Российская Академия Наук

ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

1/2015

1/2015(20)
издается с декабря 2009 года
ISSN 2307-5228
ISBN 978-5-91137-298-9

Российская Академия Наук

ВЕСТНИК
Кольского научного центра РАН

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр РАН

И.о. главного редактора:
д.г.-м.н. В.П. Петров,
заместитель главного редактора
д.т.н. А.Я. Фридман (руководитель редакции)

Редакционный совет:
академик Г.Г. Матишов,
академик Н.Н. Мельников,
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 (отв. секретарь)

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

ISSN 2307-5228 ISBN 978-5-91137-298-9

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Н.Н. Мельников П.В. Амосов, Н.В. Новожилова	Исследование теплового состояния многолетнемерзлых горных пород на объекте подземной изоляции ОЯТ Билибинской АЭС…..…….....	3
В.Т. Филатова, В.П. Петров	Геофизические неоднородности Кейвского блока и их геологическая природа…….……....	19
Е.Д. Терещенко А.Н. Миличенко, М.В. Швец, С.М. Черняков, И.В.Кораблёва	Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС…….....	32
В.А. Любчич, В.Ф. Григорьев, Р.Ю. Юрик	Глубинное электромагнитное зондирование мощного низкоомного осадочного чехла северной части Западно-Сибирской платформы……	44
А.П. Жичкин	Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей…….....	55
Д.В. Моисеев, М.С. Громов	Гидрометеорологические условия в губе Долгой Баренцева моря……..	65
Е.В. Смирнова О.В. Карамушко	Пространственное распределение и некоторые черты биологии чернобрюхого липариса *Liparis* cf. *fabricii* Krøyer, 1847 в Карском море……..	78
П.А.Кашулин, Н.В.Калачёва	Суточные ритмы фотосинтеза и холодоустойчивость растений……..	85
С.В. Асминг, Н.Р. Кириллова	К характеристике некоторых приречных травяных болот в центральной части Мурманской области..……..……	92
В.А. Даувальтер Н.А. Кашулин	Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран…..……..	101
В.И. Демин, А.Р. Анциферова О.И. Мокротоварова	Изменения температуры воздуха в Мурманске с начала XIX в.....	113
В.А. Мязин	Определение остаточного содержания углеводородов и продуктов их трансформации при загрязнении окультуренных подзолистых почв в Евро-Арктическом регионе…….……..	126
М.А. Тараканов	Опыт интеграции науки и производства в Мурманской области в XI пятилетке (1981–1985)…….	132
А.Г. Олейник, А.В. Харитонов	Результаты выполнения проекта «Исследование методов и алгоритмов защиты информации на основе биометрической идентификации личности пользователя в системах информационного обеспечения развития территорий арктической зоны Российской Федерации»……	146
	КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ……..	158
	НОВЫЕ КНИГИ……..	160
	ЮБИЛЯРЫ……..	162
	AD MEMORIAM……...	169
	CONTENTS……..	173

Редколлегия:

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

УДК 624.030.7:551.34:51-37

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОБЪЕКТЕ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ БИЛИБИНСКОЙ АЭС

Н.Н. Мельников, П.В. Амосов, Н.В. Новожилова
Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Приведены результаты численного моделирования теплового состояния многолетнемерзлых горных пород с учетом фазового перехода «вода – лед» на объекте подземной изоляции ОЯТ Билибинской АЭС. Проанализированы три схемы захоронения ОЯТ в чехлах длительного хранения (по глубине вмещающего массива) – в два, три и четыре яруса. Для каждой схемы захоронения определено время выдержки ОЯТ, при котором обеспечивается безопасная зона оттаивания между смежными скважинами. Выполнен анализ пространственно-временных распределений температуры при вариации радиуса скважины и коэффициента теплопроводности материала-заполнителя. Отмечены особенности динамики температуры в областях модели, и оценены размеры зон оттаивания во вмещающем массиве.

Ключевые слова:

моделирование, захоронение ОЯТ, многолетнемерзлые горные породы, учет фазового перехода «вода – лед», динамика распределения температуры, время выдержки.

Введение

Известно, что к 2020 г. все энергоблоки Билибинской АЭС (БилАЭС) будут выведены из эксплуатации, а значит, в ближайшее время нужно принять окончательное решение о судьбе накопившегося (не перерабатываемого на данный момент) отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

В 2011 г. Росатомом рассматривалось три варианта обращения с ОЯТ БилАЭС [1–3]:

- хранение отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в бассейнах выдержки;
- вывоз на переработку;
- захоронение в многолетнемерзлых горных породах (ММГП).

В 2012 г. количество вариантов сократилось до двух последних и, наконец, в 2013 г. остался только единственный вариант – вывоз на переработку [4]. Тем не менее, авторы постарались довести до конца запланированный еще в 2011 г. цикл исследований и представляют научной общественности свои обобщенные результаты.

Вариант захоронения ОЯТ экономически менее затратен и – с учетом огромного опыта по созданию инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты – наиболее реализуем (см. рис. 1). Для авторов вариант с подземной изоляцией ОЯТ интересен с научной точки зрения, поскольку необходимо рассматривать тепловую задачу с учетом фазового перехода «вода – лед». В материалах открытой печати практически полностью отсутствует информация касательно теплофизических параметров объекта подземной изоляции ОЯТ и подробных результатов оценки теплового состояния вмещающего массива [2, 3, 5]. В попытке восполнить нехватку подобной информации авторы опубликовали первые результаты своих исследований по данной проблеме в работе [6].

Необходимо отметить, что сама проблема создания подземных объектов в условиях вечной мерзлоты и размещения тепловыделяющих радиационно-опасных материалов в ММГП в достаточной мере исследована как специалистами России (Э.Д. Ершов, А.Н. Казаков, О.М. Лисицына, С.Ю. Пармузин, Н.Ф. Лобанов, А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов и др. [7–11]), так и зарубежными учеными (V.J. Lunardini [12], P.J. Williams, M.W. Smith и др.).

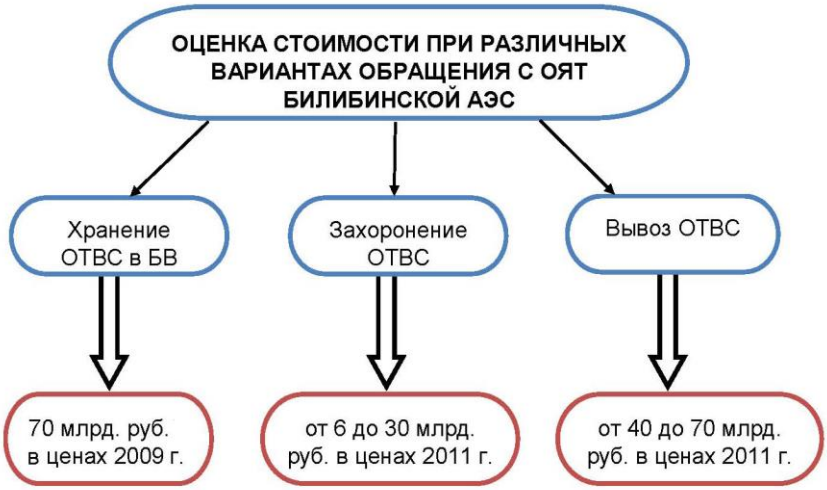


Рис. 1. Потенциальные варианты обращения с ОЯТ БилАЭС

Параметры объекта захоронения отработавшего ядерного топлива

Вечная мерзлота в районе расположения БилАЭС создает благоприятные условия для создания опытно-промышленного объекта (ОПО) подземной изоляции ОЯТ (штольневого или скважинного типа). Как уже отмечалось выше, информация по теплофизическим моделям ОПО весьма скудная. Выполненный авторами анализ материалов научных журналов и презентаций, представленных сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского и проектного института (ВНИИПИ) «ВНИПИпромтехнологии» (Н.Ф. Лобанов [2], С.Б. Карапетян [3]) на конференциях 2011–2012 гг., позволил прийти к некоторым умозаключениям, на основе которых обоснован ряд параметров теплофизической модели.

Следуя идее специалистов ВНИПИпромтехнологии [2, 3], 8240 ОТВС (такое количество планируется отправить на захоронение после вывода из эксплуатации БилАЭС) можно разместить примерно в 1200 чехлах длительного хранения (ЧДХ). Габариты ЧДХ следующие: высота – 4 м, диаметр – 0.45 м. В свою очередь, ЧДХ для варианта ОПО штольневого типа помещаются в 20 горизонтальных выработок (длина рабочей зоны порядка 155 м). Но тогда в скважинах основания каждой выработки (диаметр скважины 1 м) теоретически возможно расположить 60 ЧДХ несколькими способами (параметры ММГП в районе БилАЭС позволяют использовать многоярусное размещение источников тепловыделений) (рис. 2):

- в один ярус (с шагом около 2.5 м);
- в два яруса (с шагом около 5 м);
- в три яруса (с шагом около 8 м);
- в четыре яруса (с шагом около 10 м).

Достаточно очевидно, что вариант одноярусного размещения ЧДХ с ОТВС практически невозможен по горнотехническим условиям (чрезвычайно плотное расположение скважин). А вот остальные варианты представляются вполне технически реализуемыми. Размер зон оттаивания будет определяться величиной тепловыделений топлива, зависящей от времени выдержки ОЯТ до его размещения в ММГП.

Таким образом, можно поставить **задачу I** по установлению того минимального времени выдержки ОЯТ, которое обеспечивает минимальные размеры зон оттаивания для двух-, трех- и четырехъярусного размещения ЧДХ. При этом в качестве критерия «опасности/безопасности» может выступать ситуация поярусного смыкания талых пород вдоль выработки между смежными скважинами. В зависимости от выбранной схемы размещения именно в таком случае размер зоны оттаивания становится значимой величиной, превышая 10–20 м.

Кроме того, весьма интересна **задача II** по изучению теплового состояния ММГП в зависимости от радиуса скважины и коэффициента теплопроводности материала-заполнителя.

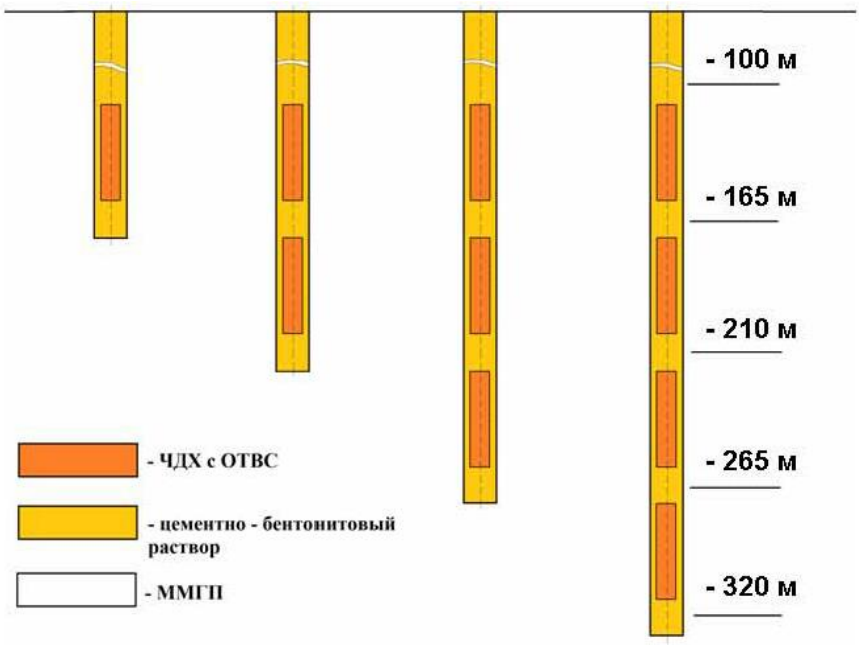


Рис. 2. Принципиальные мультиярусные схемы размещения ЧДХ с ОТВС в скважине

Более подробно авторами проанализирован вариант трехъярусного размещения ОЯТ, который, как можно понять из данных работы [2], являлся базовым.

I. Время выдержки отработавшего ядерного топлива

Параметры модели и «инструмент» исследования

Просматриваются очевидные три зоны модели (см. рис. 2): 1) ММГП; 2) материал-заполнитель в скважинах (цементно-бентонитовый раствор); 3) ЧДХ+ОТВС. Последняя область, предполагаемая в тепловой задаче гомогенной, наиболее сложна с позиций обоснования теплофизических параметров.

Анализ геометрических и массовых параметров ЧДХ и ОТВС БилАЭС [2, 3, 13], а также теплофизических свойств материалов [14] позволил авторам через «взвешивание» [15] определиться с необходимыми для модели значениями эффективных параметров зоны ЧДХ+ОТВС: коэффициент теплопроводности – 0.27 Вт/(м·К), удельная теплоемкость – 890 Дж/(кг·К), плотность – 1445 кг/м^3.

Теплофизические параметры вмещающего массива и материала-заполнителя выбраны следующими: коэффициент теплопроводности – 1.8 и 0.8 Вт/(м·К), удельная теплоемкость – 800 и 800 Дж/(кг·К), плотность – 2200 и 1500 кг/м^3. Значение пористости ММГП принято равным 10 %, а материала-заполнителя – 15 %.

Опираясь на данные работы [16], с помощью степенной функции удалось описать мощность остаточного энерговыделения (МОЭ) W (Вт) одной ОТВС БилАЭС через год после

выгрузки из реактора $W = 62.73 \cdot x^{-0.47}$, где x – годы ($x \geq 1$). Тогда кривая объемной МОЭ q_v (Вт/м^3) через год после выгрузки из реактора имеет аналитическое описание вида $q_v = 690 \cdot (t+k)^{-0.47}$, где t – время моделирования; k – время выдержки до захоронения (годы).

Основным «инструментом» выполнения численных экспериментов выступал код COMSOL. В принципе, можно было воспользоваться либо программным продуктом PORFLOW, либо программой, разработанной авторами для оценки воздействия подземных атомных станций малой мощности на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Все указанные программные продукты позволяют путем использования различных модельных представлений симулировать тепловые процессы с учетом фазового перехода «вода – лед». Очень похоже, что, как и в программном продукте А.Н. Казакова [9], используемые авторами коды построены в целом на близких допущениях:

• «окружающая среда предполагается макроскопически однородной по всем характеристикам, причем ее поровое пространство заполнено льдом, а после фазового перехода – водой» [9];

• «не учитывается зависимость теплофизических свойств горного массива от температуры как в мерзлом, так и в талом состоянии» [9].

Например, разработчики программного продукта PORFLOW задействовали модель Дж.А. Уиллера (J.A. Wheeler) [17]. Код COMSOL и собственная программа авторов реализуют широко известный прием преобразования исходной нелинейной системы уравнений к квазилинейному виду посредством ввода дельта-функции Дирака, которая при численной реализации заменяется дельта-образной функцией, отличной от нуля на интервале фазового перехода и удовлетворяющей стандартному условию нормировки. Исчерпывающее описание указанной операции, помимо классической работы А.А. Самарского и П.Н. Вабищевича [18], авторы нашли в коллективных монографиях сотрудников Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН [10, 11]. Именно этот алгоритм был реализован в программном продукте.

Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов, выполненных посредством указанных программ, показал приемлемую сходимость результатов численных экспериментов [19]. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать информацию в требуемой графической форме.

Для прогнозной оценки теплового состояния ММГП предлагается рассмотреть самую консервативную в тепловом отношении ситуацию. Для этого моделируется тепловое состояние вмещающего массива с единственной скважиной, содержащей «свежее» ОЯТ (топливо выводимое из эксплуатации энергоблока с не менее чем годовым сроком размещения в бассейне выдержки). Анализируемая скважина симметрично (как вдоль выработки (ось X), так и в поперечном горизонтальном направлении (ось Y) окружена смежными аналогичными скважинами. Только в такой постановке можно достаточно физично задать краевые условия на внешних боковых поверхностях модели (рис. 3). Именно боковые границы, как ближайшие к источнику тепловыделений, будут в первую очередь влиять на тепловое состояние ММГП. В ситуациях несимметричного размещения ОТВС тепловая нагрузка на вмещающий массив будет меньше (через сток тепла). Условие симметричного расположения в смежных скважинах именно «свежего» ОЯТ позволяет задавать на внешних боковых границах модели условие нулевого теплового потока. Для верхней и нижней границ модели использовано условие Дирихле – фиксированные значения температур, характерные для ММГП на глубинах -100 и -265 м района БилАЭС: -4.3 и -2.2 °С соответственно. Задание начальных условий в выполненном исследовании упрощено. В частности, вся толща ММГП разбита на 3 слоя (хорошо видно на рис. 3), в каждом из которых задавалась постоянная температура с учетом обозначенных температур на нижней и верхней границах области моделирования.

Для материала-заполнителя принята температура на уровне -2 °С (предполагается, что в процессе размещения ЧДХ с ОТВС в скважине и дальнейшем запечатывании выработки материал успеет охладиться).

В выполненном исследовании временной интервал моделирования составлял 20–25 лет.

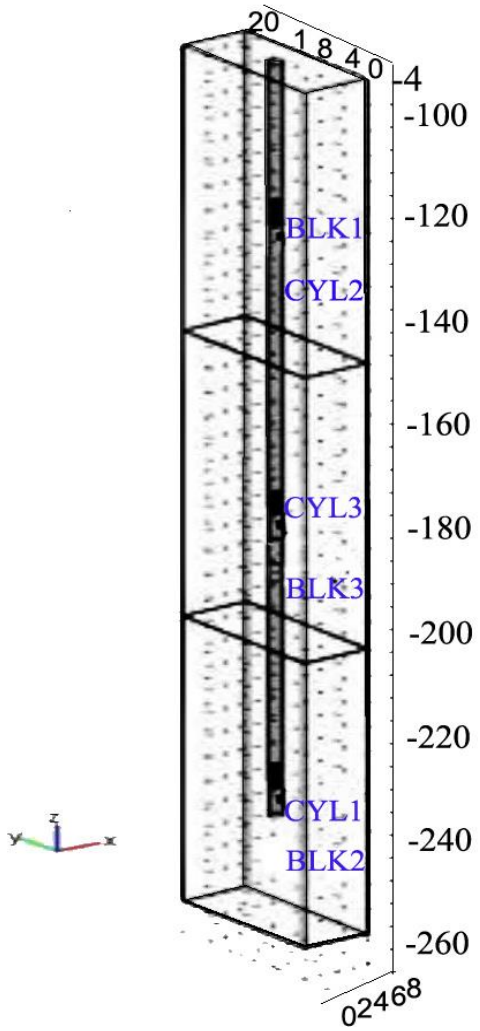


Рис. 3. Геометрический вид модели скважины с трехъярусным размещением ЧДХ с ОТВС

Анализ результатов численных экспериментов при трехъярусном (базовом) размещении отработавшего ядерного топлива

Анализ теплового состояния ММГП выполнялся по трем пространственным направлениям для трех значений времени выдержки ОЯТ – 1, 5 и 9 лет.

1. *Вдоль вертикальной оси Z (расстояние между ЧДХ почти 50 м).* Динамика распределения температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через все ЧДХ с ОТВС со временем выдержки в 1 год, указывает (см. рис. 4; цифры в легенде – годы), что максимальные температуры разогрева прогнозируются в области центрального ЧДХ.

Отметим, что приведенная графическая информация (кривая на момент времени 0 лет) указывает на недостаточно корректное описание в модели начальных условий. В нашем случае одинаковая температура приписывается поярусно (три слоя ММГП толщиной 55 м каждый).

Чтобы обеспечить распределение профиля начальной температуры по высоте на анализируемых глубинах в соответствии с геотермическим градиентом, в используемом программном продукте потребуется использовать тонкие слои ММГП. Принципиально это реализуемо, но утяжеляет расчетный модуль. В данном случае, учитывая заметную удаленность источника от верхней границы (порядка 20 м) с фиксированной отрицательной температурой, это не принципиально по конечному результату.

Из анализа вертикального распределения температуры максимально опасного в тепловом воздействии ОЯТ следует, что смыкания талых пород вдоль вертикальной оси не прогнозируется. Состояние максимального разогрева топлива ожидается примерно через 4 года после захоронения. А вот материал-заполнитель в скважине будет подвергаться пусть и менее значительному, но разогреву в течение примерно 16 лет.

2. *Вдоль горизонтальной оси Y (расстояние между выработками 20 м)*. Как показал анализ результатов расчетов, динамика пространственного распределения температуры вдоль горизонтальной оси *Y* даже для минимального времени выдержки ОЯТ в один год свидетельствует, что смыкания талых пород между выработками не прогнозируется. Максимальная глубина оттаивания в этой ситуации оценивается на уровне 5.7 м примерно через 20 лет после запечатывания. Естественно, что при бóльшем времени выдержки ОЯТ значения глубины оттаивания будут снижаться.

3. *Вдоль горизонтальной оси X (расстояние вдоль выработки между скважинами 8 м).* Динамика пространственного распределения температуры представлена на рис. 5, для обозначенных выше времен выдержки отработавшего ядерного топлива. Смыкания талых пород не прогнозируется только для времени выдержки ОЯТ в 9 лет (рис. 5 в), глубина оттаивания составляет 2.1 м. Дополнительный расчет для времени выдержки 7 лет показал, что

в этой ситуации также не ожидается смыкания талых пород, а глубина оттаивания увеличивается до 2.3 м.

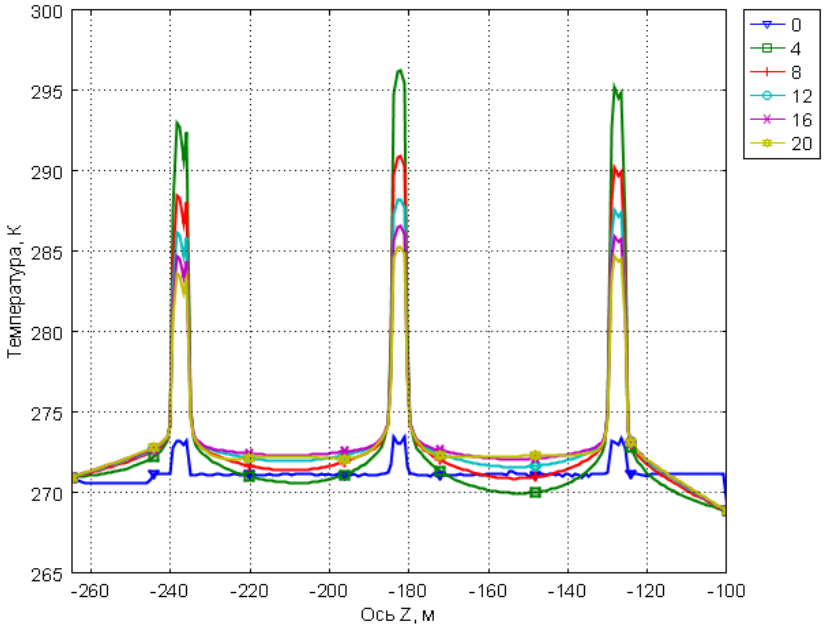


Рис. 4. Динамика пространственного распределения температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через все ЧДХ (время выдержки ОЯТ 1 год)

При меньшем времени выдержки топлива (1–5 лет) (см. рис. 5 а, б) результаты моделирования свидетельствуют о смыкании вдоль оси *X* талых пород смежных ЧДХ с ОТВС. Продолжительность такого смыкания при минимальном времени выдержки существенно превышает 20 лет, а при 5 годах выдержки составляет примерно 22–24 года. При этом линейные размеры зон оттаивания вдоль оси *X* могут достигать 20 м и более.

