельминтов на организм птиц. Рассмотрена роль авивектора в распространении наземных членистоногих на побережье Черного и Азовского морей. Разработаны основы мониторинга морской орнитофауны.

Книга предназначена для специалистов в области орнитологии, морской биологии, биогеографии, паразитологии и охраны природы.

**Современный опыт проходки большепролетной выработки значительной протяженности в сложных горно-геологических условиях Хибинского массива / Н.Н. Мельников, В.П. Абрамчук, А.Ю. Педчик, В.В. Костенко, Ю.А. Епимахов, Н.Н. Абрамов, В.А. Фокин. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 145 с.**

Обобщен современный опыт проходки большепролетной выработки в сложных горно-геологических условиях Хибинского массива на примере проходки железнодорожного тоннеля № 2 рудника «Юкспор» ОАО «Апатит». Показано, что научное сопровождение проходки тоннеля совместно с новыми технологиями позволяет эффективно, быстро и безопасно завершить строительство тоннеля в плановые сроки.

Монография может быть полезна для инженерно-технических и научных работников, а также студентам и аспирантам горно-строительного профиля.

**Экономика Мурманской области: учебное пособие / Н.А. Серова, А.Ю. Омелай; под науч. ред. Т.П. Скуфьиной. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2013. 54 с.**

В учебном пособии раскрываются вопросы функционирования региональной экономики Мурманской области. Широкое использование статистических данных позволяет получить четкое представление об экономических процессах, протекающих в Мурманской области.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры современной России», № 2012-12.1-12-000-3002-007, «Формирование стратегических приоритетов развития российской Арктики»; гранта РГНФ и Правительства Мурманской области по региональному конкурсу «Русский Север: история, современность, перспективы», №12-12-51002а, «Экономика и социальная сфера Мурманской области: потери и достижения советского и постсоветского периода (на основе статистических оценок)».

Учебное пособие предназначено для школьников, студентов начальных курсов, учителей.



### **МАКАРОВА Елена Ивановна**

Окончила исторический ф-т Уральского государственного университета по специальности «Историк-архивовед» (1977). К.и.н. («Организация и использование документов Кольского научного центра Российской академии наук (1930-1995 гг.)», 2000). Работала в Свердловске инженером лаборатории научной организации труда ВНИИЭнергоцветмета (1977–1981); инженером группы технической документации треста «Апатитстрой» (1981–1985). В Кольском научном центре РАН с 1985 г. – зав. научным архивом, ст. научный сотрудник Центра гуманитарных проблем (с 2009). Специалист в области документалистики, документоведения и архивоведения. Осуществляет научно-методическое руководство системой документной и архивной служб КНЦ. В составе редколлегии участвует в подготовке научных изданий КНЦ – энциклопедических справочников, сборников и моноизданий редких архивных документов по истории Академии наук на Севере в XX в. Автор более 40 научных публикаций по архивному делу и истории КНЦ РАН в отечественных и зарубежных изданиях. Член ученого совета при ЦГП (с 2005), член «Комиссии при Администрации г. Апатиты по наименованию, переименованию проспектов, улиц, площадей и других частей города» (с 2002). Более 10 лет занимается преподавательской деятельностью, доцент кафедры истории и педагогики КФ ПетрГУ (с 2000). За вклад в гуманитарные исследования и активную общественную деятельность неоднократно отмечена Почетной грамотой КНЦ (2005), Благодарностью РАН (1999), Архива РАН (1986, 2003, 2008), Благодарственным письмом главы г. Апатиты (2000), Почетной грамотой Мурманской областной Думы (2008). Ветеран труда.



*Юбилеи*



### **МЕЛЬНИКОВ Николай Николаевич**

После окончания в 1960 г. Московского горного института Н.Н. Мельников работал в Соколово-Сарбайском ГОКе (1960–1962), Институте Гипроцветмет (1963–1964), Институте горного дела им. А.А. Скочинского (1965–1979), Департаменте горного дела, ресурсов и энергетики Канады (1971–1973), ВНИПИГорцветмете (1979–1980). Прошел путь от сменного инженера на Соколо-Сарбайском горно-обогатительном комбинате до главного инженера проекта фирмы Petrofina Canada Ltd, от научного сотрудника до первого зам. директора института ВНИПИГорцветмет. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию, в 1977 г. ему было присвоено звание профессора.