Представленная графическая информация позволяет проанализировать динамику максимальных температур в области размещения ОЯТ в зависимости от времени выдержки (рис. 5). Для времени выдержки ОЯТ 1, 5 и 9 лет прогнозируется постепенное (но не линейное) снижение максимальных температур – 300, 292.5 и 288.5 К соответственно.

Выполненные оценки по контролю теплового состояния ММГП вблизи центрального ЧДХ позволяют констатировать, что для предотвращения образования крупных областей талых пород есть смысл размещать в опытно-промышленном объекте подземной изоляции ОЯТ БилАЭС, по крайней мере, через 7–9 лет выдержки. Именно при таких сроках выдержки и принятых геометрических и теплофизических параметрах возможно образование локальных областей талых пород вблизи ЧДХ с ОЯТ на ограниченный период времени. Поскольку целостность ЧДХ на протяжении порядка 50 лет гарантирована разработчиками, то есть уверенность в обеспечении безопасной изоляции накопленной радиоактивности в ММГП района БилАЭС.

В соответствии с исследованиями температурных полей вблизи скважины захоронения ЧДХ с ОТВС специалистами по криолитозоне [7–11], образования трещин или разуплотнения пород не должно произойти, хотя авторы указанных работ и утверждают, что принципиально возможно изменение изоляционных свойств оттаявших пород. Но этот момент не является целью данного исследования.

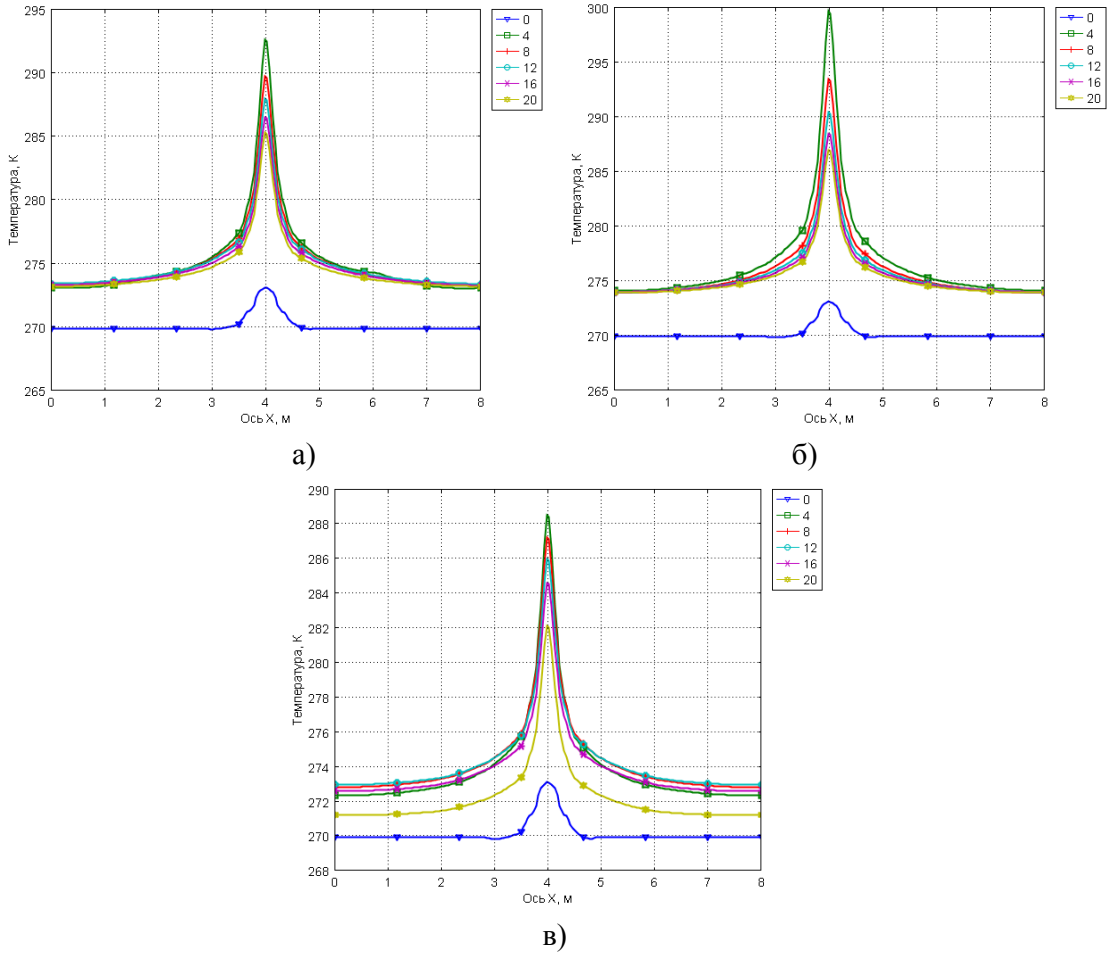


Рис. 5. Динамика пространственного распределения температуры вдоль горизонтальной оси X (расстояние между скважинами в выработке 8 м). Время выдержки: а) – 1 год; б) – 5 лет; в) – 9 лет

Кроме того, полученные результаты о размерах зон оттаивания и времени выдержки ОЯТ практически совпадают со значениями указанных параметров в докладе Н.Ф. Лобанова [2]. Это позволяет с определенной долей уверенности предлагать освоенный «инструмент» для анализа теплового состояния ММГП при других проектных решениях (двух- или четырехъярусное размещение ЧДХ с ОТВС).

Для коэффициента теплопроводности материала-заполнителя (время выдержки ОЯТ 1 год) оценены коэффициенты чувствительности температуры этого материала вблизи всех ЧДХ вдоль вертикальной оси (см. рис. 3). Оказалось, что нормализованные коэффициенты чувствительности [20] изменяются во времени. Если для первой временнóй контрольной точки (4 года) коэффициенты чувствительности нулевые, то для 16 лет процесса моделирования их знак отрицателен, что соответствует физике процесса, а уровень значений составляет примерно 0.05 %. Данный факт следует расценивать следующим образом: влияние коэффициента теплопроводности на температуру материала-заполнителя достаточно слабое. Увеличение коэффициента теплопроводности на 1 % вызывает уменьшение температуры в точках наблюдения всего на 0.05 %.

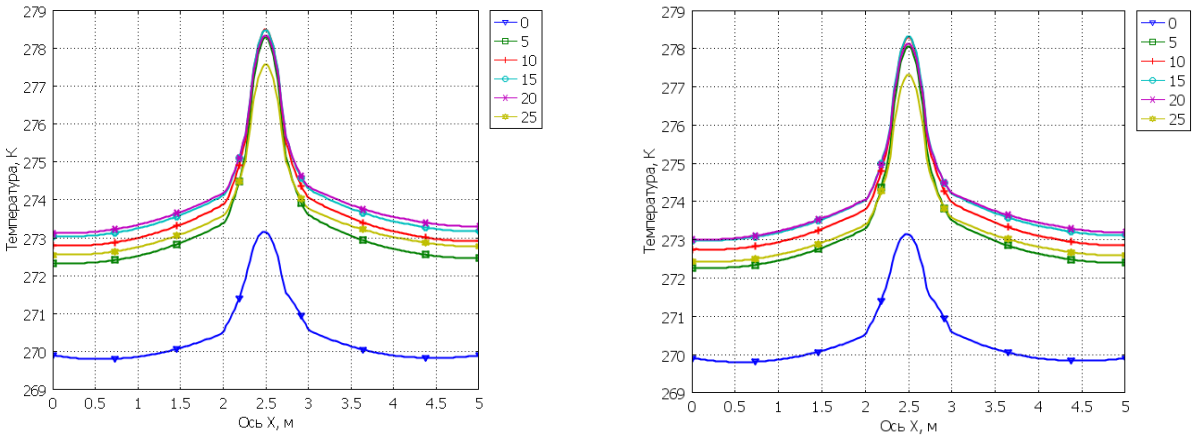
Анализ результатов численных экспериментов при двух-, трех- и четырехъярусном размещении отработавшего ядерного топлива

Далее представлены результаты анализа пространственно-временного распределения температуры вдоль направления, которое соответствует минимальному расстоянию для теплового взаимодействия ЧДХ с ОЯТ БилАЭС. Таким направлением является сама выработка, а расстояние определяется шагом размещения скважин в основании выработки. При двухъярусном размещении оно составляет 5 м, при трехъярусном – 8 м, при четырехъярусном – 10 м.

Как и ранее, критерием «опасности/безопасности» выбрана ситуация, когда при вариации времени выдержки ОЯТ согласно прогнозу имеет место поярусное смыкание талых зон между смежными скважинами. Именно в этой ситуации возможно появление достаточно обширных (несколько десятков метров) зон талых ММГП.

Подчеркнем, что при всех способах размещения ЧДХ с ОЯТ анализу подвергается тепловое состояние ММГП вблизи самого нижнего яруса. Основанием такого выбора является значение геотермического градиента, которое обусловливает рост температуры почти на 1 °С с увеличением глубины на 50 м. Естественно, что в каждой ситуации (двух- и четырехъярусное размещение) задавались свои граничные условия для нижней границы модели и начальные значения температуры для каждой зоны модели. Указанные параметры для трехъярусного размещения топлива определены выше.

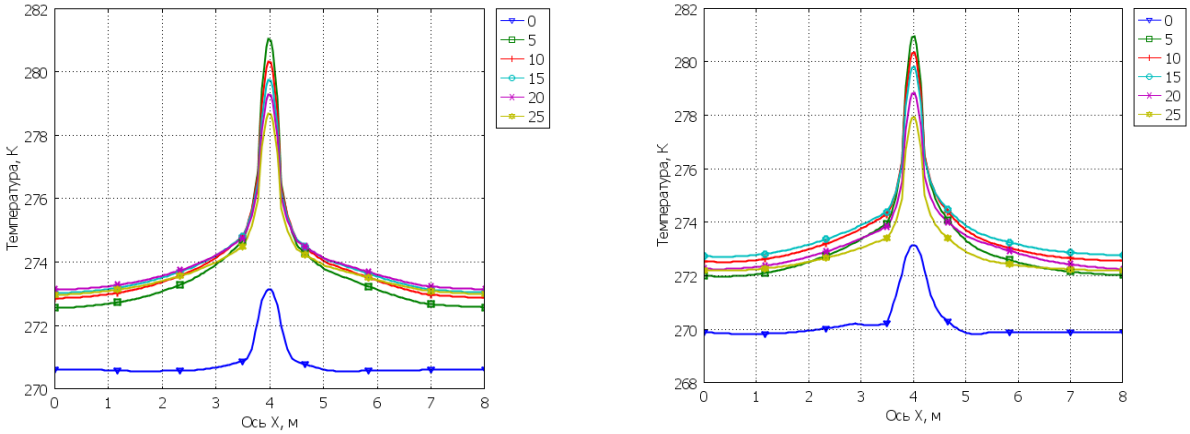
Пространственно-временные распределения температуры вдоль оси *X* для всех схем размещения ЧДХ с ОЯТ представлены на рис. 6–8.



а) б)

Рис. 6. Динамика пространственного распределения температуры в районе нижнего ЧДХ при двухъярусном размещении ОЯТ при вариации времени выдержки топлива 31 (а) и 33 года (б)

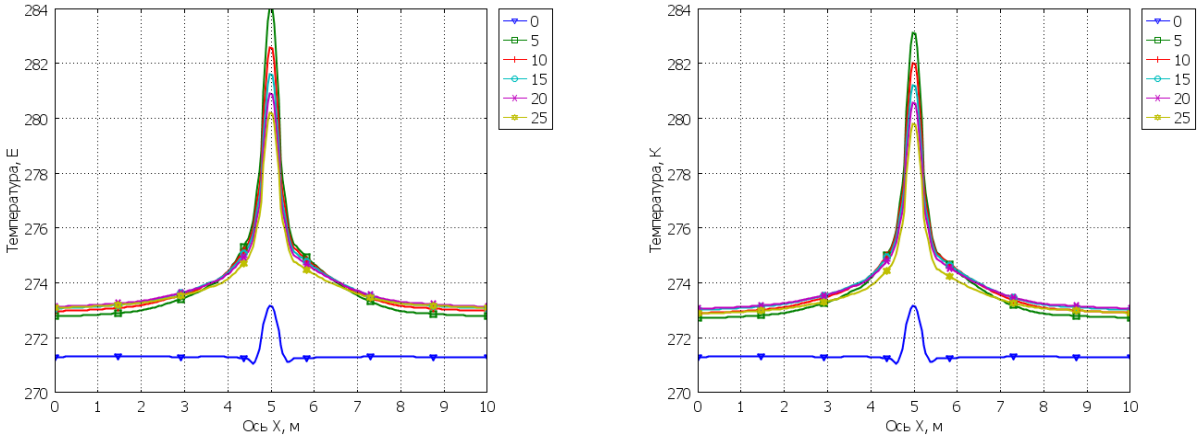
Анализ расчетов для двухъярусного варианта захоронения (рис. 6 а, б) свидетельствует о том, что минимальное время выдержки ОЯТ, когда не прогнозируется смыкание оттаявшей породы вдоль выработки, составляет 33 года. При времени выдержки ОЯТ 31 год смыкание оттаявших пород может произойти, но время этого смыкания ограничено несколькими годами.



а) б)

Рис. 7. Динамика пространственного распределения температуры в районе нижнего (а) и среднего (б) ЧДХ при трехъярусном размещении ОЯТ при времени выдержки топлива 9 лет

Анализ расчетной информации для трехъярусного варианта захоронения (рис. 7 а, б) свидетельствует о том, что предпринятый авторами в своей ранней работе [6] контроль по смыканию оттаявшей породы вокруг центрального ЧДХ не совсем корректен. Следует ориентироваться на нижний ЧДХ. Именно для нижнего ЧДХ при выдержке ОЯТ 9 лет прогнозируется кратковременное смыкание оттаявшей породы.



а) б)

Рис. 8. Динамика пространственного распределения температуры в районе нижнего ЧДХ при четырехъярусном размещении ОЯТ при вариации времени выдержки топлива 7 (а) и 9 лет (б)

Анализ расчетной информации для четырехъярусного варианта захоронения (рис. 8 а, б) свидетельствует о том, что минимальное время выдержки ОЯТ, когда не прогнозируется смыкание оттаявшей породы вдоль выработки, составляет 9 лет. При времени выдержки ОЯТ 7 лет смыкание оттаявших пород может произойти, но время этого смыкания ограничено несколькими годами. Объяснение этого факта теперь уже очевидно и авторам: «работает» геотермический градиент.

II. Вариация радиуса скважины

Постановка задачи

На базе описанной выше компьютерной теплофизической модели скважины изоляции ОЯТ (в трехъярусном варианте) БилАЭС (время выдержки 9 лет) исследовано влияние радиуса скважины и теплопроводности материала заполнителя на тепловое состояние вмещающего массива. Естественно, что в первую очередь интерес представляли температурные поля со значениями выше точки фазового перехода «вода – лед».

Для прогнозной оценки теплового состояния ММГП предлагается рассмотреть самую консервативную в тепловом отношении ситуацию, описанную выше.

Параметры вариации:

• радиусы скважины – 0.5 м (базовый), 0.6 м, 0.7 м и 0.8 м;

• коэффициенты теплопроводности цементно-бентонитового заполнителя – 0.8 Вт/(м·К) (базовый) и 1.2 Вт/(м·К).

Результаты численных экспериментов представлены в виде:

• пространственного распределения температуры по сечениям и изоповерхности;

• динамики распределения вдоль горизонтально оси *X*;

• динамики распределения в точке контроля.

Анализ результатов расчетов при базовой теплопроводности материала заполнителя

Анализ пространственно-временных распределений температуры выполнен на примере центрального ЧДХ. В частности на рис. 9 и 10 представлены результаты расчетов в рамках базовой модели при вариации радиуса скважины от 0.5 до 0.8 м.

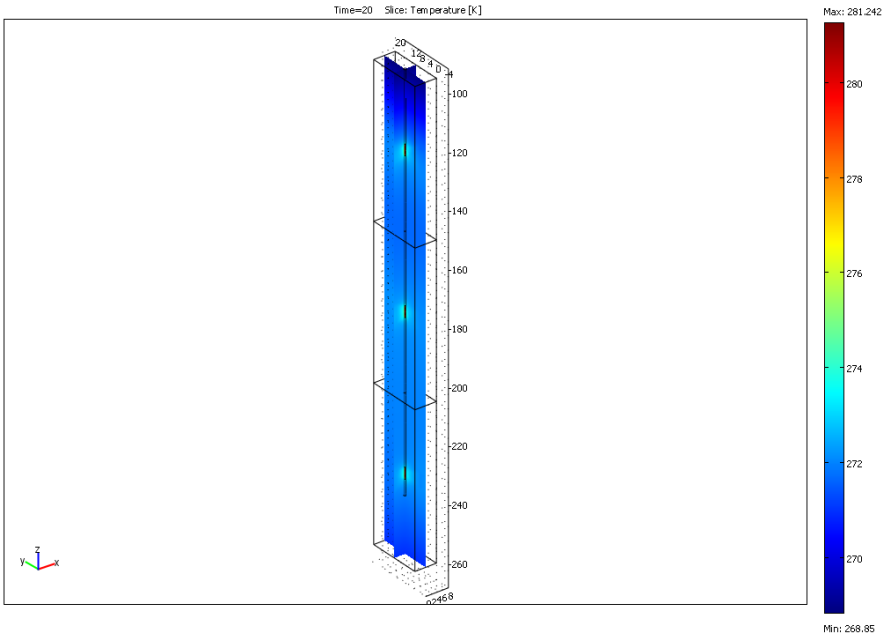


Рис. 9. Пространственное распределение температуры во взаимно перпендикулярных сечениях модели, проходящих через ЧДХ с ОЯТ (на 20 лет процесса симуляции). Радиус скважины 0.5 м (базовое значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

В частности, на рис. 9 приведено пространственное распределение температуры во взаимно перпендикулярных сечениях модели (*XOZ* и *YOZ*), проходящих через все три ЧДХ

с ОЯТ (на 20 лет процесса моделирования) при радиусе скважины 0.5 м. Хорошо видны локальные области разогрева вокруг ЧДХ.

На рис. 10 представлена динамика распределения температуры вдоль оси *X*, проходящей через центральный ЧДХ с ОЯТ (в легенде указан временной интервал мониторинга расчетной температуры – 4 года) для четырех значений радиуса скважины.

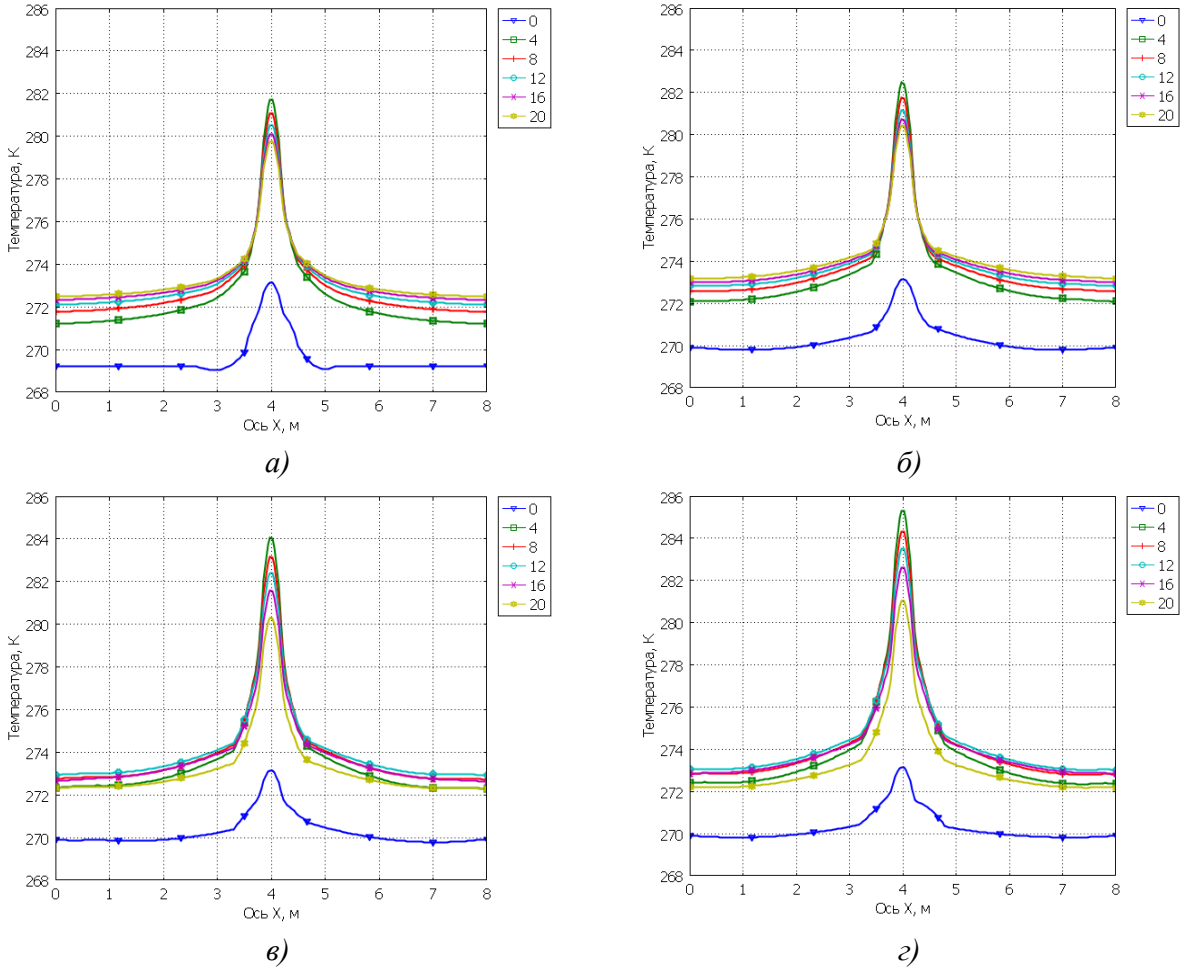


Рис. 10. Динамика распределения температуры вдоль оси X, проходящей через центральный ЧДХ при вариации радиуса скважины: а) 0.5 м; б) 0.6 м; в) 0.7 м; г) 0.8 м (базовое значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

Некоторые результаты анализа обобщены в табл. 1. Приведены значения времени достижения максимальных размеров области оттаивания вдоль оси *X* (минимальная толщина сохранившихся ММГП), радиуса оттаивания при вариации радиуса скважины захоронения ЧДХ и максимальной температуры в центральном ЧДХ (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1, увеличение радиуса скважины, заполненной материалом с достаточно низким коэффициентом теплопроводности, подтверждает тот факт, что при учете фазового перехода «вода – лед» отклик системы на вариацию термического сопротивления в целом нелинейный. Вместе с тем, четко прослеживается тенденция роста максимальной температуры в области центрального ЧДХ (см. позицию 3), что соответствует физике процесса.

Однако при радиусе скважине 0.6 м имеет место нетривиальный тепловой эффект, связанный с образованием талой породы размером более 8 м вдоль оси *X*. Другими словами, прогноз теплового состояния ММГП указывает, что при радиусе скважине 0.6 м между

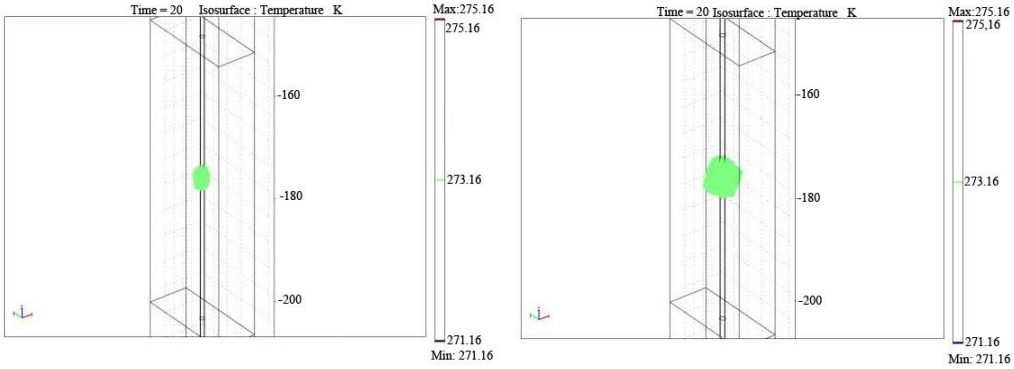
смежными скважинами в центральном ярусе примерно через 18 лет процесса изоляции возможно смыкание талой породы. Поскольку такое смыкание талой породы потенциально может произойти в обоих направлениях вдоль оси *X*, то размер зоны талой породы в указанном направлении составит не менее 20 м.

Таблица 1

Приблизительное время достижения максимальной области оттаивания вдоль оси *X*, радиус оттаивания, максимальная температура в центральном ЧДХ (базовое значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

Параметры контроля	Радиус скважины, м			
	0.5	0.6	0.7	0.8
1. Время достижения максимальной области оттаивания вдоль оси X, годы	~20	~18	~12	~12
2. Радиус оттаивания, м	0.8	> 3.4	1.85	2.2
3. Максимальная температура в центральном ЧДХ, К	281.7	282.4	284.0	285.3

В качестве примера образования зон талой породы можно обратиться к рис. 11 а, б, где в форме изоповерхности представлены области, ограниченные температурой фазового перехода «вода – лед» для радиусов скважины 0.5 и 0.6 м соответственно, на 20 лет процесса моделирования. Хорошо видно, что увеличение радиуса скважины приводит к росту размера области талой породы (талая порода находится внутри поверхности изображения).



а) *б*)

Рис. 11. Изоповерхности температуры фазового перехода «вода – лед» в области центрального ЧДХ на 20 лет процесса симуляции для радиуса скважины: а) 0.5 м и б) 0.6 м (базовое значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

В дополнение к обсуждаемому эффекту увеличения области оттаивания, на рис. 12 приведена динамика температуры в точке контроля (центральная точка границы раздела со смежной областью модели скважины вдоль выработки) при вариации радиуса скважины 0.5 и 0.6 м соответственно. При минимальном радиусе скважины максимальная температура нагрева ММГП в исследуемой области прогнозируется примерно на 16-й год процесса симуляции. При этом фазового перехода в жидкое состояние не прогнозируется. Однако увеличение радиуса скважины до 0.6 м приводит к изменению динамики температуры в точке контроля: положительная производная температурной кривой простирается на срок более 20 лет, а фазовый переход во влажное состояние ожидается к 18 годам процесса моделирования.

Естественно, авторы обратили внимание на полученный результат смыкания талых пород вдоль оси *X* при радиусе скважины 0.6 м. С целью исключения ошибки выполнили серию расчетов на разнокалиберных сетках модели, результат стабилен!

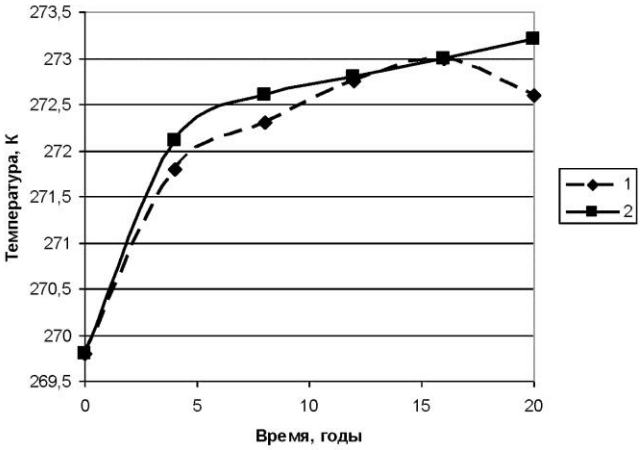


Рис. 12. Динамика температуры в точке контроля (0, 10, -182.5) вдоль оси X центрального ЧДХ для радиуса скважины 0.5 (1) и 0.6 м (2) (базовое значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

Дальнейший рост радиуса скважины, как видно из данных табл. 1 и графической информации рис. 10в и г, приводит к более быстрому достижению во времени максимального радиуса оттаивания. Данный факт физически понятен, так как увеличивается термическое сопротивление. Однако для скважины с радиусами 0.7 и 0.8 м при увеличении глубины оттаивания (1.85 и 2.2 м соответственно, на 12 лет процесса моделирования) явления смыкания талых пород не происходит. Видимо, при увеличении площади поверхности передачи тепла от скважины к ММГП количество тепла оказывается недостаточным, чтобы достичь температуры фазового перехода на больших расстояниях.

Из представленных на рис. 10 температурных кривых хорошо прослеживается рост максимальных температур в центральном ЧДХ (позиция 3, табл. 1). При этом максимальное значение прогнозируется примерно через 4 года процесса изоляции. Более точно время достижения максимума температуры может быть определено либо дополнительными расчетами (если потребуется проектировщикам) с мелким временным шагом сохранения промежуточной информации, либо построением динамики температуры в центральном ЧДХ.

Анализ результатов расчетов при увеличенной теплопроводности материала-заполнителя

Результаты расчетов в рамках модели с увеличенным коэффициентом теплопроводности материала заполнителя до 1.2 Вт/(м·К) при вариации радиуса скважины от 0.5 до 0.8 м показаны на рис. 13.

По аналогии с представленной информацией в предыдущем разделе на рис. 13 приведена динамика распределения температуры вдоль оси *X*, проходящей через центральный ЧДХ с ОЯТ (в легенде указан временной интервал мониторинга расчетной температуры – 4 года).

Некоторые количественные показатели результатов анализа численных экспериментов обобщены в табл. 2, а также приведены значения время достижения максимальной области оттаивания вдоль оси *X*, радиуса оттаивания при вариации радиуса скважины захоронения ЧДХ и максимальной температуры в центральном ЧДХ.

Можно отметить несколько интересных моментов. Во-первых, представленные результаты действительно подтверждают ранее отмеченную особенность моделируемой системы, а именно: нелинейность отклика на изменение размера радиуса скважины (см. позицию 2, табл. 2).

Хотя в целом увеличение термического сопротивления приводит к росту прогнозируемых температур, увеличение размера зоны оттаивания вдоль оси *X* далеко от линейной функции.

Во-вторых, при увеличенном значении коэффициента теплопроводности (см. рис. 13 г) прогнозируется кратковременный эффект смыкания области талой породы вдоль оси *X*. Примерно через 12 лет процесса моделирования прогнозируется исчезновение мерзлого слоя породы между смежными скважинами. Однако уже к 16 годам из-за спада мощности остаточного тепловыделения и продвижения теплового фронта по другим направлениям ММГП возвращаются в свое изначальное мерзлое состояние.

В-третьих, при вариации параметра коэффициента теплопроводности система ведет себя физически правильно: из сравнения данных табл. 1 и 2 (позиции 3) хорошо видно, что более высокая теплопроводность приводит к снижению контролируемых максимальных температур.

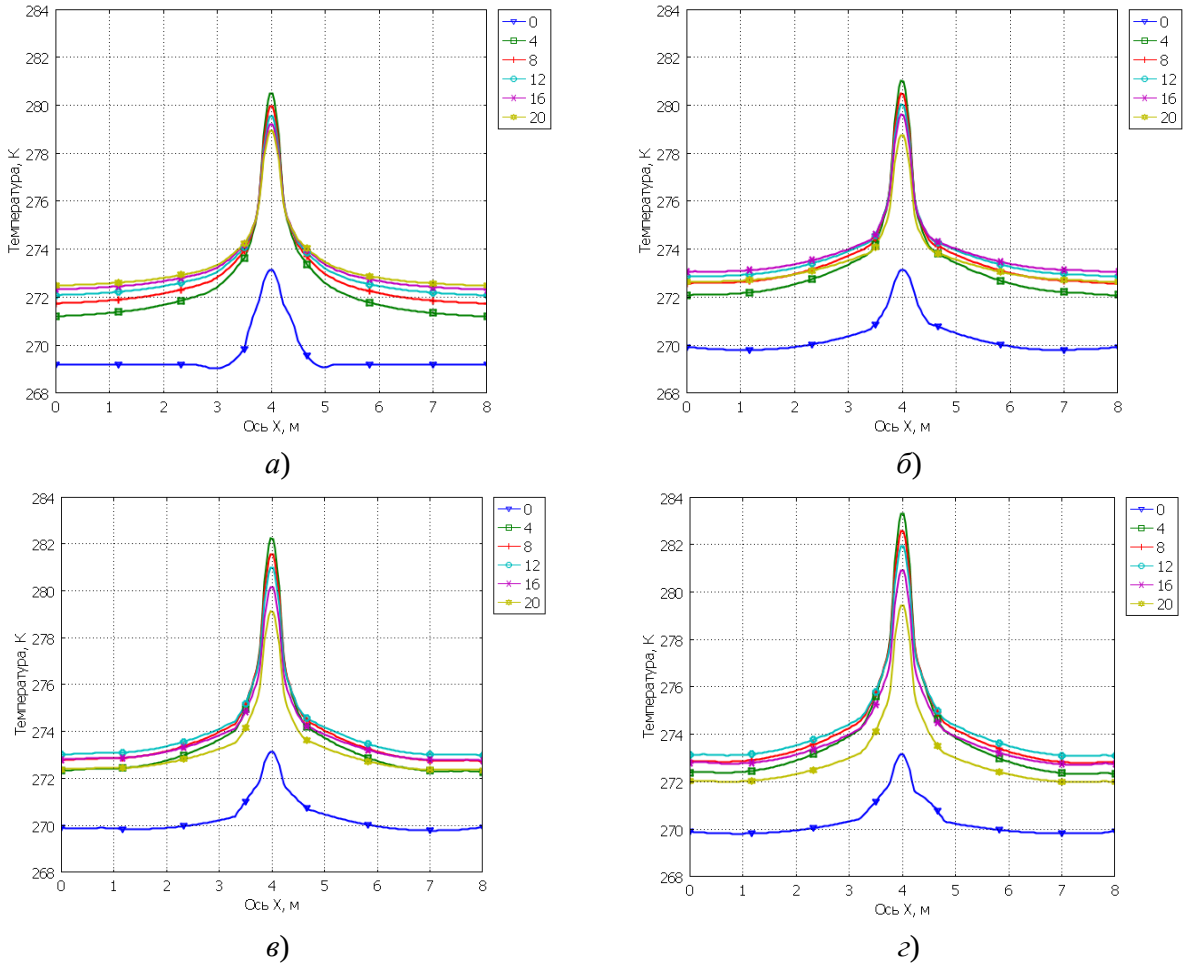


Рис. 13. Динамика распределения температуры вдоль оси X, проходящей через центральный ЧДХ при вариации радиуса скважины: а) 0.5 м; б) 0.6 м; в) 0.7 м; г) 0.8 м (увеличенное значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

Наконец, расчетные данные максимальных температур позволяют проверить ранее выполненную оценку нормализованного коэффициента чувствительности по влиянию коэффициента теплопроводности материала заполнителя на максимальную температуру разогрева области моделирования. В частности, выше было показано, что значение нормализованного коэффициента чувствительности зависит от времени, а его максимальное значение оценивалось на уровне -0.05 %. Аккуратная обработка расчетных данных

свидетельствует, что на самом деле коэффициент чувствительности этого параметра еще меньше (примерно на уровне -0.01 %).

Таблица 2

Приблизительное время достижения максимальной области оттаивания вдоль оси *X*, радиус оттаивания, максимальная температура в центральном ЧДХ (увеличенное значение коэффициента теплопроводности заполнителя)

Параметры контроля	Радиус скважины, м			
	0.5	0.6	0.7	0.8
1. Время достижения максимальной области оттаивания вдоль оси *X*, годы	~20	~16	~12	~12
2. Радиус оттаивания, м	2.1	2.45	2.15	> 3.2 кратковременно
3. Максимальная температура в центральном ЧДХ, К	281.1	281.0	282.2	283.3

Заключение

В работе представлены результаты анализа численных экспериментов в рамках теплофизической модели захоронения ОТВС БилАЭС в ММГП при максимально консервативном условии, когда тепловые потоки на боковых поверхностях модели скважины равны нулю. Описаны теплофизические параметры модели. Рассмотрены технически возможные схемы размещения ЧДХ с ОЯТ в скважинах второго, третьего и четвертого яруса.

Для трехърусного размещения ЧДХ с ОЯТ подробно проанализировано тепловое состояние ММГП в зависимости от времени выдержки ОЯТ. При контроле за центральным ЧДХ с ОЯТ доказано, что время выдержки ОЯТ на уровне 7–9 лет обеспечивает образование локальных областей талых пород вблизи ЧДХ на ограниченный период времени. При меньшем времени выдержки прогнозируется смыкание талых пород вдоль выработки на сроки более 20 лет.

Анализ теплового состояния ММГП вокруг нижнего ЧДХ с ОЯТ показал, что именно это размещение следует брать в качестве контрольного, поскольку начинает «работать» геотермический градиент, обеспечивающий на каждые 50 м повышение температуры на 1 °С. Определены минимальные сроки выдержки ОЯТ, при которых не прогнозируется смыкания оттаявшей породы вдоль выработки, для вариантов: в два яруса – 33 года, в три яруса – 9 лет и четыре яруса – 9 лет.

Для трехъярусного варианта проанализировано тепловое состояние ММГП в зависимости от радиуса скважины и коэффициента теплопроводности материала заполнителя. Время выдержки ОЯТ выбрано равным 9 годам. Анализ результатов пространственно-временных температурных полей с учетом нелинейного отклика системы подтверждает физическую природу прогнозируемых расчетных данных.

Доказано, что при базовом значении коэффициента теплопроводности материала заполнителя (0.8 Вт/(м·К) проектное значение радиуса скважины (0.5 м) обеспечивает минимальный радиус оттаивания (на уровне 0.8 м) в области центрального ЧДХ с ОЯТ. Увеличение радиуса скважины приводит к заметному возрастанию значения радиуса оттаивания, а при радиусе скважине 0.6 м прогнозируется смыкание талых пород в направлении смежных ЧДХ. В указанной ситуации временная производная температуры на границе раздела смежных ЧДХ продолжает оставаться положительной и после 20 лет процесса моделирования. Показано, что при увеличенном значении коэффициента теплопроводности материала заполнителя (1.2

Вт/(м·К) при всех рассмотренных радиусах скважины смыкания талых пород на продолжительные времена не прогнозируется.

Оценено влияние коэффициента теплопроводности материала-заполнителя на разогрев областей вблизи ЧДХ: оно достаточно слабое, но зависит от времени процесса моделирования. Доказано низкое значение нормализованного коэффициента чувствительности по влиянию коэффициента теплопроводности материала заполнителя на максимальную температуру разогрева области моделирования (на уровне -0.01 %).

Основные результаты по прогнозным значениям пространственно-временных распределений температуры в ММГП для трехъярусного варианта могильника не противоречат выводам ВНИПИпромтехнологии. Авторы полагают, что представленная информация касательно теплового состояния ММГП будет полезна для проектировщиков аналогичных сооружений в условиях вечной мерзлоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности создания опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и РАО / *М.В. Барышников и др.* // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 3. С. 70–75. **2.** *Лобанов Н.Ф.* Создание опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ в толще многолетнемерзлых пород в зоне размещения Билибинской АЭС // Экономика обращения с отработавшим ядерным топливом: переработка и непосредственная изоляция: материалы семинара КЭГ МАГАТЭ (Аронсборг, Швеция, 7 октября 2011). URL: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/WTS/CEG/CEG-Workshop-7-Oct-2011/3.5-Lobanov-Rus.pdf (дата обращения: 06.11.2012). **3.** Возможности создания опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и ТРО / *С.Б. Карапетян и др.* // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 2. С. 133–139. **4.** Выбор маршрутов транспортирования ОЯТ Билибинской АЭС на основе оценки радиационных рисков / *Е.В. Суворова, А.В. Хаперская, А.А. Строганов и др.* // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2013. № 3-4. С.53-56. **5.** Обоснование возможности размещения опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и РАО в толще многолетнемерзлых горных пород в зоне размещения Билибинской АЭС / Б.Г. Лукишов, Н.П. Шведова, Н.В. Гармашева и др. // Ядерная и радиационная безопасность России. 2013. Вып. 15. С. 31–41. **6.** *Мельников Н.Н., Амосов П.В., Новожилова Н.В.* Математическое моделирование теплового состояния многолетнемерзлых горных пород на объекте подземной изоляции ОЯТ Билибинской АЭС в зависимости от времени выдержки // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 1 (16). С. 3–9. **7.** Инженерная геокриология: справочное пособие / *Э.Д. Ершов и др.*; под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1991. 439 с. **8.** *Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Лисицына О.М.* Проблемы захоронения радиоактивных отходов в криолитозоне // Геоэкология. 1995. № 5. С. 20–36. **9.** *Казаков А.Н., Лобанов Н.Ф., Манькин В.И.* Динамика развития теплофизических процессов при подземной изоляции тепловыделяющих РАО в многолетнемерзлых горных породах // Геоэкология. 1997. № 2. С. 36–40. **10.** Регулирование теплового режима подземных сооружений складского и специального назначения в условиях Севера */ А.С. Курилко и др*. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2011. 246 с. **11.** Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны */ А.С. Курилко и др.* Новосибирск: Гео, 2011. 139 с. **12.** *Lunardini V.J.* Heat transfer in cold climates. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981. 731 p. **13.** Билибинская атомная электростанция / *В.М. Абрамов и др.* // Атомная энергия. 1973. Т. 85, № 5. С. 299–304. **14.** Физические величины: справочник / *А.П. Бабичев и др.*; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. **15.** Радиогеоэкологические аспекты безопасности подземного захоронения радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива на Европейском Севере России */ Н.Н. Мельников и др.* Апатиты: КНЦ РАН, 2001. 194 с. **16.** Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов: препринт / *В.И. Калинкин и др*. СПб.: ВНИПИЭТ, 2009. 124 с. **17.** PORFLOW a software tool for multiphase fluid flow, heat and mass transport in fractured porous media: User's manual (version 3.07) // ACRi. 1997. 326 p. **18.** *Самарский А.А., Вабищевич П.Н.* Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с. **19.** *Амосов П.В.* Проверка кода для численного моделирования тепловых процессов в пористой среде с учетом фазового перехода «лед – вода» // Вестник МГТУ. 2013. Вып. 16, № 4. С. 641–643. **20.** *Амосов П.В.* Диффузионный перенос радиоактивных веществ в обводненной трещиноватой пористой среде (модель одиночной трещины) // Геоэкология. 2001. №1. С. 88–93.

Сведения об авторах

Мельников Николай Николаевич – академик РАН, директор Горного института КНЦ РАН; e-mail: root@goi.kolasc.net.ru

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

Новожилова Наталья Викторовна – младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН; e-mail: nat1966kis@mail.ru

УДК 550.311:551.24(470.21)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КЕЙВСКОГО БЛОКА И ИХ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

В.Т. Филатова[1], В.П. Петров[2]
[1]Геологический институт КНЦ РАН
[2]КНЦ РАН

Аннотация

Для оценки влияния тектонических режимов и характера метаморфических процессов на вещественный состав, строение и промышленную значимость месторождений полезных ископаемых Кейвского блока определена структура геофизических аномалий в пределах района и выявлены её корреляционные связи с петрофизическими характеристиками пород, а также со стадийностью проявления деформационных и метаморфических процессов.

Ключевые слова:

Кейвы, неоархей, палеопротерозой, Балтийский щит, геофизическое поле, тектонический режим, метаморфический процесс.

Введение

В работе рассмотрены тектоноструктурные и пространственно-временные особенности формирования земной коры Кейвского рудного района, наиболее интересного геологического объекта в пределах Кольского региона из-за наличия в нем своеобразных архейских комплексов пород, которые в других структурах региона не наблюдаются. Этот блок сложен неоднократно метаморфизованными и деформированными образованиями зрелой континентальной коры. На его территории известны месторождения и рудопроявления индустриальных минералов и редкометалльного сырья. К уникальным объектам относятся кианитовые сланцы, образующие крупнейшее в мире Кейвское месторождение огнеупорного и глинозёмистого сырья, протягивающееся на 120 км. Многоэтапная тектонометаморфическая переработка этих пород обусловила значительное разнообразие отдельных типов кианитовых руд и их специфические черты структурно-тектонической локализации. Также промышленный интерес представляют месторождения титаномагнетитовых руд с попутным ванадием, приуроченные к габбро-лабрадоритовым массивам. В пределах структуры широко развиты рудопроявления редких элементов. В силу всего этого Кейвы рассматриваются многими исследователями как особая структура докембрия Балтийского щита со специфическими чертами геологии, развития и строения земной коры.

Ниже приводятся результаты впервые выполненного тектонофизического моделирования с использованием численных методов для объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита в раннем докембрии. В этих целях построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учётом её эволюционного развития. Результаты исследований позволили выделить ослабленные зоны в фундаменте Кейвской структуры (сформировавшиеся в интервале мезоарзей – палеопротерозой) и показать, что они коррелируют с местоположением областей развития тектономагматической активности региона в архее и палеопротерозое. Впервые определена структура геофизических аномалий в пределах района и выявлены

ее корреляционные связи с петрофизическими характеристиками пород и со стадийностью проявления деформационных и метаморфических процессов. Выявлено, что тектонические режимы и характер метаморфических процессов могли оказать существенное влияние на вещественный состав, строение и промышленную значимость месторождений полезных ископаемых Кейвского блока. Задача определения тектоноструктурных условий формирования и пространственно-временных закономерностей развития земной коры региона весьма актуальна. Корреляционные связи между физическими характеристиками пород, геофизическими полями, геолого-структурными факторами, тектоникой и оруденением могут рассматриваться как информативный признак при выяснении условий рудообразования и при металлогеническом прогнозировании.