## Юбилеи

С 1981 г. и по настоящее время Н.Н. Мельников возглавляет Горный институт Кольского научного центра РАН. В 1990 г. избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1997 г. – действительным членом Российской академии наук. В 2010 г. избран действительным членом Академии инженерных наук Сербии.

Основными направлениями его научной и научно-организационной деятельности являются фундаментальные и прикладные исследования в области комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов и стратегического использования подземного пространства страны.

Результаты научных работ Н.Н. Мельникова внесли значительный вклад в развитие теории проектирования и планирования горного производства, совершенствования разработки месторождений в сложных горно-геологических условиях, создания новой техники и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих экологическую безопасность и экономическую эффективность горнопромышленных предприятий России.

Им созданы научные школы в области комплексного освоения рудных месторождений в сложных горно-геологических условиях с учетом сохранения природной среды; подземного строительства специальных объектов государственного назначения; использования подземного пространства страны для размещения объектов ядерной энергетики и захоронения РАО.

Николай Николаевич активно участвовал в крупных государственных программах СССР по развитию и техническому перевооружению горнодобывающей отрасли; он один из авторов проектов строительства Красноярского завода тяжелых экскаваторов, крупнейших Канско-Ачинского топливно-энергетического и Южно-Якутского угольного комплексов, ряда мощных карьерных (ЭКГ-20, ЭГ-12) и шагающих (ЭШ 13/50, ЭШ 40/85, ЭШ 65/100) экскаваторов, автор новых технологических схем драглайнового отвалообразования.

Н.Н. Мельников является организатором исследований в актуальном для горной промышленности научном направлении – создании основ строительства глубоких карьеров с вертикальными откосами; на основе разработанной концепции карьеров нового поколения научно обоснован переход на циклично-поточную технологию ведения горных работ. Этот подход открыл перспективу продления жизни на десятки лет для карьеров ОАО «Апатит» и ОАО «Ковдорский ГОК».

Под его руководством выполнен широкий спектр комплексных исследований по реализации крупного инновационного проекта строительства горно-обогатительного комбината на апатитнефелиновом месторождении «Олений ручей», осуществляемого ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания». Все основополагающие технологические решения, разработанные институтом под руководством Н.Н. Мельникова, были заложены в проекты рудника и обогатительной фабрики. Данный проект – от его идеи (2005 г.) до ввода в эксплуатацию I очереди комбината в 2012 г. – является результатом плодотворного сотрудничества академической науки и горнодобывающей промышленности.



Под его же руководством проводятся исследования по геодинамическому обоснованию безопасного освоения нефтегазовых месторождений Баренц-региона.

Н.Н. Мельников – научный руководитель крупномасштабных исследований в области подземного строительства специальных объектов государственного значения и работ по подземному захоронению радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива. Принимал участие в ряде международных проектов (ФРГ, Франция, Бельгия, Финляндия) по захоронению радиоактивных отходов. При ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС предложил концепцию и руководил разработкой проекта «Монолит» по долговременному захоронению аварийного блока (совместно с институтами Минатома). Под его руководством разработаны критерии выбора потенциальных площадок для размещения радиационно-опасных подземных объектов, созданы концептуальные проекты могильников и методы оценки их радиационной безопасности.

За более чем 30-летний период под руководством Н.Н. Мельникова Горный институт КНЦ РАН стал признанным лидером в области горных наук и имеет широкое международное признание. Институту принадлежит ведущая роль в развитии горнодобывающих предприятий российской части Европейского Севера. Высокий научный авторитет академика Н.Н. Мельникова подтверждается его научно-организационной деятельностью. Он является членом бюро Отделения наук о Земле РАН и научного совета РАН по проблемам горных наук, проблемам использования подземного пространства и подземного строительства, членом Президиума КНЦ РАН, возглавляет международные конференции по проблемам горной отрасли, является членом редколлегии журналов «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», «Горный журнал», «Инженерная экология», «Вестник Кольского научного центра РАН».