Геологическая позиция района

Характерная особенность докембрийской земной коры северо-восточной части Балтийского щита заключается в ее блоковом строении. Всеми исследователями отмечается структурная и формационная неоднородность земной коры региона, которая рассматривается как результат последовательного развития, начиная с мезоархея, различных эндогенных геологических процессов (тектонических, магматических, метаморфических) [1–3]. В пределах региона в качестве главных структурных элементов выделяются архейские мегаблоки – Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский, в своей взаимосвязи формирующие коллажное строение земной коры (рис. 1). Особое место в структуре коры занимают архейские зеленокаменные пояса – Колмозеро-Воронья, Ёнский, Терско-Аллареченский и палеопротерозойские мобильные пояса – Лапландский гранулитовый и Печенга-Имандра-Варзугский рифтогенный, а также гигантские палеозойские щелочные массивы (Хибинский, Ловозерский). Палеопротерозойский Печенга-Имандра-Варзугский рифтогенный пояс наследует область развития архейского Терско-Аллареченского пояса.

Современный структурный план региона в основном сформировался на завершающей стадии свекофенского тектогенеза. В результате его перестройки возникли основные складчатые структуры северо-западного простирания, но в восточной части региона наблюдаются элементы более древних архейских структур, которые сохранили реликтовую субширотную ориентировку [1, 2].

Кейвский блок, встроенный в каркас Кольского мегаблока, – структурный элемент второго плана, он занимает особое положение не только из-за своего размера, но, прежде всего, из-за особенностей своего строения и состава пород [3] (рис. 1). На северо-востоке данная структура граничит с Мурманским мегаблоком, на юго-востоке – с Пурначским блоком, на юго-западе – с Имандра-Варзугой, на северо-западе – с Центрально-Кольским блоком. Особенность состава слагающих пород состоит в том, что в пределах выделенных зон развиты комплексы, которых практически нет в других районах региона. В структурном плане это пологая синклиналь при наличии блокового поднятия фундамента на отдельных участках. Также ее можно представить как грабен в виде двухъярусного складчато-глыбового сооружения [4]. Предполагается, что Кейвский блок в архее развивался в условиях режима срединного массива [1].

Рассматриваемая структура ранее выделялась условно как область преимущественного развития пород определённого возраста. По мере изучения геологии и тектоники Кольского региона в пределах Кейв выделены отдельные структурные зоны (Верхнепонойский блок, Пурначский блок, Западные Кейвы, Понойская зона, Центральные Кейвы, Большие Кейвы, Малые Кейвы) (рис. 2), их границы в основном проходят по крутопадающим разрывным нарушениям, зачастую разделяющим однородные геологические комплексы [1, 2]. Наблюдаемые тектонические нарушения в районе исследований не относятся к периоду формирования первичных геологических образований, а связаны с палеопротерозойским этапом развития земной коры региона. Схема расположения структурных зон в пределах Кейв основана на учете

только морфологических особенностей геологических тел и не несет информации о геологической истории развития района [2]. При этом выделенные зоны различаются типом и интенсивностью складчатости, а также степенью дифференцированности структур. Выраженная зональность может отражать интегральный эффект различных и многократно проявившихся эндогенных и экзогенных процессов в земной коре региона.

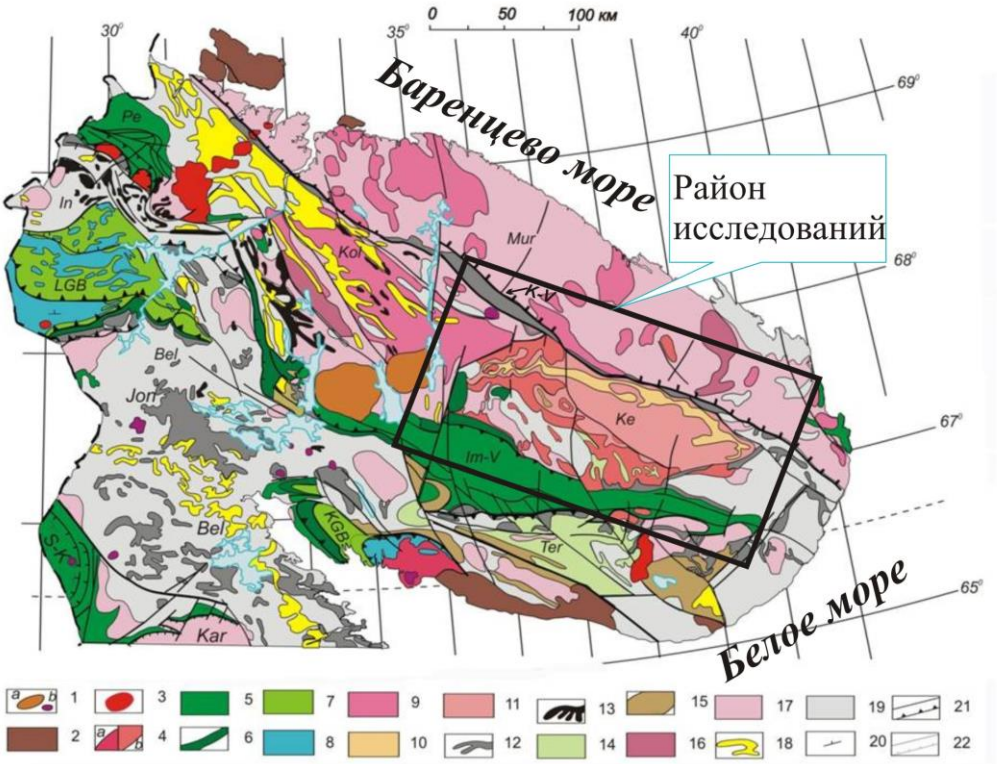


Рис. 1. Геолого-структурная карта Кольского региона Балтийского щита (по работе [3]). Области: Mur – Мурманская; Kol – Кольская; Bel – Беломорская; Ter – Терская; Ke – Кейвская; In – Инари, Kar – Карельская. Пояса: Jon – Енский; K-V – Колмозеро-Воронья (архейские зеленокаменные); LGB – Лапландский; KGB – Кандалакшско-Колвицкий (гранулитовые); Pe – Печенга, Im-V – Имандра-Варзуга, S-K – Северо-Карельский (палеопротерозойские). 1 – контуры палеозойских интрузий; 2 – осадочные породы верхнего протерозоя; Палеопротерозой: 3 – граниты, гранодиориты и диориты; 4 – чарнокиты, граниты (а), щелочные граниты (в Кейвах – неоархейские) (б); 5 – вулканогенно-осадочные породы; 6 – анортозиты, габбро-анортозиты (в Кейвах – неоархейские), габбро, пироксениты, перидотиты. Палеопротерозой (или неоархей?): 7 – гранулиты основного и среднего состава; 8 – кислые гранулиты. Неоархей: 9 – гранодиориты, диориты и эндербиты; 10 – глиноземистые и суперглинозёмистые гнейсы и сланцы; 11 – кислые гнейсы; 12 – фрагменты зеленокаменных поясов (гнейсы, амфиболиты и метакоматииты); 13 – фрагменты железорудной (BIF) формации (гнейсы, амфиболиты и железистые кварциты); 14 – гнейсы и сланцы; 15 – гнейсы и амфиболиты; 16 – гранодиориты и диориты; 17 – плагиограниты и гранито-гнейсы; 18 – кианит-гранат-биотитовые гнейсы; 19 – гранито-гнейсы, гнейсы, мигматиты и редко амфиболиты. 20 – элементы залегания, 21 – субвертикальные разломы и пологие надвиги, разделяющие протерозойские структуры, 22 – субвертикальные разломы и надвиги

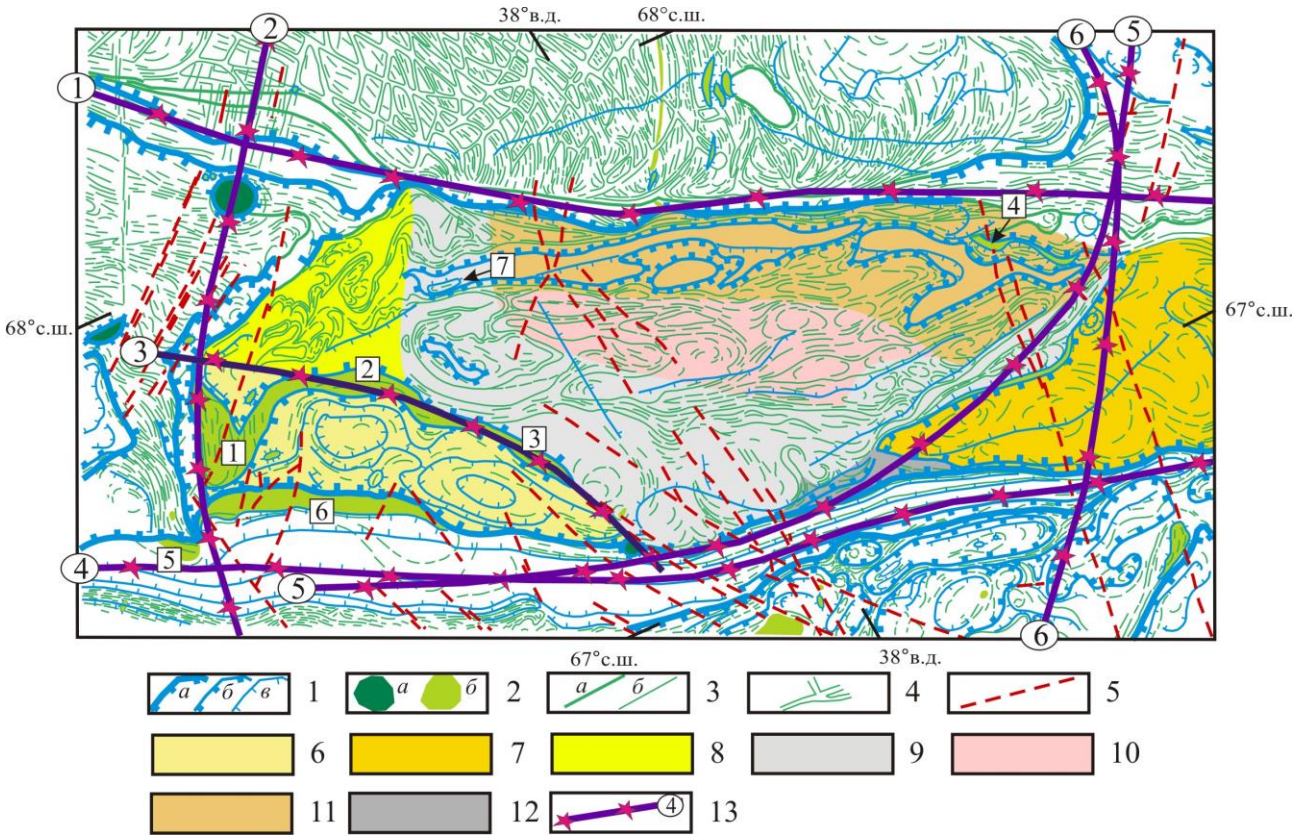


Рис. 2. Схема распределение геофизических неоднородностей в пределах Кейвской структуры и сопредельных территорий:
1 – градиенты гравитационного поля: а – 1-го, б – 2-го, в – 3-го порядков; 2 – аномалии магнитного поля: а – локальные изометричные, б – локальные > 3000 нТл; 3 – оси локальных магнитных аномалий: а – протяженные интенсивные, б – рядовые; 4 – секущие зоны пониженных значений магнитного поля (Мурманский блок); 5 – разрывные нарушения по геофизическим данным; 6–12 – структурные зоны (по данным работы [2]): *6 – Верхнепонойский блок, 7 – Пурначский блок, 8 – Западные Кейвы, 9 – Понойская зона, 10 – Центральные Кейвы, 11 – Большие Кейвы, 12 – Малые Кейвы; 13 – ослабленные зоны в фундаменте (выделены по результатам тектонофизического моделирования [9–11])*: *1 – Северо-Кольская, 2 – Цагинская, 3 – Щучьеозерская, 4 – Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская), 5 – Восточные Кейвы – Панаречка, 6 – Восточно-Кольская. Цифрами в квадратах обозначены массивы: 1 – Цагинский, 2 – Щучьеозерский, 3 – Медвежьеозерский, 4 – Ачинский, 5 – Фёдоровы тундры, 6 – Панские тундры, 7 – хребет Серповидный*

Геологические особенности района

Индивидуальное своеобразие рассматриваемой структуры определяется широким развитием мощной толщи кислых вулканитов Лебяжинского комплекса (нижний структурный ярус) и метаосадочных пород Кейвского комплекса (верхний ярус). В низах супракристаллического разреза развиты андезито-базальты Понойского комплекса, которые прослеживаются фрагментарно на контакте Понойской зоны и Центрально-Кейвского блока (Центральные Кейвы). При этом отсутствуют явно выраженные несогласия на границе между Понойским и Лебяжинским комплексами. Первоначально U-Pb изохронный возраст метавулканитов (район Малых Кейв) был определен как 2871±15 млн лет и интерпретировался как время кристаллизации кислых вулканитов [5]. Новое U-Pb датирование магматических

цирконов из кислых вулканитов района Больших Кейв показало, что, вероятно, возраст образования метавулканитов нижнего яруса может быть 2678±7 млн лет [6]. Возраст 2871±15 млн лет предположительно определяет время образования эффузивных протолитов пород нижнего структурного яруса, которые могли формироваться в течение продолжительного времени с учетом перерывов. На породах нижнего яруса парасланцы (верхний ярус) залегают с несогласием. В современном эрозионном срезе они сохранились в грабенах, имеющих линейную форму. Сланцы верхнего яруса по особенностям химического состава относятся к образованиям осадочного чехла неоархейской протоплатформы [1], но время их формирования геохронологическими изотопными методами не определено. Комплекс кейвских сланцев, развитый преимущественно в пределах Больших Кейв и претерпевший многоэтапные тектонометаморфические преобразования, составляет уникальное по своим масштабам Кейвское месторождение высокоглиноземистого сырья, представленное углеродистыми кианитовыми сланцами.

В пределах Кейв широко развиты плутонические породы (ультрабазиты, габброиды, анортозиты, щелочные граниты, граниты, пегматиты), прорывающие породы блока и сформированные в интервале от 2.7 до 1.65 млрд лет [5]. Магматизм в неоархейский период начинался с внедрением массивов габбро-лабрадоритов (Цагинский, Щучьеозерский, Медвежьеозерский, Ачинский) в интервале от 2.68 до 2.63 млрд лет и завершился формированием тел щелочных и нефелиновых сиенитов (2.67–2.61 млрд лет). Наиболее распространённые интрузивные породы в районе исследований – щелочные граниты, возраст которых укладывается в интервал 2.67–2.63 млрд лет [5].

Габбро-лабрадориты преимущественно развиты в пределах Верхнепонойского блока, но маломощные ленточные тела присутствуют в зоне контакта Мурманского мегаблока и Кейвской структуры и на контакте с Пурначским блоком, щелочные граниты – в пределах Верхнепонойского блока, Западных Кейв и Понойской зоны. Небольшие массивы щелочных и нефелиновых сиенитов пространственно ассоциируют со щелочными гранитами. В районе широко развиты редкометалльные пегматиты. U-Pb возраст пегматитов, пространственно ассоциирующихся с массивами щелочных гранитов, определен как палеопротерозойский – 1682±35 млн лет [5]. В северо-западной части Кейв (север Понойской зоны, район хребта Серповидный) среди архейских сланцев наблюдается незначительное распространение вулканогенно-осадочных пород, которые образуют останцы или фрагменты грабен-синклинальных структур. Данные породы на структурно-формационном уровне коррелируют с образованиями варзугской серии в пределах Имандра-Варзугской рифтогенной структуры палеопротерозойского возраста [1, 2, 7], которая ограничивает Кейвский блок с юга. Непосредственно на контакте Кейв и Имандра-Варзуги локализованы палеопротерозойские массивы основных-ультраосновных пород Фёдоровой и Панских тундр.

Архейский фундамент северо-востока Балтийского щита характеризуется сложной полициклической историей метаморфизма. Породы, слагающие фундамент, в неоархее претерпели синтектонический метаморфизм высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой фаций, но при этом в пределах Кейвской структуры следов проявления указанного метаморфизма не отмечается. Видимо, на тот период термодинамические обстановки формировались дифференцировано по отдельным структурным зонам. В супракрустальных образованиях Кейвского блока (Лебяжинский комплекс) наблюдаются слабые и неконтрастные следы ультраметаморфизма по сравнению с архейскими комплексами смежных областей [8]. Породы Лебяжинского комплекса в неоархее претерпели метаморфизм низкотемпературных фаций неустановленного фациального типа. В палеопроторозое, в течение свекофенского тектонометаморфического цикла, Лебяжинский и Кейвский комплексы в пределах большей части территории Кейвского блока – Большие и Центральные Кейвы, Понойская зона, Малые Кейвы – были метаморфизованы в условиях дистен-ставролитовой субфации. В зонах нахождения щелочных гранитов в Западных Кейвах и в обрамлении Кейвского блока

метаморфизм на тот период достигал силлиманитовой субфации с развитием процессов мигматизации и щелочного метасоматоза. При этом в Западных Кейвах контактово-метасоматические воздействия щелочных гранитов на породы Лебяжинского и Кейвского комплексов проявились в региональном масштабе [8]. Следует отметить, что степень метаморфизма в блоках заметно варьирует, и границы метаморфических зон трансгрессивны по отношению к структурным образованиям.

На основе имеющихся данных о геологии и петрологии палеопротерозойских метаморфических комплексов признается, что при объяснении механизмов формирования земной коры региона необходимо учитывать следующие факторы: а) имело место тектономагматическое и метаморфическое преобразование ранее сформированной архейской континентальной коры; б) давление при метаморфизме супракрустальных образований определялось региональными и локальными тектоническими напряжениями в земной коре; в) метаморфические данные не допускают прямого использования положений тектоники плит при реконструкции геодинамических обстановок развития коры в палеопротерозое [8].

Результаты тектонофизических исследований

В целях объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита в раннем докембрии нами впервые выполнены исследования с использованием методов численного моделирования. Допускается, что тип тектономагматической активности, установившийся в раннем докембрии региона, был внутриплитный, а Кейвский блок развивался в условиях режима срединного массива, начиная с мезоархея. Полагаем, что северо-восточная часть Балтийского щита на тот период представляла собой неоднородное упругое тело, подверженное действию объёмных сил и заданных напряжений на его границе. Рассматриваемая область состоит из нескольких конечных подобластей, каждая из них считается однородно изотропной и линейно-упругой с линейно-упругими постоянными (коэффициент Пуассона и модуль Юнга), значения которых приведены в работе [9]. Каждый архейский мегаблок (включая Кейвский блок) – это отдельная подобласть. В целях построения количественных моделей напряжённо-деформированного состояния земной коры региона с учётом её эволюционного развития решалась краевая задача в напряжениях [10].

При решении задачи рассмотрены три временных этапа развития Кольского региона – мезоархей, неоархей, палеопротерозой, соответственно, на каждом этапе задавалась определённая базовая модель, описывающая исследуемую область с учётом сформировавшихся к этому времени геологических структур. К началу неоархея консолидация земной коры превращает регион в относительно стабильную континентальную структуру, и исследуемая область на тот период находится в устойчивом состоянии [1, 2]. Следовательно, можно допустить, что регион в тот период мог испытывать всестороннее равномерное сжатие вследствие действия удалённых сил. В раннем протерозое основной фронт тангенциальных напряжений был направлен на северо-восток [1, 2]. Тогда Мурманский мегаблок занимал устойчивое положение; не исключено, что он испытывал давление, направленное с северо-востока на юго-запад. Следовательно, допускаем, что в раннем протерозое регион был подвержен одноосному сжатию равномерно распределёнными усилиями с юго-запада и с северо-востока. В итоге рассчитывалось три варианта нагрузки области: мезоархей и неоархей – всестороннее равномерное сжатие; палеопротерозой – одноосное сжатие по линии юго-запад – северо-восток [11]. В последующие эпохи значительных геолого-тектонических процессов регион не переживал. В силу того что нет достоверных данных об абсолютной величине действовавших в регионе сил, принимаем их интенсивность равной единице. Для каждой базовой модели рассчитаны максимальные по абсолютному значению скалывающие напряжения [10]. Окончательно вычисленные величины скалывающих напряжений нормировались и представлялись в процентном соотношении от максимального значения по региону,

а по их аномальным значениям выделялись линейные зоны, интерпретируемые как ослабленные области в фундаменте и предопределившие локализацию магматических процессов в регионе.

Выполненные расчеты показали, что структурные особенности Кольского региона, обусловленные развитием проницаемых зон земной коры региона, отчётливо выделяются в поле скалывающих напряжений. Исследования с использованием базовой модели для мезоархея выявили линейные области в фундаменте Кейвского блока, которые сформировались, предположительно, в мезоархее как ослабленные: (1) обрамляющие Кейвскую структуру – Северо-Кольская, Цагинская, Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская); (2) в пределах структуры – Щучьеозерская (рис. 2). В неоархее к областям Цагинская и Щучьеозерская было приурочено внедрение комплементарной ассоциации габбро-лабрадоритов и субщелочных гранитов [2, 5]. Терско-Аллареченская ослабленная зона контролировала формирование архейского Терско-Аллареченского зеленокаменного пояса, местоположение которого в палеопротерозое унаследует Печенга-Имандра-Варзугская рифтогенная система. Расчеты для второй базовой модели (неоархей) позволили выявить ослабленную зону Восточно-Кольскую, обрамляющую Кейвы с востока, простирающуюся субмеридионально и секущую восточную оконечность Кольского полуострова и акваторию Белого моря (рис. 2). Эта зона не отмечается как магмапроводящая, но при этом сечет под углом в 10° систему разломов (предположительно архейского возраста), представленную на тектонических схемах региона [1, 2].

Реконструкции напряженно-деформированного состояния коры для северо-востока Балтийского щита при принятых граничных условиях показали, что фундамент Кейв в неоархейское время не испытывал существенного воздействия скалывающих напряжений в отличие от сопредельных территорий [9–11]. Имеющиеся данные о палеотектонической зональности в Кольском регионе констатируют, что район Кейв на тот период относился к слабо дифференцированной области, здесь следов развития архейских зеленокаменных поясов не наблюдается в отличие от других районов региона [2].

Породы, слагающие фундамент в Центрально-Кольском блоке, в неоархее претерпели синтектонический метаморфизм высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой фаций, а в пределах Кейвской структуры следов проявления подобного метаморфизма не отмечается [8]. Следовательно, на фоне стабилизации региона термодинамические обстановки формировались дифференцированно по отдельным структурным зонам так же, как и поля скалывающих напряжений на фоне всестороннего равномерного сжатия.

В палеопротерозое имели место широкомасштабные тангенциальные напряжения, почти все архейские структурно-вещественные комплексы Кольского региона в разной степени были переработаны, и сформировалась сеть разломов, в том числе в пределах Кейв, разграничивающая структурные зоны [1]. Наиболее интенсивно деформировались шовные зоны, окаймляющие Кейвскую структуру, особенно в районе Малых Кейв, где наблюдается чешуйчато-блоковое строение [1, 2]. По аномальным значениям скалывающих напряжений отчётливо выделяется линейная зона Восточные Кейвы – Панаречка, протягивающаяся по контакту Кейвского блока с Пурначским блоком и Имандра-Варзугой и охватывающая Малые Кейвы. Она рассматривается как мобильно-проницаемая зона, определившаяся в палеопротерозое (рис. 2). Кроме этого, результаты тектонофизического моделирования показывают, что тогда были ремобилизованы по периферии Кейвской структуры зоны, сформировавшиеся в архее как ослабленные – Северо-Кольская, Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская) и Восточно-Кольская (рис. 2). Причем Восточно-Кольская зона протягивается вглубь современной акватории Баренцева моря и на своём продолжении совпадает с восточным бортом Восточно-Баренцевоморской рифтовой системы палеозойского возраста.