Большое внимание Н.Н. Мельников уделяет подготовке кадров высшей квалификации. Под его руководством в институте создан диссертационный совет (первый среди научных центров Северо-Запада России) по защите докторских и кандидатских диссертаций. Под его руководством 25 соискателей защитили диссертации кандидатов и докторов наук. Он принимает непосредственное участие в подготовке инженерных кадров, возглавляя кафедру горного дела и обогащения в Петрозаводском государственном университета и кафедру горного дела в Мурманском государственном техническом университете. Н.Н. Мельниковым опубликовано более 350 научных трудов, в том числе 23 монографии.

За заслуги в научной деятельности, плодотворную научную, инженерную и педагогическую работу Н.Н. Мельников награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени, орденом Почета. Он дважды лауреат премии Совета министров СССР, лауреат премии Правительства Российской Федерации, полный кавалер знака «Шахтерская слава», награжден золотым знаком «Горняк России».



Юбилеи



**8 июля 2013 г. ушел из жизни**

**ДУДКИН Олег Борисович**

После тяжелой болезни ушел из жизни один из старейших сотрудников Геологического института Олег Борисович Дудкин. Олег Борисович окончил геологический факультет Уральского государственного университета в 1954 г. Всю свою жизнь он посвятил изучению геологии и минералогии Кольского региона. Его основные научные интересы были связаны с изучением геологии, геохимии, минералогии полезных ископаемых, технологической минералогией, геоэкологией массивов, пород и руд уникальной Кольской щелочной провинции.

Олег Борисович Дудкин работал в Геологическом институте с 1954 г. В 1963 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Редкие земли и стронций апатита Хибинских месторождений», а в 1979 г. – докторскую диссертацию «Апатит и апатитоносность щелочных массивов». Начиная с 1982 г. он был заведующим лабораторией металлогении щелочных массивов, с 2002 г. – главным научным сотрудником. Олег Борисович исследовал минералогию Хибинских апатитовых месторождений, геохимию и процессы формирования месторождений фосфора в щелочных породах и карбонатитах. Он занимался анализом рудоносности Сыннырского калиевого щелочного массива (Северное Прибайкалье), исследовал карбонатиты Хибин, проводил сравнительное изучение карбонатитовых массивов Сокли (Финляндия), Ковдорского, Вуориярви и Озерной Вараки (Кольский регион), проделал большую работу по обобщению информации о щелочных массивах и карбонатитах восточной части Балтийского щита. Особое внимание Олег Борисович уделял анализу условий формирования месторождений рудного и нерудного сырья в ходе становления щелочных плутонов и теоретическому обоснованию принципов общей методологии технологической минералогии на примере месторождений щелочных массивов. В последние годы его интерес был сосредоточен на общем металлогеническом анализе Кольской щелочной провинции, геохимии эндогенных месторождений фосфора, на проблеме безопасного хранения и использования отходов обогащения минерального сырья. Исследования последних лет и собранные материалы позволили приступить к общему анализу геохимии фосфора в эндогенном процессе. На основе изучения инфильтрационных кор выветривания щелочных массивов Олег Борисович Дудкин проанализировал экологическую безопасность хранения складированных отходов после обогащения апатитовых руд и оценил их возможное влияние на экосистемы. Опубликовал более 120 научных работ, являлся профессором АФ МГТУ. Он награжден орденами Дружбы народов СССР (1980) и Почета (2002), является лауреатом премий Совета Министров СССР (1981) и им. А.Е. Ферсмана (1983).

Сотрудники геологического института будут помнить Олега Борисовича как выдающегося геолога, минералога, интересного человека. Светлая память об Олеге Борисовиче Дудкине навсегда останется в сердцах его коллег.