Выделение геофизических неоднородностей и обсуждение результатов

Выполненный анализ структуры геофизических аномалий в пределах Кейвского блока и непосредственно примыкающей к ней полосы сопредельной территории позволил построить

схемы распределения геофизических неоднородностей (рис. 2) и оценить их характер. В этих целях использованы карты гравитационного и магнитного полей масштаба 1:200000. Для характеристики гравитационного поля рассчитывались градиенты поля Δg, а порядок градиентов определялся при их нормировании относительно максимального значения по региону: 1.0–0.7 – градиент поля Δg 1-го порядка, 0.7–0.4 – 2-го порядка, < 0.4 – 3-го порядка. При анализе магнитного поля использован иной подход: выделялись отдельно локальные аномалии магнитного поля, как рядовые изометричные, так и высокоинтенсивные – > 3000 нТл. Кроме этого, на схеме распределения геофизических неоднородностей отражены оси локальных магнитных аномалий как протяжённые интенсивные, так и рядовые в рамках масштаба используемых карт. Для Кейвской зоны характерны региональные геофизические аномалии – отрицательная гравитационная и положительная магнитная. Причем границы зоны достаточно надежно выделяются в геофизических полях: (а) в гравитационном поле – градиентами поля Δg 1 и 2 порядка; (б) в магнитном поле – осями протяженных и интенсивных локальных аномалий.

Кейвская структура, в основном, вмещает архейские породы низкой плотности (граниты и гнейсы – 2.59–2.65 г/см^3, щелочные граниты – 2.60–2.63 г/см^3) [12]. Для структурных зон можно привести следующие интервалы изменения усреднённых значений петроплотностных характеристик: Верхнепонойский блок – 2.63-3.10 г/см^3; Большие и Центральные Кейвы – 2.65–2.75 г/см^3; Западные Кейвы, северная и восточная части Понойской зоны – 2.60–2.64 г/см^3; центральная часть Понойской зоны – преимущественно 2.63–2.66 г/см^3 [12]. На фоне отрицательного гравитационного поля имеются положительные локальные аномалии, охватывающие районы развития габбро-лабрадоритов, кейвских сланцев и метабазитов с повышенной плотностью – 2.80–3.10 г/см^3. В пределах Цагинского массива (габбро-лабрадоритовая интрузия, перспективная на титано-магнетито-ванадиевое оруденение) плотность титаномагнетитовых руд может быть намного выше, а среди кейвских сланцев есть разности с плотностью 2.67–2.75 г/см^3. В пределах структуры наиболее контрастно в гравитационном поле выражены массивы габбро-лабрадоритов и комплекс кейвских сланцев: границы характеризуются градиентами поля Δg 2-го порядка. Все наблюдаемые локальные аномалии гравитационного поля на территории блока совпадают с геологическими структурами, сложенными породами повышенной плотности. Таким образом, просматривается корреляция между полем Δg и петроплотностными характеристиками приповерхностных горных пород. Следовательно, можно допустить, что отрицательная гравитационная аномалия вызвана гранитами, гнейсами и щелочными гранитами, развитыми в районе.

В целом для Кейвской структуры типично слабоизрезанное положительное магнитное поле, за исключением центральной части, где присутствует высокоинтенсивное поле. Наиболее контрастно в магнитном поле выделяются массивы габбро-лабрадоритов при магнитной восприимчивости пород до $900 \cdot 10^{-6}$ СГС, здесь присутствуют титано-магнетитовые руды с магнитной восприимчивостью до $6000–16000 \cdot 10^{-6}$ СГС [12]. Для гранитов, гнейсов и щелочных гранитов приводятся значения магнитной восприимчивости в интервале $50–2000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а для кейвских сланцев – $<50 \cdot 10^{-6}$ СГС [12]. Комплексу кейвских сланцев свойственнно спокойное магнитное поле, но на территории развития гранитов, гнейсов и щелочных гранитов существует изрезанное интенсивное положительное поле. Перечисленные породы не являются существенно магнитными и не могут обусловить формирование региональной магнитной аномалии в районе исследований. Следует отметить, что метаморфическая жизнь архейских комплексов структуры в целом связана с палеопротерозоем, и породы Кейв на тот период были неравномерно преобразованы в процессе ультраметаморфизма [8], что и наложило отпечаток на их петрофизические разности. Лебяжинский и Кейвский комплексы в пределах большей части территории Кейвского блока (Большие и Центральные Кейвы, Понойская зона, Малые Кейвы)

были метаморфизованы в условиях дистен-ставролитовой субфации. В зонах нахождения щелочных гранитов в Западных Кейвах и в обрамлении Кейвского блока метаморфизм на тот период достигал силлиманитовой субфации с развитием процессов мигматизации и щелочного метасоматоза. При этом в Западных Кейвах контактово-метасоматические воздействия щелочных гранитов на породы Лебяжинского и Кейвского комплексов проявились в региональном масштабе.

Магнитные свойства пород района в процессе гранитизации могли изменяться неравномерно: на средних уровнях гранитизации плагиогнейсов и гранодиоритов наблюдается возрастание магнитной восприимчивости от 100–200 до $1000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а затем её снижение до уровня $30 \cdot 10^{-6}$ СГС [4]. На магнитные свойства пород также влияли наложенные процессы щелочного метасамотоза, который регионально проявлен в толще лебяжинских гнейсов, где магнитная восприимчивость пород на средних стадиях процесса может достигать $3000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а на его конечных стадиях уменьшаться в 3–4 раза [12]. Таким образом, наблюдаемое региональное магнитное поле на территории Кейв в полной мере нельзя объяснить существующей намагниченностью поверхностных пород, так как петромагнитная карта района [12] на большей его части не соответствует характеру распределения магнитных аномалий. Не исключено, что существующие особенности регионального поля отражают как интенсивность намагничения глубинных слоёв земной коры, так и развитие процессов гранитизации и метаморфизма в её верхней части.

Массивы Цагинский, Щучьеозерский и Медвежьеозерский в силу своих больших размеров наиболее контрастно выделяются в геофизических полях и отличаются максимальными значениями магнитного и гравитационного полей (рис. 2). При этом область повышенных значений поля Δg и ΔZ перекрывает не только территорию Цагинского массива, но и простирается в северном, северо-восточном и восточном направлении. Аномальная область, перекрывающая Цагинский массив и протягивающаяся полосой в северо-восточном направлении, постепенно меняя направление на восточное, сливается с аномальной областью, перекрывающей Щучьеозерский и Медвежьеозерский габбро-лабрадоритовые массивы. Не исключено, что Цагинский массив продолжается далеко за пределы своих границ, устанавливаемых на эрозионной поверхности. Выделенные ослабленные зоны Цагинская и Щучьеозерская, пересекающиеся под углом в 70° (рис. 2), коррелируют с местоположением областей аномальных значений гравитационного и магнитного полей. Следовательно, эти зоны контролировали внедрение и формирование одновозрастных сближенных интрузивов – Цагинского, Щучьеозерского и Медвежьеозерского, которые сейчас могут представлять фрагменты первоначально крупного и сложного тела.

Выявленная конфигурация осей локальных магнитных аномалий в пределах Кейвской структуры (рис. 2) имеет сложный и неоднородный характер. В зависимости от ориентации осей выделяются отдельные области по однородности создаваемого рисунка, границы которых не совпадают с контактами известных структурных зон за исключением Верхнепонойского блока. В отличие от других зон в его пределах характер рисунка выдержанный: наблюдаются два сближенных купола изометричной формы, оконтуренные градиентами поля Δg 3 порядка и осями локальных магнитных аномалий. Видимо, эти купола отображают жесткий комплекс основания структуры, разбитый на два блока. Центральные Кейвы и Большие Кейвы имеют схожую структуру ориентации осей магнитных аномалий, непротяжённых и незначительно осложнённых складчатостью. При этом комплекс кейвских сланцев, протягивающийся от Западных Кейв по северной части Понойской зоны и по всей территории Больших Кейв, в магнитном поле не выражен, а его границы выделяются градиентами поля Δg .

Наиболее сложная схема ориентации осей магнитных аномалий присутствует в пределах Западных Кейвах: оси интенсивно сминаются в складки. Западные Кейвы в основном сложены щелочными гранитами, которые, как предполагается, первоначально имели пластовую форму

[8]. Центральная часть этих интрузий слабо магнитна, но породы в зоне эндоконтакта могут быть сильно магнитными [12]. Видимо, в пределах Верхнепонойского блока, Западных Кейв и Понойской зоны протяжённые магнитные аномалии, в основном, контролируются эндоконтактами щелочных гранитов. В пределах Больших и Центральных Кейв значительный вклад в повышение интенсивности магнитного поля внесли продукты гранитизации и щелочного метасамотоза кейвских гнейсов. По характеру распределения геофизических неоднородностей наименее однородной можно признать Понойскую зону, которая делится на 3 части: северная, центральная и восточная. Для центральной части зоны характерны протяжённые оси аномалий с запада на восток, а в северной и восточной частях – смятие в складки. Причем в северной части характер распределения осей магнитных аномалий схож с Западными Кейвами, и оси также образуют конформные очертания с выходами комплекса кейвских сланцев в этом районе. На территории Малых Кейв получена та же картина, что в восточной части Понойской зоны.

Как показывает анализ построенной схемы распределения геофизических неоднородностей (рис. 2), степень осложненности конфигурации осей магнитных аномалий коррелирует с распределением петроплотностных характеристик пород Кейвской структуры: чем плотнее порода, тем менее осложнена структура геофизических неоднородностей. Следовательно, наиболее стабильной структурой является Верхнепонойский блок, который реагировал на давление соседних структур как жёсткое тело. Большие и Центральные Кейвы в целом сохранили жёсткость, но их краевые части испытали складчатость и магматическую активизацию, что и демонстрируется на примере северо-западной и юго-восточной краевых частях комплекса кейвских сланцев. Реакция остальных, менее жёстких, участков земной коры Кейвской структуры (Западные Кейвы, северная и восточная части Понойской зоны) на напряженно-деформированное состояние среды проявилась в виде интенсивной складчатости, подтверждаемой сложной конфигурацией осей локальных магнитных аномалий.

В неоархее район Кейв особых дислокаций не претерпевал, но палеопротерозойский период развития Кольского региона отмечается формированием сводового поднятия коры, в пределах которого возникла интракратонная Печенга-Имандра-Варзугская рифтогенная система [1, 2]. Имандра-Варзугская структура, примыкающая к Кейвскому блоку с юга, составляет юго-восточный фланг рифтогенной системы. Возраст внедрения ассоциации габбро-лабрадоритов и щелочных гранитов (2.68–2.63 млрд лет [5]), реперной для условий геодинамического режима предрифтогенного сводообразования [2], дает основание полагать, что формирование свода, предопределившее начальный этап континентального рифтогенеза в Кольском регионе, началось в неоархее и охватило Кейвский блок. Результаты выполненного тектонофизического моделирования показывают, что в Кейвах на тот период создавались условия, при которых породы структуры были в меньшей степени подвержены тектоно-термальной переработке, так как возникающие скалывающие напряжения были незначительны [10, 11]. По геологическим данным, в районе для неоархея фиксируется размещение низкотемпературных метаморфических фаций неустановленного типа [8], это корреспондируется с результатами моделирования. Наиболее ранние структурные и метаморфические парагенезисы наблюдаются в породах Лебяжинского и Кейвского комплексов, а устанавливаемая по минеральным парагенезисам их структурно-метаморфическая история в основном относится к началу палеопротерозойского геотектонического периода [8]. На рис. 3 представлен обобщённый тренд термобарических условий метаморфизма в Кейвском блоке. Развитие региональных метаморфических процессов на всех стадиях тектоно-метаморфической истории супракомплекса происходило в кианитовом P-T-поле.

Геодинамический режим сумийского этапа рифтинга приводил к образованию различных по размеру и скорости прогибания грабенообразных впадин в пределах развития рифтогенной системы [1, 2]. Одновременно в Кейвском блоке формировалась вулканогенно-осадочная толща хребта Серповидный, породы которой сходны с ятулийскими образованиям Имандра-Варзуги. Складчатость в пределах Кейв на тот период формировалась в обстановке оседания свода,

что вызывало неравномерные радиальные подвижки блоков земной коры. Предполагаются достаточно кратковременные и интенсивные движения. Большую роль в этом процессе сыграли более стабильные, жёсткие и однородные участки земной коры как в пределах Кейвской структуры, так и на её контактах. Не исключено, что складчатый характер Западных Кейв и северной части Понойской зоны на тот период формировался на фоне относительного воздымания Верхнепонойского блока, так как в настоящее время на эрозионном срезе наблюдается нижняя расщеплённая часть Щучьеозерского и Медвежьеозерского габбро-лабрадоритовых массивов. Тектонические движения сопровождались вертикальными деформациями супракомплексов, что обусловило развитие геотермально-статического метаморфизма (начальный метаморфизм) [8].

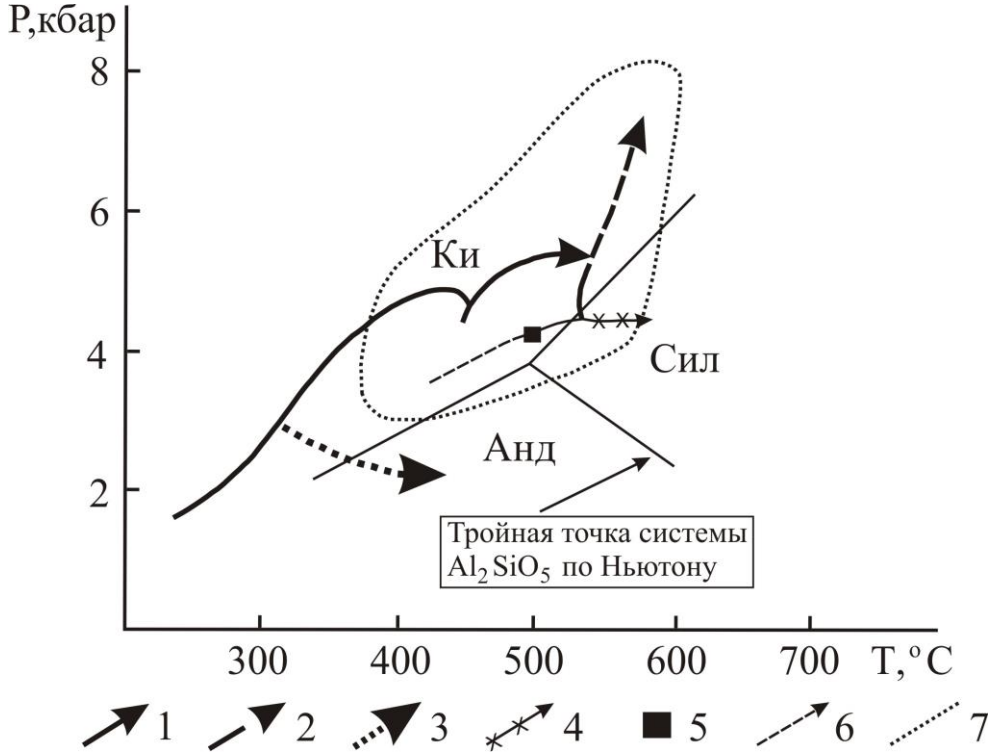


Рис. 3. Эволюция термодинамических условий метаморфизма пород Кейвского комплекса:
1 – прогрессивный метаморфизм, сопряжённый со складчатыми деформациями; 2 – метаморфизм в сдвиго-надвиговых зонах; 3 – андалузитовый порфиробластез; 4 – контактовый метаморфизм щелочных гранитов; 5 – амазонитовые пегматиты; 6 – регрессивный метаморфизм; 7 – поле P-T-оценок по гранат-биотит-плагиоклазовому геотермобарометру. Ки – кианит, Анд – андалузит, Сил – силлиманит

Кианитовые руды месторождения Кейв в большей мере появляются вследствие наложения различных по природе деформационных и метаморфических процессов. Так, уникальные, наиболее интересные в промышленном отношении конкреционные и тонкозернистые кианитовые руды формировались уже на начальных стадиях геотермального метаморфизма в условиях зеленосланцевой фации в обстановке доминирования радиального сжатия. В линейных зонах (по периферии структуры), контролируемых лишь пластовыми базитовыми интрузиями, развивались процессы андалузитового порфиробластеза. Следовательно, первая фаза складчатости и начальный метаморфизм в пределах структуры проходили синхронно

на фоне глыбово-волновых колебательных движений поверхности земной коры в сумийское время в период развития рифтового прогиба в Имандра-Варзугской системе.

Последующая активизация тектонических движений в регионе вследствие развития Печенга-Имандра-Варзугской рифтогенной системы сопровождалась последовательным переходом от существенно вертикальных к тангенциальным деформациям супракомплексов, что определило в Кейвах замену геотермально-статического метаморфизма геотермально-динамическим, а затем тектоническим. Некоторое снижение температуры в пределах эпидот-амфиболитовой низкотемпературной амфиболитовой фации предшествовало развитию северо-восточной фазы складчатости и связанному с ней метаморфизму (рис. 3). Следует отметить, что эта стадия в целом характеризуется прогрессивным трендом температуры и давления.

В свекофенский период (1.9–1.7 млрд лет назад) Кольский регион уже находился под влиянием интенсивных тангенциальных напряжений [1, 2], на этом фоне напряжения, естественно, не могли реализоваться в пределах Кейв равномерно из-за присутствия блоков с разным типом реакции на последующие деформации. Перестройка архейского структурного плана региона на тот период в первую очередь обусловлена наложением деформаций, проявившихся при сжатии. В зависимости от определённых факторов (векторы подвижек блоков коры, как контактирующих с Кейвской структурой, так и в её пределах; физические свойства ее отдельных блоков) геологические образования, различные по форме, положению в пространстве, размерам и физическому состоянию, реагировали дифференцированно на возникающее напряженно-деформированное состояние среды и подвергались неоднородным деформациям. Как следствие, имеет место неравномерное формирование структурных нарушений и их локализация в отдельных участках, а также латеральная неоднородность метаморфических преобразований. Метаморфические преобразования в породах Кейвской структуры, связанные с развитием надвиговых деформаций, непосредственно следовавших за кульминацией регионального метаморфизма, характеризуются повышенными давлениями (рис. 3). Однако имеются признаки как значительных вариаций давлений, так и декомпрессии (на примере зон порфиробластеза в отдельных структурах) [8]. Что касается щелочных гранитов, развитие контактово-метаморфических процессов происходило при более низких давлениях по сравнению с кульминацией регионального метаморфизма (рис. 3).

Развитие прогрессивного синтектонического метаморфизма амфиболитовой фации, сопряженного с развитием северо-западной линейной складчатости в свекофенский период, а затем и формирование наложенных северо-западных складок обусловили перекристаллизацию ранних типов руд, укрупнение их зернистости, улучшение их технологических свойств. Перекристаллизация кианита вызвана прогрессивным изменением термодинамических условий метаморфизма, которые повсеместно проявились в регионе на данном этапе развития, сопровождаемом сдвиго-надвиговыми и разломными деформациями при захлопывании Имандра-Варзугского трога. В этот период породы Кейв претерпели второй этап складчатости и полный тектонометаморфический цикл преобразований. Завершающим стадиям тектонометаморфического развития Кейвского блока свойственно снижение температуры и давления, что было характерно и для всей Печенга-Имандра-Варзугской системы.

Выводы

Выполненное моделирование выявило, что области развития тектономагматической активности региона в архее и палеопротерозое коррелируют с местоположением ослабленных зон в фундаменте Кейвской структуры, выделенных по аномальным значениям рассчитанных скалывающих напряжений, возникающих в коре под воздействием удаленных сил и при условии, что земная кора северо-восточной части Балтийского щита развивалась в условиях внутриплитного режима. При этом четко прослеживается унаследованность положения магмапроводящих структур от архея до палеопротерозоя, что не противоречит имеющимся геологическим данным.

Характер распределения геофизических неоднородностей района показывает, что границы ранее выделенных структурных зон в пределах Кейв [1] зачастую разделяют однородные геологические комплексы, за исключением Верхнепонойского блока. По степени осложнённости конфигурации осей магнитных аномалий и их корреляции с петроплотностными характеристиками пород выделены две новые структуры, включающие в себя: 1) Западные Кейвы и северную часть Понойской зоны, 2) Малые Кейвы и южную часть Понойской зоны. В качестве Понойской зоны можно оставить только ее центральную часть.

Выполненная корреляция деформационных и метаморфических парагенезов указывает на то, что перестройка структурного плана и термодинамические режимы метаморфизма в Кейвской зоне были сопряжены с геотектоническим режимом развития Имандра-Варзугской структуры, являющейся восточным флангом рифтогенной системы Печенга-Имандра-Варзуга. Последовательное изменение тектонического режима и характера метаморфических процессов оказали существенное влияние на вещественный состав, строение и технологические свойства кианитовых руд месторождения Кейв.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Загородный В.Г., Радченко А.Т.* Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова (состояние изученности и проблемы). Л.: Наука, 1983. 96 с. **2.** Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:500000) / *А.Т. Радченко, В.В. Балаганский, А.Н. Виноградов, Г.Б. Голионко, В.П. Петров, В.И.Пожиленко, М.К. Радченко*. СПб.: Наука, 1992. 111 с. **3.** Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / *F.P. Mitrofanov, V.I. Pozhilenko, V.F. Smolkin, A.A. Arzamastsev, V.Ya. Yevzerov, V.V. Lyubtsov, E.V. Shipilov, S.B. Nikolaeva, Zh.A. Fedotov.* Apatity: KSC RAS, 1995. 144 p. **4.** *Мирская Д.Д.* Супракрустальные формации Кейвской зоны // Геология и геохимия метаморфических комплексов Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1975. С. 23–35. **5.** Каталог геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита / *Т.Б. Баянова, В.И. Пожиленко, В.Ф. Смолькин, Н.М. Кудряшов, Т.В. Каулина, В.Р. Ветрин.* Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2002. 53 с. **6.** *Балаганский В.В., Мыскова Т.А., Скублов С.Г.* О возрасте палеопротерозойской коллизии на юго-востоке Кольского региона, Балтийский щит // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: труды X Всерос. Ферсмановской науч. сессии, посвящённой 150-летию со дня рождения акад. В.И. Вернадского (Апатиты, 8–9 апреля 2013 г.) / Геологический ин-т КНЦ РАН. Апатиты, 2013. С. 13–16. **7.** Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова / *А.П. Белолипецкий, В.Г. Гаскельберг, Л.А. Гаскельберг, Е.С. Антонюк, Ю.И. Ильин*. Л.: Наука, 1980. 240 с. **8.** *Петров В.П.* Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 325 с. **9.** *Филатова В.Т.* Мобильно-проницаемые зоны в фундаменте северо-восточной части Балтийского щита и условия их локализации // Геофиз. журн. НАН Украины. 2012. Т. 34, №1. С. 50–62. **10.** *Филатова В.Т.* Формирование каркасных тектоногенов в северо-восточной части Балтийского щита // ДАН. 2014. Т. 455, № 4. С. 464–470. **11.** *Filatova V.* Tectonophysical conditions of magma feeding channels formation in the Archaean basement of the north-eastern Baltic Shield // Proc. the 34th Intern. Geol. Congr. (5–10 August 2012, Brisbane, Australia). Brisbane, 2012. P. 2254. **12.** *Верба В.В., Гаскельберг В.Г., Зайцев В.Г.* Петрофизическая характеристика докембрийских комплексов северо-восточной части Кольского полуострова // Петрофизическая характеристика советской части Балтийского щита. Апатиты: КФАН СССР, 1976. С. 34–38.