2013. № 2

*Herald of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*

ISSN 2307-5228

**NATURAL AND TECHNICAL SCIENCES**

A.A. Predovsky, I.V. Chickiryov, D.A. Nekipelov	Rift Zones and Riftogenes from the Typology of Crust Structures.....	3
N.E. Kozlov, E.V. Martynov, N.O. Sorokhtin	Formation Conditions' Reconstruction for Early Precambrian Complexes (New Approaches).....	9
A.I. Kalashnik, D.V. Zaporozhets, N.A. Kalashnik	Identification of Filtration-Deformation Processes in the Body of Protecting Dam of Enrichment Tails Store .....	14
P.V. Amosov	Numerical Simulation of Temperature Distribution of a Radiating Plate.....	19
N.A. Kalashnik	On Social and Economic Consequences of Failures at Shelf Oil and Gas Development.....	24
N.M. Adrov	Marine Biologists to Chemistry of the Ocean .....	28
S.I. Bardan, B.M. Dolgonosov	Formation of a Lamellar Structure in the River–Sea Mixing Zone: Theoretical Analysis of the In-situ Data.....	38
A.A. Martynova, S.V. Pryanichnikov, V.V. Pozharskaya, N.K. Belisheva	Adaptation of Northern Children to the Middle Latitudes (Exemplified with the Health Centre "Ecovit" of the KSC RAS, Voronezh Region) Under Various Levels of Geomagnetic Activity	57
S.I. Pechenyuk	The Sorption Study of Platinum Metal Anionic Complexes.....	67
V.C. Roldugin	One Possibility to Study a Magnetospheric Response to Active Influence.....	78
V.F. Skorokhodov, R.M. Nikitin, E.D. Rukhlenko, E.G. Veselova	Assessment of Flotation Properties of Feed Sample Components from a Main Nepheline Flotation for a Computing Experiment.....	82
N.N. Abramov, Yu.A. Epimakhov, E.V. Kabeev	Quality Assessment of Ground Dams' compaction by a Non-Destructive Seismic-Tomographic Method.....	95
E.P. Bashmakova, V.S. Selin	Development of the Russian Arctic' Economic Space Based on Enhancement of the Oil and Gas Complex.....	101
S.S. Tuinova	Scenario Forecast for Alternative Energy in Northern Russia.....	113
	<b>CONFERENCES, WORKSHOPS</b> .....	119
	<b>NEW BOOKS</b> .....	128
	<b>ANNIVERSARIES</b> .....	130
	<b>LOSSES OF OUR SCIENCE</b> .....	133
	<b>CONTENTS</b> .....	134

**A.A. Predovsky, I.V. Chickiryov, D.A. Nekipelov**

#### **RIFT ZONES AND RIFTOGENES FROM THE TYPOLOGY OF CRUST STRUCTURES**

The study is based on the morphostructural analysis and on the idea of mantle-crust interaction. The rift systems of continental and oceanic types are characterized.

*Keywords: rift zones, mantle-crust interaction, typology of crust structures.*

**N.E. Kozlov, E.V. Martynov, N.O. Sorokhtin**

#### **FORMATION CONDITIONS' RECONSTRUCTION FOR EARLY PRECAMBRIAN COMPLEXES (NEW APPROACHES)**

The paper discusses the problems of reconstruction proto nature and conditions of formation of complexes of ancient protoliths. Attention is drawn to the fact that the processes of developing nonlinear evolution of the Earth, which imposes restrictions on the use of the principle of actualism. A technique for data processing and interpretation, taking into account changes in the chemical composition of the mantle. An example of the use of an amendment to the evolution of matter in the reconstruction of a primary nature and conditions of formation of protoliths of early Precambrian complexes.

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

**A.I. Kalashnik, D.V. Zaporozhets, N.A. Kalashnik**

#### **IDENTIFICATION OF FILTRATION-DEFORMATION PROCESSES IN THE BODY OF PROTECTING DAM OF ENRICHMENT TAILS STORE**

Regime georadar researches of structure of a dam store of Enrichment tails with a view of identification of filtratsionno-deformation processes in its body are executed. During the supervision, made about two months, it is allocated three types of a condition and various filtrational heterogeneity soils dams: insignificant fall of a water level; considerable fall of a water level and practically without change. The zone underground suffusion washout soils is revealed and tracked in dynamics.