Сведения об авторах

Филатова Валентина Тимофеевна – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН; e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru

Петров Валентин Петрович – д.г.-м.н., зам. председателя КНЦ РАН;
e-mail: petrov@admksc.apatity.ru

УДК 550.388.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Е.Д. Терещенко, А.Н. Миличенко, М.В. Швец, С.М. Черняков, И.В. Кораблева
Полярный геофизический институт КНЦ РАН

Аннотация

В работе представлен метод оперативного определения полного электронного содержания по сигналам спутников Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС. Проведено сравнение рассчитанных значений полного электронного содержания по сигналам спутников ГЛОНАСС с величинами полного электронного содержания, полученными по расчетам глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM и данным глобальной ионосферной карты GIM.

Ключевые слова:

Глобальная навигационная спутниковая система, полное электронное содержание, дифференциальная кодовая задержка.

Введение

Исследование природы околоземного космического пространства представляет собой фундаментальную проблему, важную как для научных, так прикладных целей. При ее решении используют различные экспериментальные и модельные методы. С запуском космических аппаратов на околоземную орбиту начали развиваться спутниковые методы изучения окружающей среды.

После запуска на орбиту спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS (Global Positioning System / глобальная система позиционирования), ГЛОбальной НАвигационной Спутниковой Системы (ГЛОНАСС), развертывания в последнее время европейской системы Галилео (Galileo) и китайской – Бэйдоу (Beidou) спутники этих систем стали активно использоваться для исследования ионосферы.

Подсистема спутников системы ГЛОНАСС состоит из 24 навигационных спутников, находящихся на круговых орбитах высотой 19 100 км, наклонением 64.8° и периодом обращения 11 часов 15 минут в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по долготе на 120°. В каждой орбитальной плоскости размещаются по 8 спутников [1]. Спутниковая группировка системы GPS обращается вокруг Земли по круговым орбитам с одной высотой порядка 20 200 км и периодом обращения 11 часов 58 минут. Наклонение орбиты 55° – общее для всех спутников системы. Спутники системы GPS обращаются вокруг Земли в 6 различных плоскостях, по 4 аппарата в каждой [2].

Спутники этих систем излучают две, а в последнее время уже и три когерентные частоты, что позволяет рассчитывать полное электронное содержание (ПЭС) вдоль луча зрения от приемника ГНСС до спутника. Расчет ПЭС основан на дисперсионной зависимости показателя преломления радиоволн, распространяющихся через ионосферу, и учитывает электронную концентрацию на пути распространения радиоволны. Среда распространения оказывает влияние на характеристики распространяющегося сигнала, поэтому анализ изменений сигнала позволяет получить характеристики среды и, таким образом, осуществлять ее дистанционное зондирование. Конфигурация ГНСС обеспечивает непрерывный и глобальный прием навигационных сигналов, поскольку в поле зрения приемника потребителя ГЛОНАСС/GPS всегда находится как минимум 8 непрерывно перемещающихся спутников. Это позволяет получать распределение ПЭС в пространстве и во времени [3]. Спутники системы

ГЛОНАСС имеют бóльшее наклонение орбиты, чем спутники других ГНСС, что дает преимущество при исследовании процессов в высоких широтах.

Спутники системы GPS излучают когерентные радиоволны двух частот – f_1 = 1575.42 МГц (поддиапазон частот L1) и f_2 = 1227.60 МГц (поддиапазон частот L2). Каждая из этих частот промодулирована своим псевдослучайным дальномерным кодом. GPS-приемники имеют собственный генератор с теми же частотами f_1 и f_2, что и генератор спутника, в приемнике эти сигналы также модулируются псевдослучайным дальномерным кодом, идентичным коду спутника. Время распространения сигнала от генератора сигналов спутника до цифрового процессора приемника при кодовых измерениях получают при корреляционной обработке одинаковых участков кода, сгенерированного приемником и принятого со спутника.

Спутники ГЛОНАСС также излучают две частоты, но номинальные значения несущих частот излучения каждого спутника отличаются и могут быть рассчитаны по следующим формулам:

f_{1K} = (1602+ K·562.5) МГц,

f_{2K} = (1246+ K·437.5) МГц,

где K = -7,…,0,…, 6 – номера несущих частот навигационных радиосигналов, излучаемых спутниками в частотных поддиапазонах L1 и L2 соответственно. У каждого спутника рабочие частоты когерентны и формируются от общего стандарта частоты. Для определения времени распространения сигнала в системе ГЛОНАСС также используется корреляционная обработка псевдослучайного дальномерного кода. В системе GPS разделение сигналов кодовое: спутники излучают на одних и тех же частотах, но каждый имеет свой код. Система ГЛОНАСС использует частотное разделение сигналов: каждый спутник имеет свои частоты, но у всех одинаковые коды.

Методы расчета ПЭС при распространении сигналов спутников ГНСС в ионизированной среде постоянно совершенствуются. Одним из основных источников ошибки при оценке ПЭС являются инструментальные задержки, т.е. временные задержки прохождения сигналов по цепям приемника потребителя и передатчика спутника. Задержка сигнала в цепях передатчика спутника и приемника потребителя зависит от частоты сигнала, передаваемого спутником, что вызывает смещение сигналов на частотах f_1 и f_2 относительно друг друга. Обычно их называют дифференциальными кодовыми задержками (differential code biases, DCBs). Все спутники системы GPS излучают сигналы на двух одинаковых частотах f_1 и f_2. Спутники GPS имеют индивидуальные задержки этих сигналов в передающих цепях, но в цепях конкретного приемника потребителя каждая частота имеет одинаковую задержку. Спутники ГЛОНАСС передают сигналы на различных частотах f_{1K} и f_{2K}. Задержки сигнала у спутников различны внутри передающих цепей, и при этом в приемнике ГЛОНАСС каждая частота f_{1K} и f_{2K} также имеет свою задержку. Такое частотное разделение сигналов усложняет задачу определения дифференциальных кодовых задержек для сигналов спутников ГЛОНАСС.

Дифференциальные кодовые задержки участвуют в расчете ПЭС как вклад «виртуальной» ионизованной составляющей среды, вызвавшей смещение сигналов относительно друг друга. DCBs сигналов в цепях аппаратуры спутников и приемников могут достигать нескольких десятков наносекунд, что сравнимо или даже превосходит реально получаемые значения ПЭС [4, 5]. Ошибка в одну наносекунду равна приблизительно 2.9 TECU, где TECU – внесистемная общепринятая единица ПЭС, равная 10^{16} электрон/м^2.

Определение ошибок измерения времени распространения сигнала, вызванных дифференциальными кодовыми задержками в цепях передатчика спутника и приемника потребителя, – важный элемент в задаче определения полного электронного содержания между спутником и приемником. Для спутников GPS она решена в том или ином приближении, для спутников ГЛОНАСС пока нет. Авторы настоящей статьи предлагают метод оперативного определения ПЭС по сигналам спутников ГЛОНАСС.

1. Метод определения полного электронного содержания с помощью сигналов спутников ГЛОНАСС

1.1. Полное электронное содержание: основные понятия

Исходные данные для расчета ПЭС получают в виде бинарных файлов, формируемых в приемнике потребителя. Для того чтобы с ними можно было работать, бинарные данные переводят в текстовый вид. Формат получаемых текстовых файлов унифицирован и представляет собой международный аппаратно-независимый формат обмена данными для файлов исходных данных спутниковых навигационных приемников, позволяющий производить постобработку полученных данных. Его общепринятое название RINEX (The Receiver Independent Exchange Format). Основные исходные данные для расчета ПЭС (псевдодальности $P1$ и $P2$, фазы $L1$ и $L2$, для поддиапазонов L1 и L2, соответственно) берутся из файлов RINEX [6]. Псевдодальность определяется из кодовых измерений как расстояние между спутником и приемником, вычисленное по времени распространения сигнала без поправки на расхождение часов спутника и приемника. Время распространения сигнала можно разделить на три различные составляющие: задержку сигнала, происходящую на спутнике между генерацией сигнала и его передачей из антенны спутника; время прохождения сигнала от передающей антенны до антенны приемника и задержку сигнала между принимающей антенной и коррелятором сигналов в приемнике. Временная разность включает также уход часов спутника и приемника, многолучевость принимаемого сигнала, погрешность измерения. Поскольку рассчитанная таким образом дальность не является геометрической дальностью от антенны приемника до антенны спутника, ее называют псевдодальностью. При фазовых измерениях выполняют измерение разности фаз сигналов – приходящего (со спутника) и опорного (в приемнике) несущей частоты с неопределенным начальным значением числа циклов (волн) (так называемая начальная фаза сигнала – полное изменении фазы при распространении сигнала от генератора спутника до процессора приемника в начальный момент записи сигнала в приемнике потребителя). Значения фазы несущих обозначают $L1$ и $L2$ и выражают, как правило, в целых циклах.

В общем виде формулу расчета ПЭС можно записать:

$$I = \int_0^l n_e dl ,$$

где I – полное электронное содержание, n_e – локальная электронная концентрация, l – расстояние по прямой линии между приемником и передатчиком.

Применительно к расчетам по кодовым (псевдодальностям) и фазовым измерениям сигналов спутников ГНСС полное электронное содержание вдоль луча зрения от приемника до спутника вычисляют по следующим формулам [3]:

а) по псевдодальностям с неизвестными дифференциальными кодовыми задержками:

$$I_{SPb} = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left(P2 - P1\right), \tag{1}$$

где f_1 – частота поддиапазона L1, f_2 – частота поддиапазона L2, $P1$ – измеренная псевдодальность на частоте $f1$, $P2$ – измеренная псевдодальность на частоте $f2$;

б) по фазовым измерениям с неизвестной начальной фазой:

$$I_{SLc} = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left(L1 \cdot \lambda_1 - L2 \cdot \lambda_2\right), \tag{2}$$

где $L1 \cdot \lambda_1$ и $L2 \cdot \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала в ионосфере, $L1 = \Delta\varphi/2\pi$ и $L2 = \Delta\varphi/2\pi$ – фазовые измерения ГНСС приемника, выполненные на частоте f_1 и f_2 соответственно. Полное электронное содержание I_{SPb} и I_{SLc} называют также наклонным ПЭС (англ. slant TEC).

Реальные значения наклонного ПЭС, получаемые по псевдодальностям, можно вычислить, если будут известны дифференциальные кодовые задержки:

$$I_{SP} = I_{SPb} - (B_s + B_r), \quad (3)$$

$$B_s + B_r = \frac{1}{40.38}\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\left(b_s + b_s\right), \quad (4)$$

где I_{SP} – абсолютное ПЭС по измерениям псевдодальностей, b_s – дифференциальные кодовые задержки в аппаратуре спутника, b_r – дифференциальные кодовые задержки в аппаратуре приемника.

Вариации ПЭС, получаемые по измерениям псевдодальностей, сильно зашумлены из-за эффекта многолучевости: уровень шума составляет в среднем несколько TECU (рис. 1, верхняя сплошная линия). Это делает практически невозможным выделение полезных вариаций ПЭС. В то же время, значения ПЭС, полученные по фазовым измерениям, зашумлены значительно меньше, поэтому для ионосферных исследований предпочтительно используют их (рис. 1, нижняя сплошная линия).

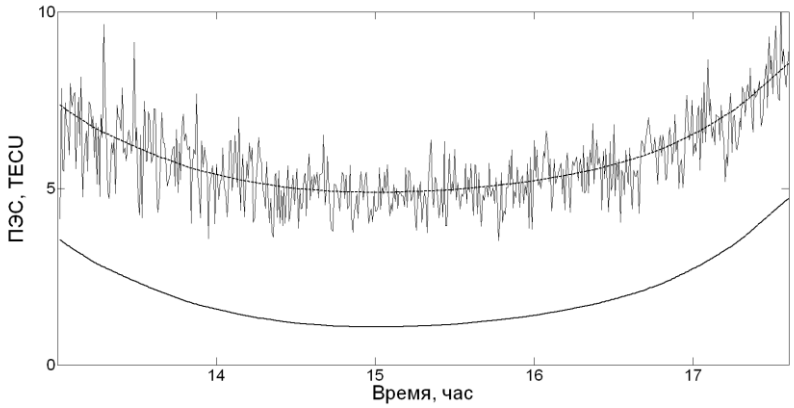


Рис. 1. Полное электронное содержание, рассчитанное по измерениям псевдодальностей и по фазовым измерениям, без учета дифференциальных кодовых задержек и начальной фазы

Отсутствие информации о начальной фазе сигнала не дает возможность рассчитать абсолютные значения ПЭС по фазовым измерениям и использовать их для анализа состояния ионизированной среды. Для того чтобы получить значения ПЭС по фазовым измерениям, сначала рассчитывают, несмотря на многолучевость сигнала, значения ПЭС из псевдодальностей I_{SP}. Откорректированные значения ПЭС по фазовым измерениям I_{SL} для данного пролета спутника получают по формулам (5) и (6) [7]:

$$I_{SL} = I_{SLc} + C_{rs}, \quad (5)$$

$$C_{rs} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(I_{SP_i} - I_{SLc_i}\right)^2}{N}}, \quad (6)$$

где C_{rs} – величина коррекции, полученная из исходных ПЭС методом наименьших квадратов; N – число измерений, используемых для расчета ПЭС. Результат такой коррекции приведен на рис. 1. Верхняя штриховая кривая показывает положение скорректированного фазового ПЭС I_{SL}.

Значение наклонного ПЭС вычисляют интегрированием электронной концентрации вдоль линии зрения от антенны приемника на спутник, и его нельзя отнести к какой-то конкретной точке пространства. В таком виде ПЭС применяется для решения некоторых задач, но при необходимости высотной локализации возмущений возникает неопределенность

в их положении. В этом случае более удобна величина, которую называют вертикальным полным электронным содержанием (ВПЭС). Для того чтобы привязать ПЭС к какой-либо высоте на линии зрения и получить ВПЭС, используют приближение тонкого фазового экрана [8], согласно которому изменения в сигнале происходят лишь на этом экране, расположенном на какой-то высоте. При обработке результатов вычислений выбирается некоторая высота h_i, на которой находится центр тяжести профиля электронной концентрации, построенного вдоль линии зрения, или высота, в области которой считается, что ионосфера дает наибольший вклад в ПЭС вдоль линии зрения. В месте пересечения луча зрения с этой высотой, которую называют ионосферной точкой (точкой прокола или прокалывания ионосферы, англ. ionosphere pierce point, IPP), выполняется геометрический пересчёт наклонного ПЭС в ВПЭС.

$$I_V = I_S \cdot \sqrt{1-\left(\frac{R_e \cdot \cos(\varepsilon)}{R_e + h_i}\right)}, \tag{7}$$

где I_V – вертикальное полное электронное содержание; I_S – наклонное полное электронное содержание; R_e – средний радиус Земли; h_i – высота ионосферной точки; ε – угол возвышения спутника. При выборе ионосферной точки обычно полагают, что этот выбор для спутников ГНСС не критичен при высоте угла возвышения более 30°, а высота 400 км вполне подходит для решения большинства задач [3]. Тем не менее, выбор высоты пересчета ПЭС в ВПЭС всегда определяется в каждом конкретном случае в зависимости от решаемой задачи.

1.2. Методы определения ПЭС

Для того чтобы получить точные оценки ПЭС, необходимо удалить из рассчитываемых величин вклад дифференциальных кодовых задержек – основной источник ошибки при определении ПЭС. Величины дифференциальных кодовых задержек различны у различных спутников ГНСС и приемников. Помимо необходимости определения дифференциальных кодовых задержек существует проблема их стабильности. Большинство оценок основано на предположении, что величины этих задержек постоянны в течение суток и даже нескольких месяцев [4, 9]. Есть наблюдения, которые показывают, что значения дифференциальных кодовых задержек могут измениться в течение суток и даже в течение часа [10]. При этом их величины зависят от состояния ионосферы. Зарубежные специалисты статистически изучили различие между дифференциальными кодовыми задержками, полученными из данных GPS, для спокойных и возмущенных геомагнитных дней [11]. Оказалось, что среднеквадратичное отклонение дифференциальных кодовых задержек в возмущенные дни больше, чем в геомагнитно спокойные. Учитывая изменчивость поведения высокоширотной ионосферы, проблема определения надежных значений DCBs для расчета ПЭС становится более актуальной. Для определения DCBs не удается полноценно использовать инструментальные методы. Лишь малое число приемников имеет внутреннюю систему определения дифференциальных кодовых задержек. Инструментальные задержки спутниковой аппаратуры, полученные при ее калибровке в предпусковой период, плохо согласуются с оценками, получаемыми из наблюдений в процессе эксплуатации спутниковой аппаратуры [4, 12].

Важность определения DCBs для получения надежных оценок ПЭС способствует развитию различных методов. Большинство таких методов рассматривают модели ионосферы в виде сферического бесконечно тонкого слоя в пренебрежении горизонтальными градиентами электронной концентрации и резкими изменениями ионосферы [4, 7, 9–14]. Для анализа используются различные математические методы: наименьших квадратов или сферических гармоник [12–14], фильтрации Кальмана [9], искусственной нейронной сети [15]. Часть моделей проверяет точность своих модельных расчетов, сравнивая их с прямыми ионосферными измерениями радаров, спутников или общепринятыми моделями ионосферы [16–18].

В зависимости от количества станций, используемых для расчета, методы можно классифицировать как глобальные, региональные или локальные.

Наиболее развитым и общеупотребительным является метод получения DCBs, используемый в настоящее время Международной службой ГНСС (International GNSS Service, IGS) [6, 19–21]. Он позволяет получать DCBs и рассчитывать ПЭС для приемников, которые входят в сеть IGS, на основе построения глобальной ионосферной карты (англ. Global Ionospheric Map, GIM) абсолютного, т.е. рассчитанного с учетом всех дифференциальных кодовых задержек, вертикального полного электронного содержания (АВПЭС) по данным около 200 станций сети IGS. Эта технология разработана в нескольких исследовательских центрах и обеспечивает построение глобальных карт АВПЭС путем интерполяции данных, получаемых на мировой сети приемников ГНСС. Для построения карт АВПЭС используют модифицированную модель одного слоя [20], подобную модели фазового экрана. В месте пересечения луча зрения на спутник с модельным слоем (ионосферная точка) на высоте 506.7 км производят перерасчет абсолютного наклонного ПЭС в ВПЭС. При этом считается, что наклонное ПЭС полностью формируется в ионосферной точке. Для удобства пользователей разработан специальный стандартный формат IONEX. Файлы такого формата содержат в цифровом виде значения АВПЭС и соответствующие им карты погрешностей вычисления АВПЭС за одни сутки по шкале мирового времени с временным разрешением 2 часа. Пространственный диапазон карт АВПЭС: от -180° до 180° по долготе и от -87.5 до 87.5° по широте. Пространственное разрешение карт задается шагом по долготе (5°) и шагом по широте (2.5°). Коррекция результатов расчета вертикального ПЭС приемника сети IGS по рассчитанной глобальной ионосферной карте автоматизирована и позволяет вычислить отклонение рассчитанного ВПЭС по данным приемника IGS от «истинной» величины ВПЭС и, таким образом, найти DCBs для этого приемника и спутника, по сигналам которого рассчитывалось вертикальное ПЭС. Несмотря на большое число используемых приемников и развитую математическую теорию обработки данных, ошибки расчета АВПЭС в узлах карты достигают 2–8 TECU.

Большое число приемников сигналов спутников ГНСС не входит в сеть IGS, поэтому при их использовании не удается воспользоваться сервисом IGS. В работе [10] предложен метод расчета DCBs для одиночных приемников GPS или региональной сети приемников GPS (не входят в систему IGS), использующий для контроля получаемых значений вертикального ПЭС глобальные ионосферные карты АВПЭС службы IGS. Модельная ионосфера в районе наблюдения описывается сферическими гармоническими функциями. По полученным при наблюдениях сигналов спутников системы GPS псевдодальностям (предварительно сглаженным) рассчитывается вертикальное ПЭС с привлечением модифицированной модели одного слоя. Используя метод наименьших квадратов, подгоняют значения рассчитанных и модельных значений вертикального ПЭС. Ввод дополнительного условия – сумма всех DCBs спутников равна нулю – позволяет разделить дифференциальные кодовые задержки приемников и спутников. В результате авторами показано, что предлагаемый метод дает значения DCBs, согласующиеся с оценками, получаемыми службой IGS. Абсолютные разности между значениями DCBs, получаемые с помощью этого метода, и значениями службы IGS не превышают 0.7 нс, а среднеквадратичное отклонение – меньше 0.4 нм при использовании данных одного приемника. Привлечение дополнительных приемников в районе наблюдения (региональная сеть) дает лучшее согласие. Авторами размещен для свободного использования пакет программ M_DCB расчета DCBs на основе предложенного метода [22]. Использование этого пакета позволяет получать значения DCBs для спутников GPS, но не дает такой возможности для спутников ГЛОНАСС.

Для проверки работоспособности пакета программ в условиях высокоширотной ионосферы были рассчитаны значения абсолютного наклонного ПЭС по исходным данным приемника TRO1 сети IGS (приемник Trimble NetR8 GNSS Reference Receiver, Тромсё, Норвегия, 69.66 с.ш.,

18.94 в.д.). Для расчета был выбран пролет спутника GPS G1 21 октября 2013 г. Фазы и псевдодальности, полученные приемником TRO1, взяты из открытого доступа [23].

На рис. 2 даны графики абсолютного наклонного ПЭС, рассчитанного по измерениям фазы спутника GPS G1, при учете дифференциальных кодовых задержек, предоставляемых службой IGS для приемной станции TRO1 ($I_{SLIGSG1}$, нижняя кривая), и по методике M_DCB (I_{SLG1}, верхняя кривая). По оси абсцисс нанесено время записи сигнала спутника в UT, по оси ординат – полное электронное содержание в TECU. Сдвиг в абсолютных значениях ПЭС между этими кривыми около 1 TECU, что не превышает погрешности построения глобальных ионосферных карт GIM.

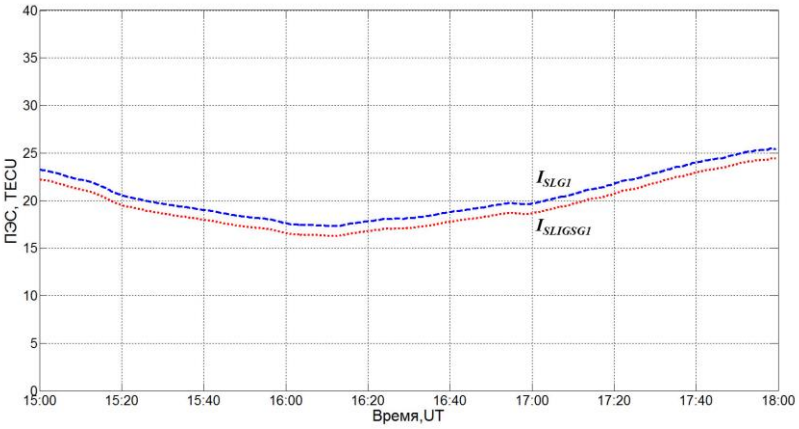


Рис. 2. Абсолютные значения наклонного ПЭС, полученные по данным приемной станции TRO1, по сигналам спутника G1 (21 октября 2013 г.)

1.3. Описание предлагаемого метода

Для исследования ионосферных процессов в высокоширотной области атмосферы наибольший интерес представляют спутники ГЛОНАСС из-за бóльшего наклонения орбиты, чем у спутников других ГНСС. Знание точных значений дифференциальных кодовых задержек для приемников и спутников ГЛОНАСС является необходимым условием получения абсолютных значений ПЭС.

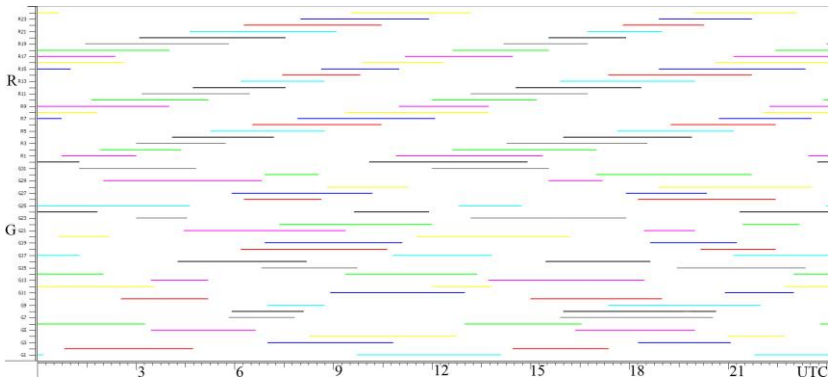


Рис. 3. Спутники ГНСС ГЛОНАСС и GPS и время их нахождения в зоне радиовидимости антенны приемника сигналов спутников ГНСС

Пространственно-временная конфигурация навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS обеспечивает нахождение в зоне радиовидимости антенны приемника сигналов спутников ГНСС в каждый момент времени не менее четырех спутников каждой из ГНСС. Общее число спутников обеих систем, находящихся в зоне радиовидимости, как правило, около пятнадцати.

На рис. 3 представлены спутники, находящиеся в зоне радиовидимости антенны приемника сигналов спутников ГНСС, расположенной на здании ПГИ КНЦ РАН в г. Мурманск (2 декабря 2014 г.). На оси ординат буквой R обозначены спутники ГЛОНАСС (верхняя часть рис. 3), буквой G – спутники GPS (нижняя часть рис. 3). На оси абсцисс – время в UTC. Линии показывают время и продолжительность нахождения спутника в зоне радиовидимости антенны приемника.

На рис. 4 указаны траектории пролетов спутников ГНСС ГЛОНАСС и GPS на небесной сфере за 2 декабря 2014 г. Положение спутника определяется в координатах азимут/угол места. Пункт наблюдения находится в центре (буква О, в нашем случае это здание ПГИ КНЦ РАН, г. Мурманск, 68° 56′ 53″ с.ш., 33° 03′ 48″ в.д.). Азимут отсчитывается от направления север (буква N вверху рисунка) по часовой стрелке (восток (E) равен 90°, юг (S) – 180°, запад (W) – 270°). Окружности на рисунке указывают величину угла места относительно пункта наблюдения О. Ближайшая окружность к пункту наблюдения означает угол места 80°, следующая – 60°, затем 40° и 20°. Сплошная линия – траектория спутников на небесной сфере. Номер спутника и его принадлежность к ГНСС обозначена на рис. 4 в начале его траектории: R – спутник ГЛОНАСС, G – спутник GPS, цифры – номер спутника. Цифры в кружочках – время пролета спутника. Стрелка указывает место пересечения (направление А) траекторий спутника ГЛОНАСС (R12) и спутника GPS (G23).

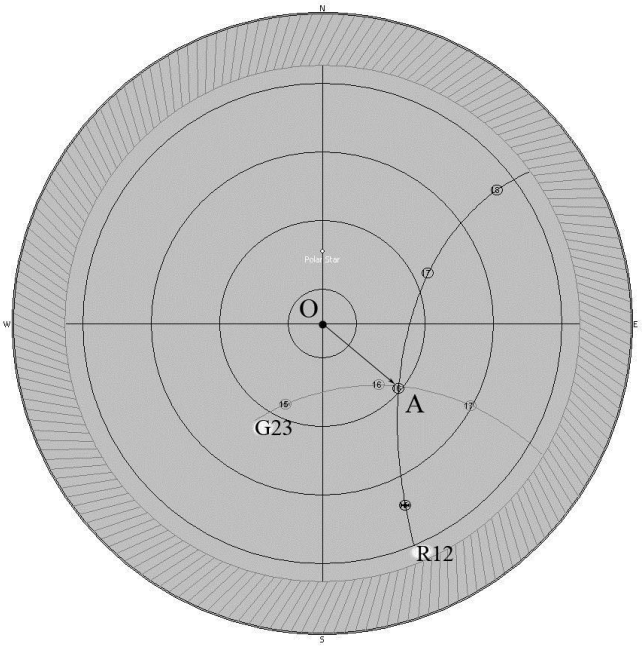


Рис. 4. Положение спутников ГНСС ГЛОНАСС и GPS на небесной сфере

Анализ пролетов спутников в зоне радиовидимости антенны показал, что для пролета спутника ГЛОНАСС всегда найдется несколько спутников GPS, которые пересекут его траекторию. Таким образом, всегда найдутся такие азимут и угол места пересечения, когда спутники будут видны из места наблюдения в одном направлении (направление А, рис. 4). В этом направлении А полное электронное содержание, полученное по данным спутника ГЛОНАСС и спутника GPS, должны быть близки по величине. Как правило, время пересечения общей точки А спутниками не совпадает. Поэтому анализируется временной период несовпадения и, если за этот период несовпадения ионосфера существенно не изменилась, предполагается, что ПЭС, полученное по данным спутников ГЛОНАСС и GPS, в общем направлении А одинаково.

Как уже отмечалось, орбиты спутников ГЛОНАСС и GPS имеют разные высоты – 19 100 и 20 200 км соответственно. Расчеты ПЭС по данным спутников GPS при равных условиях должны давать значения ПЭС бóльшие, чем спутники ГЛОНАСС, из-за большей длины интегрирования электронной концентрации вдоль линии зрения на спутник из одного и того же пункта наблюдения (высота спутника GPS больше на 1100 км, при наклонном положении длина интегрирования увеличивается). Оценки вклада в ПЭС этой дополнительной длины интегрирования по глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM [24] показали, что при различных условиях дополнительный вклад не превышает 1 % от ПЭС. Поэтому при дальнейших расчетах вкладом этой составляющей можно пренебречь.

При определении абсолютных значений ПЭС по фазовым измерениям ГЛОНАСС изначально рассчитываются дифференциальные кодовые задержки для спутника GPS и находятся абсолютные значения ПЭС по псевдодальностям по формуле (3). Затем по формуле (6) рассчитывается сдвиг ПЭС, полученного по фазовым измерениям GPS, и таким образом определяется абсолютное ПЭС по фазовым измерениям I_{SLG} по формуле (5). Отсюда можно определить поправку для расчета ПЭС по фазовым данным спутника ГЛОНАСС в направлении А:

$$I_{SLGA} - I_{SLcRA} = \Delta I_{SLA}, \quad (8)$$

где I_{SLGA} – абсолютное ПЭС по фазовым данным спутника GPS, рассчитанное для направления А, I_{SLcRA} – значения ПЭС по фазовым данным спутника ГЛОНАСС, с неучтенными поправками, в направлении А, ΔI_{SLA} – поправка ПЭС для расчета абсолютного ПЭС по фазовым данным ГЛОНАСС в направлении А.

Эта поправка ΔI_{SLA} одинакова для всех значений ПЭС по фазовым измерениям ГЛОНАСС. Тогда значения абсолютного ПЭС по фазовым измерениям ГЛОНАСС можно найти по формуле:

$$I_{SLR} = I_{SLcR} + \Delta I_{SLA} \quad (9)$$

2. Результаты и обсуждение

2.1. Эксперимент

В качестве примера использования предлагаемого метода приведем результаты расчетов полного электронного содержания по сигналам спутников ГЛОНАСС.

21 октября 2013 г. в обсерватории Европейской научной ассоциации по некогерентному рассеянию радиоволн (ЕИСКАТ) вблизи г. Тромсё (69.6° с.ш., 19.2° в.д.) сотрудниками ПГИ КНЦ РАН проводилась регистрация сигналов спутников ГНСС на двухчастотный приемник JAVAD Maxor-GGDT. Для обработки полученных данных были выбраны записи сигналов спутников ГЛОНАСС (R24) и GPS (G1) (рис. 5). На рис. 5 показаны координаты ионосферных точек для спутников R24 и G1 в географических координатах. Цифрами у линий обозначено время пролета в UT. Положение приемника сигналов спутников ГНСС обозначено буквой О. Место пересечения линий ионосферных точек спутников обозначено буквой А. В направлении этого пересечения линия зрения от приемника на спутник имеет одинаковый азимут и угол места для обоих спутников. Разница во времени прохождения общего направления равна 5 мин (спутник R24 – в 15:12 UT, а спутник G1 – в 15:17 UT). Геомагнитная обстановка в этот день была спокойной, ионосферные параметры, по данным дайнозонда ЕИСКАТ, оставались постоянными. Поэтому можно считать, что в направлении А полное электронное содержание, полученное по данным обоих спутников, было одно и то же.

Из полученных данных спутников R24 и G1 были рассчитаны исходные значения ПЭС без учета дифференциальных кодовых задержек по формулам (1) и (2). На рис. 6 они обозначены: для спутника R24 как I_{SLcR24} (фазовые измерения), для спутника G1 как I_{SLcG1} (фазовые измерения), I_{SPbG1} (кодовые измерения по псевдодальностям). Затем для спутника G1 по методу M_DCB были определены значения дифференциальных кодовых задержек для спутника b_{sG1} и для приемника b_{rG1}. По найденным DCBs по сигналам спутника G1 было получено абсолютное ПЭС для псевдодальностей (формулы (3 и 4), а по формулам (5 и 6) рассчитано абсолютное ПЭС по фазовым измерениям I_{SLG1}. На рис. 6 в центре штриховой линией показано скорректированные

(абсолютные) значения ПЭС I_{SLG1} для спутника G1. Чтобы не загружать рис. 6, на нем не нанесено новое положение ПЭС для псевдодальностей с учетом DCBs, оно совпадает с положением I_{SLG1} (см. также рис. 1). Затем находится разность ΔI_{SLA} между абсолютным значением ПЭС по фазовым измерениям I_{SLG1A} спутника G1 и значением ПЭС по фазовым данным спутника R24 $I_{SLcR24A}$ в направлении A (формула (8)). Учет этой поправки дает возможность получать абсолютные значения ПЭС по фазовым измерениям ГЛОНАСС I_{SLR24} (кривая в центре рис. 6).

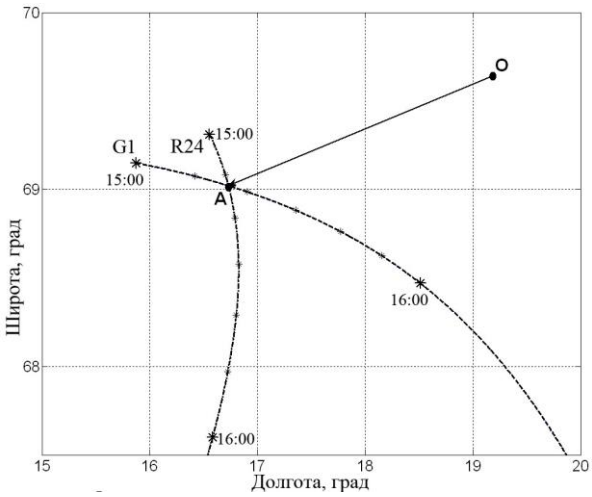


Рис. 5. Координаты ионосферных точек для спутников R24 и G1

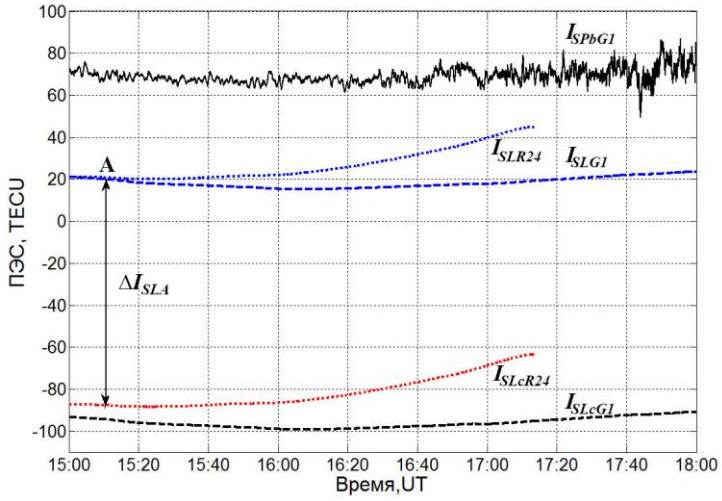


Рис. 6. Исходные и абсолютные значения наклонного ПЭС по сигналам спутников R24 и G1 для приемного пункта в обсерватории ЕИСКАТ (Тромсё)

Таким образом, предложенный метод позволяет оперативно получать оценки абсолютного полного электронного содержания по сигналам спутников ГЛОНАСС.

2.2. Сравнение экспериментальных данных с данными модели UAM и карты GIM

Для 21 октября 2013 г. были рассчитаны значения абсолютного вертикального ПЭС по сигналам спутника ГЛОНАСС R24 и спутника GPS G1, поскольку глобальные ионосферные карты GIM дают значения АВПЭС. Эти рассчитанные вертикальные ПЭС сравнивались

со значениями вертикального ПЭС, полученными из модели UAM, и с данными ионосферной карты GIM.

Модель UAM рассчитывает параметры ионосферы путем численного интегрирования нестационарных трехмерных уравнений с определенным временным шагом в пространственной сетке с переменным шагом по широте (от 1° – в авроральной области до 5° – на экваторе), по долготе – 10° и переменным шагом по высоте (от 3 км на нижней границе вблизи высоты 80 км и до 20 км в области максимума F2-слоя) в диапазоне высот от 80 км до 15 радиусов Земли. Для расчета ПЭС вдоль выбранного направления для конкретного момента времени рассчитывались значения электронной плотности N_e в узлах пространственной сетки модели. Затем определялись точки пересечения луча вдоль выбранного направления с высотами, на которых находились узлы пространственной сетки модели. Для найденных точек путем интерполяции получали значения N_e. После этого вдоль луча рассчитывалось наклонное ПЭС из модельных значений N_e. Затем наклонное ПЭС переводилось в вертикальное ПЭС. Данные абсолютного ВПЭС для карты GIM взяты из файла IONEX. Значение для точки пересечения А получали путем временной и пространственной интерполяции значений АВПЭС в узлах карты GIM.

На рис. 7 приведены значения вертикального ПЭС для выбранного дня. Линиями показаны значения абсолютных вертикальных ПЭС по сигналам спутника R24 (нижняя кривая) и спутника G1 (верхняя кривая). Буквой А обозначено время прохождения спутником общего направления А, квадратом – значение вертикального ПЭС по модели UAM для спутника R24, кружком – для спутника G1, звездочкой – значение АВПЭС, полученное из глобальной ионосферной карты GIM. Расчет проводился для времени, когда линия зрения на спутник была вдоль направления А (R24 – 15:12 UT, G1 – 15:17 UT).

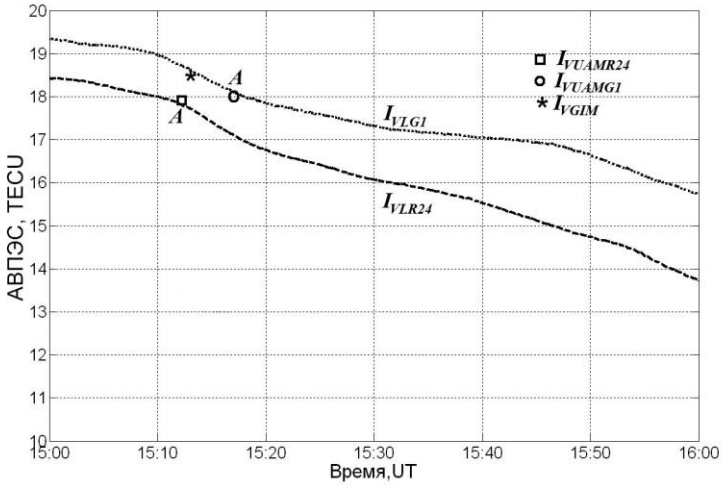


Рис. 7. Абсолютное вертикальное ПЭС, полученное по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS, по расчетами модели UAM и данным глобальной ионосферной карты GIM

Из рис. 7 видно, что абсолютное вертикальное ПЭС, полученное по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS, близко по величине к модельным значениям UAM и данным глобальной ионосферной карты GIM.

Заключение

Предложен метод оперативного расчета полного электронного содержания по сигналам спутников ГЛОНАСС. Полученные результаты показывают высокую эффективность применения данного метода.

Благодарности

Авторы выражают благодарность авторам метода M_DCB за предоставление пакета M_DCB, службе International GNSS Service за возможность использовать данные станции TRO1 (Тромсё, Норвегия) и Европейской научной ассоциации по некогерентному рассеянию радиоволн за возможность проведения наблюдений сигналов ГНСС в обсерватории ЕИСКАТ (Тромсё).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. *А.И. Перова*, *В.Н. Харисова*. 3-е изд., перераб. М.: Радиотехника, 2005. 688 с. **2.** GPS. Interface specification IS-GPS-200. URL: http://www.gps.gov/technical/icwg/ (дата обращения: 23.12.2014). **3.** *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ РАМН, 2006. 480 с. **4.** *Sardón E., Zarraoa N.* Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases? // Radio Sci. 1997. Vol. 32, № 5. P. 1899–1910. **5.** *Choi B.K., Cho J., Lee S.* Estimation and analysis of GPS receiver differential code biases using KGN in Korean Peninsula // Adv. Space Res. 2011. Vol. 47. P. 1590–1599. **6.** International GNSS service. URL: ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf (дата обращения: 23.12.2014). **7.** *Zhao B., Wan W., Liu L., Ren B.* Characteristics of the ionospheric total electron content of the equatorial ionization anomaly in the Asian-Australian region during 1996-2004 // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. P. 3861–3873. **8.** *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Т. 2. 280 с. **9.** *Sardon E., Ruis A., Zarraoa N.* Estimation of the transmitter and receiver biases and ionospheric total electron content from Global Positioning System observations // Radio Sci. 1994. Vol. 29, N 3. P. 577–586. **10.** *Jin R., Jin S., Feng G.* M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases // GPS Solut. 2012. Vol. 16, № 4. P. 541–548. **11.** *Zhang W., Zhang D.H., Xiao Z.* The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental biases // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. P. 1613–1623. **12.** *Coco D.C., Coker C., Dahlke S.R., Clynch J.R.* Variability of GPS satellite differential group delay biases // IEEE T. Aero. Elec. Sys. 1991. Vol. 27. P. 931–938. **13.** *Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А.* Использование карт полного электронного содержания для анализа пространственно-временной структуры ионосферы // Журн. физической химии. 2013. Т. 32, № 11. С. 82–87. **14.** *Ma G., Maruyama T.* Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. P. 2083–2093. **15.** *Ma X., Maruyama T., Ma G., Takeda T.* Determination of GPS receiver differential biases by neural network parameter estimation method // Radio Sci. 2005. Vol. 40, № 1: RS1002. doi:10.1029/2004 RS003072. **16.** *Lanyi G.E., Roth T.* A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellite observations // Radio Sci. 1988. Vol. 23. P. 483-492. **17.** *Ho C.M., Wilson B.D., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Yuan D.N.* A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOREX radar, and Bent model // Radio Sci. 1997. Vol. 32. P. 1499–1521. **18.** *Jakowski N., Sardon E., Engler E., Jungstand A., Klähn D.* Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations // Ann. Geophys. 1996. Vol. 14. P. 1429–1436. **19.** Global Ionosphere Maps Produced by CODE. URL: http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/, ftp://cddis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/ (дата обращения 23.12.2014 г.). **20.** *Schaer S., Gurtner W., Feltens J.* IONEX: The Ionosphere Map EXchange Format Version 1 // Proc. the 1998 IGS Analysis Centres Workshop, ESOC. 1998. P. 233–247. **21.** A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements / *A.J. Mannucci et al.* // Radio Sci. 1998. Vol. 33. P. 565–582. **22.** M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases – by Rui Jin, Shuanggen Jin, and Guiping Feng. URL: http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/m_dcb.htm (дата обращения: 23.12.2014). **23.** IGS Station: tro1. URL: http://igscb.jpl.nasa.gov/network/site/tro1.html (дата обращения: 23.12.2014). **24.** *Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.* Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step // Geomag. and Aeronomy Intern. 1998. Vol. 1, № 1. P. 53–58.

Сведения об авторах

Терещенко Евгений Дмитриевич – д.ф.-м.н., директор Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: general@pgi.ru

Миличенко Александр Николаевич – зам. директора по общим вопросам Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: alexander@pgi.ru

Швец Михаил Васильевич – старший инженер Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: shvec@pgi.ru

Черняков Сергей Михайлович – научный сотрудник Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: sergeich@pgi.ru

Кораблева Ирина – младший научный сотрудник Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: irinakorab@pgi.ru

УДК 53.082.74

ГЛУБИННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОЩНОГО НИЗКООМНОГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ*

В.А. Любчич, В.Ф. Григорьев, Р.Ю. Юрик
Полярный геофизический институт КНЦ РАН

Аннотация

Показано, что применение мощного генератора для электромагнитных зондирований с использованием промышленных линий электропередач в качестве антенны обеспечивает значительную глубинность исследований даже в неблагоприятных геоэлектрических условиях низкоомного, мощного осадочного чехла. В статье кратко приведены технические характеристики применявшейся аппаратуры для измерения и генерации гармонического электромагнитного поля. На примере зондирования в северной части Западно-Сибирской платформы показана целесообразность комплексной интерпретации данных электромагнитного зондирования с использованием ЛЭП и магнитотеллурического зондирования.

Ключевые слова:

генератор электромагнитного поля, линия электропередач, электромагнитное зондирование, осадочный чехол.