*Keywords: georadar researches, dam, filtratsionno-deformation processes, suffusion washout.*

**P.V. Amosov**

#### **NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A RADIATING PLATE**

A well-known method of heat generation release out of space module board by means of fridge-radiators is analyzed using numerical simulation. Examples of numerical solutions for thermal problems containing definite set of variable parameters (material, sizes and emittance of a surface) are presented. The comparison of the results of numerical simulation and their analytical estimates were in satisfactory fit for the plate minimal temperature. Influence of the length, width and emittance on the minimal temperature is shown for the iron plate.

*Keywords: radiation in vacuum, numerical simulation, thermalphysic parameters.*

**N.A. Kalashnik**

#### **ON SOCIAL AND ECONOMIC CONSEQUENCES OF FAILURES AT SHELF OIL AND GAS DEVELOPMENT**

The most typical cases of extreme situations and failures are considered at shelf oil and gas development. The statistical analysis of events and the social and economic damage caused by them is made. Methodical approaches to an economic estimation of consequences of emergencies and expected profit oil and gas development taking into account risk of extreme situations and failures are offered.

*Keywords: oil and gas development, a shelf, failures, social and economic consequences.*

**N.M. Adrov**

#### **MARINE BIOLOGISTS TO CHEMISTRY OF THE OCEAN**

The main indices of the biohydrochemistry regime of water masses, namely linear connections of concentration of dissolved oxygen and temperature of water, revealed in different layers of the aqueous depths of the ocean, are examined based on an example of bio-oceanological studies. A model is proposed for evaluating physical and biochemical components of the thermo-oxygen transformation of water masses.

*Keywords: biohydrochemistry regime, thermo-oxygen transformation, advection, convection, oxygen budget, saturation hysteresis.*

**S.I. Bardan, B.M. Dolgonosov**

**FORMATION OF A LAMELLAR STRUCTURE IN THE RIVER–SEA MIXING ZONE:  
THEORETICAL ANALYSIS OF THE IN-SITU DATA**

The transfer of dissolved salts in the river–sea mixing zone is considered. It was detected that a lamellar structure appears at the site of initial contact of the waters of different genesis. Layers of this structure then expand to both sides from the initial contact surface represented by the layer of intermediate mixture with salinity 24.7‰. It is shown that interfaces between layers with differently diluted marine waters undergo permanent stretching that induces liquid micro-flows to each interface from both sides. This leads to restraining diffusion and tends to prolong conservation of the lamellar structure in the mixing zone. A convective-diffusion problem in the contact region of solutions is formulated and analyzed that allows us to explain a sequence of environments forming a cascade of physicochemical barriers in the river–sea mixing zone. Results of the in-situ measurements in the Kola Bay support the theoretical conclusions.

*Keywords: river–sea mixing zone, lamellar structure, convective-diffusion transfer, solution interface stretching, effect of restraining diffusion, fractal scale-invariant relief.*

**A.A. Martynova, S.V. Pryanichnikov, V.V. Pozharskaya, N.K. Belisheva**

**ADAPTATION OF NORTHERN CHILDREN TO THE MIDDLE LATITUDES (EXEMPLIFIED WITH THE  
HEALTH CENTRE "ECOVIT" OF THE KSC RAS, VORONEZH REGION)  
UNDER VARIOUS LEVELS OF GEOMAGNETIC ACTIVITY**

The results of the study of adaptation features of Northern children to the influence of the middle latitudes (during their stay in the health center "Ecovit" of the KSC RAS in Voronezh region) under various levels of geomagnetic activity are presented. It is shown that the process of adaptation has been satisfactory for 47% of children. For 53% of children, the adaptation to this environment resulted in more than normal stress of the regulation systems with involving some additional functional reserves of the cardiovascular system. Psycho-physiological and psycho-emotional state of Northern children was proved to be highly dependent on variations of geophysical agents, their health is vulnerable under change of the latitude, climatic and geographical zones.

*Keywords: adaptation of Northern children, high and middle latitudes, psycho-physiological state, variations of geophysical agents.*

**S.I. Pechenyuk**

**THE SORPTION STUDY OF PLATINUM METAL ANIONIC COMPLEXES**

*The main results of systematical fundamental investigation about platinum metal complex anions sorption with rare earth element and iron (III) oxyhydroxides are presented. The concept of heterogeneous hydrolysis is formulated as a specific mechanism of sorption processes.*

*Keywords: sorption, sorption complex, homogeneous and heterogeneous hydrolysis, sorption kinetics, rate constant, extraction, sorption mechanism.*

**V.C. Roldugin**

**ONE POSSIBILITY TO STUDY A MAGNETOSPHERIC RESPONSE TO ACTIVE INFLUENCE**

In 1975 two separate TV cameras visualized a luminous patch of about 12 km size and duration less than 1s at 100 km altitude over Archangelsk region. This luminosity was caused by antenna breakdown of the powerful HF transmitter. The phenomenon has a close similarity to the particle precipitation from the magnetosphere initiated by lightning.

*Keywords: lightning, magnetosphere, particle precipitation.*

**V.F. Skorokhodov, R.M. Nikitin, E.D. Rukhlenko, E.G. Veselova**

**ASSESSMENT OF FLOTATION PROPERTIES OF FEED SAMPLE COMPONENTS  
FROM MAIN NEPHELINE FLOTATION BY COMPUTING EXPERIMENT**

The method has been developed to assess flotation properties of feeding components from a rough (reverse) nepheline flotation. This method allows formulating the integral properties of pseudo phases for multispeed multiphase flotation continuum within a computing experiment. The experiment was carried out with CFD (Computational Fluid Dynamics) model of a heterogenic flotation system adapted to the operational aspects of the flotation techniques.

*Keywords: CFD model, heterogenic system, flotation, nepheline concentrate.*

**N.N. Abramov, Yu.A. Epimakhov, E.V. Kabeev**

**QUALITY ASSESSMENT OF GROUND DAMS' COMPACTION  
BY A NON-DESTRUCTIVE SEISMIC-TOMOGRAPHIC METHOD**

Based on the requirements of providing an environmental safety during mining operations, the mining enterprises of the Kola Peninsula widely use such safety constructions as ground dams. Their safe and accident-free functioning directly depends on a possibility of occurrence of decompaction zones in grounds strata during building and following maintenance of those constructions. The dams' grounds compaction during the technological construction cycle is proposed to assess the quality by a criteria based on interrelation of seismic wave's parameters with grounds compaction by seismic tomography method. The paper presents the method and results of its application during constructing the «Oleniy Ruchey» dam belonging to "NWPC" JSC.

*Keywords: compaction of grounds, seismic tomography, wave velocity, permissible range, physical-mechanical properties.*

**E.P. Bashmakova, V.S. Selin**

**DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN ARCTIC' ECONOMIC SPACE BASED  
ON ENHANCEMENT OF THE OIL AND GAS COMPLEX**

Spatial aspects of economic development of the Russian North and Arctic regions and role of the oil and gas industry therein are discussed. The analysis of the strengths, weaknesses, threats and opportunities for the positive dynamics of the industry is done. The main technical- technological and organizational capabilities of hydrocarbons in the Arctic shelf are substantiated.

*Keywords: economy, North, Arctic, space, oil, gas, hydrocarbons, complex cluster, modernization, innovation.*

**S.S. Tuinova**

**SCENARIO FORECAST FOR ALTERNATIVE ENERGY IN NORTHERN RUSSIA**

Here is an attempt to predict different scenarios for alternative power engineering in Russian Northern Region. These four scenarios are built on the base of General Theory of Management. Some legal and institutional recommendations for the state and local authorities are given.

*Keywords: alternative energy, scenarios, prognosis.*