Введение

Для определения и изучения геологического строения земной коры на большую глубину в неблагоприятных геоэлектрических условиях низкоомного, мощного осадочного чехла Западно-Сибирской геологической платформы необходимо проводить электромагнитные зондирования с применением мощного генератора электромагнитного поля экстремально низкочастотного (ЭНЧ) диапазона. При этом в качестве антенны удобно использовать промышленные линии электропередач (ЛЭП). Качественные условия заземления ЛЭП позволяют получать мощные зондирующие сигналы в выбранном частотном диапазоне, при этом сила тока в антенне (ЛЭП) может достигать сотни ампер.

Эксперименты по электромагнитному зондированию Земли с использованием ЛЭП описаны в работах [1, 2]. Эти исследования проводились как в условиях кристаллического фундамента Балтийского щита на Кольском п-ове и Карелии с незначительным осадочным покровом [1], так и в условиях мощного осадочного чехла Западной Сибири [2]. В работе [2] приводятся результаты электромагнитного зондирования с применением портативного генератора «Энергия-3» мощностью 2 кВт, что позволяло уверенно измерять сигналы в пунктах наблюдения в частотном диапазоне от 3.8 до 175 Гц.

В данной статье рассмотрен вопрос о возможности определения геологического строения низкоомного, мощного осадочного чехла северной части Западно-Сибирской платформы по результатам глубинного электромагнитного зондирования с применением генератора

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-05-12005 ОФИ_М).

мощностью порядка 200 кВт. Это дает возможность надежно регистрировать более низкочастотные сигналы с 0.01 Гц, что существенно увеличивает глубинность электромагнитных исследований с контролируемым источником.

Генерация искусственных сигналов с сеткой частот в диапазоне от 0.01 до 1 Гц требует значительных временных затрат. Поэтому в данном диапазоне целесообразно привлекать результаты магнитотеллурического зондирования (МТЗ) для корректной интерпретации экспериментальных данных.

Представлены экспериментальные работы по электромагнитному и магнитотеллурическому зондированиям, проведенные сотрудниками Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН (ПГИ КНЦ РАН) летом 2012 г. в районе г. Новый Уренгой Ямало-Ненецкого автономного округа.

Аппаратура и описание эксперимента

В июне 2012 г. сотрудниками ПГИ КНЦ РАН проведен эксперимент по глубинному электромагнитному зондированию осадочного чехла в одном из районов Ямало-Ненецкого автономного округа.

Мобильный генератор электромагнитного поля подключался к промышленной линии электропередачи Пангоды – Новый Уренгой на подстанции в городе Новый Уренгой.

Формирование радиочастотного сигнала, подлежащего излучению в диапазоне от 0.01 до 40 Гц, производилось мобильным генератором мощностью порядка 200 кВт, разработанным в институте на базе повышающего преобразователя и системы энергопередачи генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований [3]. Преобразование электромагнитных колебаний в распространяющуюся в пространстве электромагнитную волну осуществлялось антенной в виде ЛЭП длиной 110 км, представляющей собою горизонтальный заземленный диполь, имеющий субширотную ориентацию. Необходимая величина тока в антенне на частотах выше единиц герц обеспечивалась согласующим устройством [4]. На рис. 1 приведена структурная схема источника электромагнитного излучения.

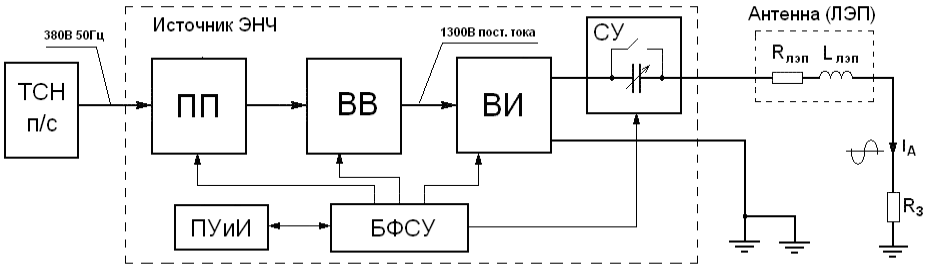


Рис. 1. Блок-схема генератора электромагнитного поля ЭНЧ-диапазона. Условные обозначения: ТСН п/с – трансформатор собственных нужд подстанции; ПП – повышающий преобразователь; ВВ – высоковольтный выпрямитель; ВИ – высоковольтный инвертор; СУ – согласующее устройство; БФСУ – блок формирования сигналов управления; ПУиИ – пульт управления и индикации

Передающее устройство устанавливается на территории электрической подстанции ЛЭП и питается от трансформатора собственных нужд подстанции (ТСН п/с). Сетевое напряжение промышленной трехфазной сети напряжением 380 В и частотой 50 Гц подается на повышающий преобразователь (ПП). Схема ПП реализована на основе повышающего трехфазного силового трансформатора, что обеспечивает гальваническую развязку от промышленной сети. На выходе ПП напряжение достигает 920 В. Далее это переменное напряжение поступает на высоковольтный выпрямитель (ВВ), на выходе которого формируется постоянное напряжение

величиной 1300 В. Оно поступает на высоковольтный инвертор (ВИ), который методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) создает в антенне (ЛЭП) синусоидальный ток необходимой амплитуды и частоты. Принцип формирования синусоидального тока иллюстрирует рис. 2. Максимальная амплитуда выходного сигнала ВИ составляет 1300 В. Высоковольтный инвертор – основной блок источника электромагнитного излучения, поскольку именно он определяет форму, амплитуду и частоту тока в антенне и, соответственно, выходные энергетические параметры в целом. На частотах выше 10 Гц для компенсации индуктивной составляющей полного сопротивления ЛЭП на выход генератора подключается согласующее устройство (СУ). Величина емкости СУ при переходе на другую частоту генерации должна изменяться так, чтобы всегда сохранялся резонанс напряжений в индуктивной нагрузке. При работе на частотах, когда подключается СУ, высоковольтный инвертор формирует на выходе меандр, а синусоидальность тока в антенне обеспечивается резонансом напряжений.

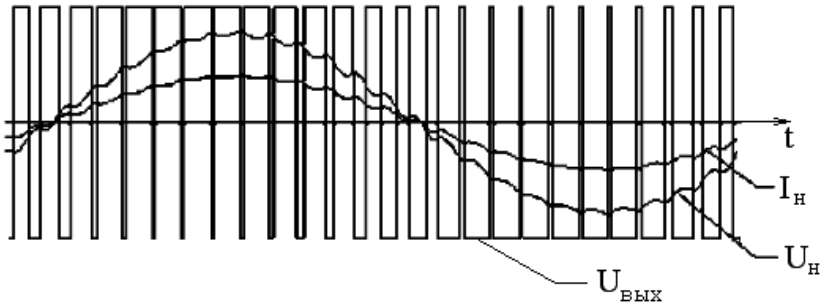


Рис. 2. Формы выходных сигналов высоковольтного инвертора при работе на активную нагрузку: I_H – ток в нагрузке, U_H – напряжение на нагрузке, $U_{вых}$ – напряжение на выходе высоковольтного инвертора

Блок формирования сигналов управления (БФСУ) обеспечивает создание необходимых управляющих сигналов для всех блоков источника, анализ информации, поступающей с различных датчиков и цепей контроля, а также управление различными устройствами автоматики и защиты. Выносной пульт управления и индикации (ПУиИ) предназначен для управления режимами работы источника, задания выходных параметров сигнала и визуального контроля этих параметров оператором.

Электромагнитное зондирование проводилось на частотах: 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 3, 9.5, 12, 20, 33 и 42 Гц. При этом действующий ток в антенне (ЛЭП) был порядка 100–150 А.

Регистрация и сбор данных электромагнитного поля производились трехкомпонентным индукционным магнитометром, разработанным в ПГИ КНЦ РАН. Измерения выполнялись вдоль автодороги Новый Уренгой – Ямбург.

Для достижения максимальной точности измерений магнитного поля до и после проведения эксперимента датчики магнитометра калибровались в одинаковых внешних условиях. Эти датчики для обеспечения ортогональности и точности установки их относительно горизонта, а также для устранения взаимного воздействия магнитного поля размещались в специальных обоймах (рис. 3). Обойма с датчиками помещалась в выкопанную яму, накрывалась коробом и засыпалась землей.

При измерении электрических компонент поля раскладывались две взаимно ортогональные заземленные приемные линии длиной по 100 м. За ось *X* принято направление на север вдоль магнитного меридиана.

В пунктах наблюдения определялось магнитное склонение, необходимое для представления результатов измерений компонент электромагнитного поля в универсальных географических координатах.

Ток в антенне, аналоговые сигналы с магнитных датчиков и приемных электрических линий обрабатывались цифровой системой регистрации и сбора информации, основанной на 6-канальном 22-битном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) с частотой дискретизации 512 Гц [5]. Система регистрации и сбора информации производит привязку измеренных сигналов к мировому времени UT по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS с погрешностью не более 1 мкс. Оцифрованные данные сохраняются в памяти прибора.

Рис. 3. Размещение магнитных датчиков в обойме

Для анализа зарегистрированных временных рядов геофизических данных используется метод Уэлча, основанный на дискретных преобразованиях Фурье измеренных сигналов. В результате обработки временных рядов по методу Уэлча получаются оценки спектральной плотности мощности сигнала с учетом влияния шума, по которым после калибровочных преобразований вычисляются значения амплитуд сигналов.

Широкая полоса пропускания (от 0.01 до 200 Гц) индукционных датчиков магнитометра позволяет использовать приемную аппаратуру не только для регистрации активных сигналов при проведении электромагнитных зондирований с контролируемым источником, но и для измерения уровней естественных шумов при выполнении магнитотеллурических зондирований (МТЗ).

Геоэлектрический разрез в данном районе имеет характерную трехслойную структуру. Верхняя часть разреза представлена вечномерзлыми породами с высоким удельным сопротивлением порядка 100 Ом·м. Мощность мерзлого слоя может меняться от 30–40 до 150–200 м [6]. Средняя часть разреза состоит из низкоомных осадочных пород мощностью свыше 6 тыс. м с удельным сопротивлением от 2 до 20 Ом·м. В нижней части разреза находятся вулканогенные метаморфические породы складчатого фундамента, представленные измененными базальтами, с высоким удельным сопротивлением порядка 100 Ом·м.

Строение осадочного чехла не однородно [7], в его пределах отмечаются мощные зоны с пониженным сопротивлением. Так, по данным электрического каротажа Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6 (рис. 4), в интервале глубин от 400 до 1400 м сопротивление пород понижается до 2–5 Ом·м, в геологическом разрезе эта зона соответствует слабопроницаемым глинам палеогеново-верхнемелового возраста. Далее, в интервале глубин от

1400 до 2700 м, отмечается область с повышенным сопротивлением порядка 20 Ом·м, которая относится к зоне поровых коллекторов нижнемелового периода, перспективных на обнаружение углеводородного сырья. Еще ниже, в интервале глубин от 2700 до 4300 м, сопротивление пород вновь понижается до 10 Ом·м, что соответствует осадочным породам верхнеюрского периода с более низкой пористостью. Таким образом, можно отметить корреляцию электрического сопротивления пород с их коллекторскими свойствами, вследствие чего становится возможным выявление методами глубинной электроразведки слоев, перспективных на обнаружение углеводородного сырья.

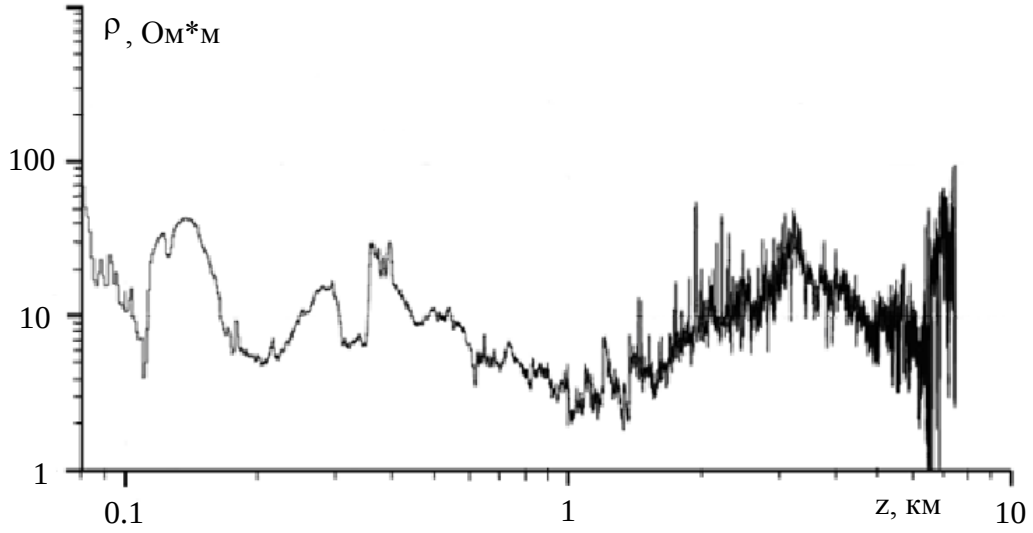


Рис. 4. Данные электрического каротажа сопротивления с применением установки «потенциал – зонд» (ПЗ) Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6

Результаты и их обсуждение

Согласно данным бурения и результатам сейсмического профилирования методом отраженных волн с общей глубинной точкой (МОВ ОГТ) [8], отличительной особенностью строения осадочной толщи северной части Западно-Сибирской платформы является латеральная выдержанность составляющих чехол пород. Поэтому для интерпретации данных электромагнитного зондирования удобно использовать горизонтально-слоистую модель Земли. В таблице представлены параметры такой модели, выбранные по данным электрического каротажа Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6.

Для сравнения представлены экспериментальные кривые зависимости амплитуд компонент электромагнитного поля от частоты генерируемого излучения, измеренные в одном из пунктов наблюдения (рис. 5), и теоретические кривые для этой точки, рассчитанные для горизонтально-слоистой модели среды, параметры которой показаны в таблице. Пункт наблюдений располагался в 21 км к северу от одного из питающих электродов линии, заземленного на подстанции г. Новый Уренгой.

Из графиков видно, что для горизонтальных компонент электромагнитного поля модельные значения в целом соответствуют измеренным величинам. Большее соответствие наблюдается для электрических компонент поля только на относительно высоких частотах, начиная с 20 Гц модельные значения несколько превышают измеренные величины. Для согласования этих значений потребовалась некоторая корректировка исходной модели. Так, была уменьшена мощность мерзлого слоя до 40 м и понижено удельное сопротивление верхней части осадочного чехла до 10 Ом·м в интервале глубин 40–400 м. Графики частотной

зависимости компонент электромагнитного поля для скорректированной модели среды также представлены на рис. 5.

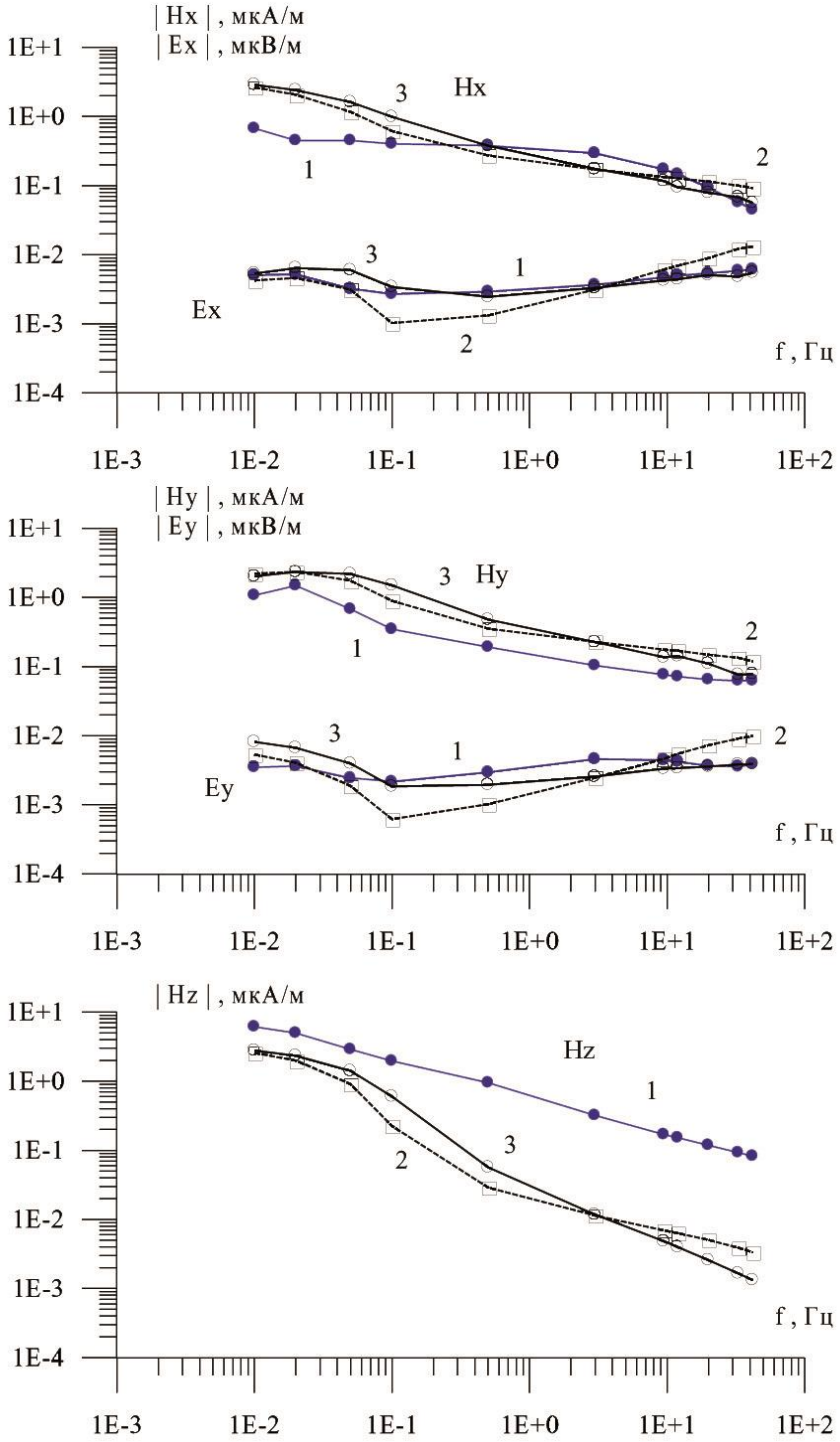


Рис. 5. Кривые частотной зависимости амплитуд компонентов электромагнитного поля: 1 – экспериментально измеренные значения, 2 – теоретически рассчитанные значения для горизонтально-слоистой модели среды, представленной в таблице, 3 – значения для скорректированной модели

Другая особенность представленных графиков состоит в значительном превышении измеренных значений вертикальной компоненты магнитного поля H_z над модельными величинами в широком диапазоне частот выше 0.1 Гц. Этот факт можно объяснить влиянием линейных техногенных проводников на поверхности Земли, а именно ветки трубопровода, проходящей вблизи точки наблюдения. Наведенные токи в таких проводниках могут существенно завышать амплитуду вертикальной компоненты магнитного поля.

Параметры горизонтально-слоистой модели осадочного чехла
северной части Западно-Сибирской платформы

№	Описание слоя	Интервал глубин, м	Удельное сопротивление, Ом·м
1	Вечномерзлые породы	0–100	100
2	Осадочные породы палеогена	100–400	20
3	Осадочные породы палеогена и верхнего мела, соответствующие слабопроницаемым глинам	400–1400	5
4	Осадочные породы нижнего мела, относящиеся к зоне поровых коллекторов	1400–2700	20
5	Осадочные породы верхнеюрского периода с более низкой пористостью	2700–4300	10
6	Осадочные породы нижнеюрского и верхнетриасового периодов	4300–6500	20
7	Складчатый фундамент	> 6500	100

Для оценки геоэлектрического разреза в районе расположения выбранной точки наблюдения были построены кривые кажущегося сопротивления $\rho_к$ (рис. 6). Измерения в указанной точке производились в течение нескольких дней. Значения кажущегося сопротивления для электромагнитных зондирований с контролируемым источником рассчитывались по кривым нормального поля. Для заданной геометрии эксперимента – взаимном расположении питающей длинной линии и точки наблюдения электромагнитного поля – были построены графики зависимости отношения полных горизонтальных компонент электрического поля к магнитному E_r/H_r от сопротивления нижнего однородного полупространства для каждой частоты генерации поля. Используя экспериментально измеренные амплитуды компонент электромагнитного поля, по этим графикам и оценивались значения кажущегося сопротивления среды $\rho_к$.

Из рис. 6 видно, что кривые 1 и 2 кажущегося сопротивления для глубинных электромагнитных зондирований с контролируемым источником, проведенных в разные дни, хорошо согласуются между собой и имеют характерную параболическую форму. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на результаты измерений оказывают влияние высокоомный фундамент на низких частотах, проводящий осадочный чехол на относительно средних частотах и плохо проводящий мерзлый слой на относительно высоких частотах. Однако этим кривым не хватает детальности для дифференциации слабоконтрастного осадочного чехла из-за ограниченности набора частот генерации поля.

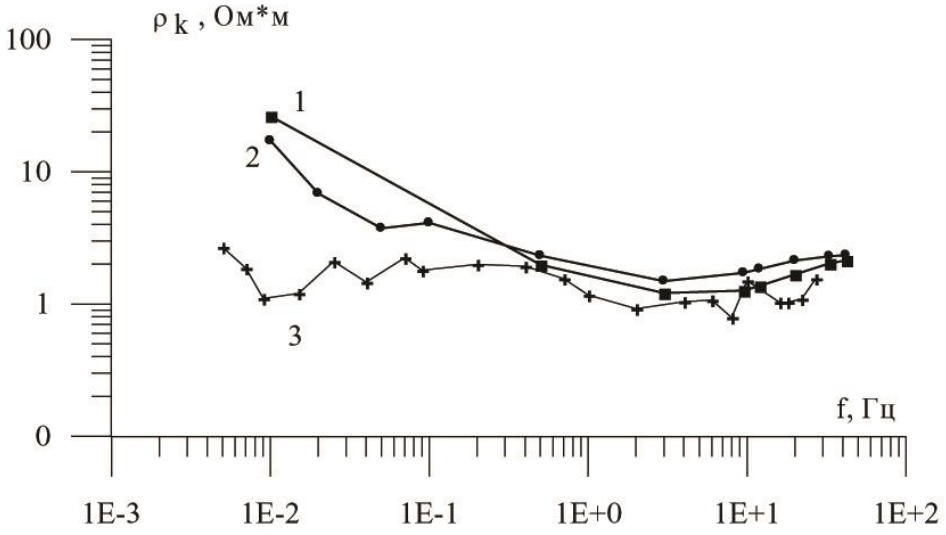


Рис. 6. Кривые кажущегося сопротивления $\rho_к$, рассчитанные по результатам измерений компонент электромагнитного поля в пункте наблюдения:
1 – график значений $\rho_к$, вычисленных по кривым нормального поля для данных ЭМЗ с контролируемым источником 9 июня 2012 г., 2 – график $\rho_к$ для данных ЭМЗ с контролируемым источником 13 июня 2012 г., 3 – кривая МТЗ $\rho_{к(xy)}$, полученная по записи компонент электромагнитного поля 9 июня 2012 г.

Дополнительную информацию о геоэлектрическом разрезе могут дать кривые кажущегося сопротивления, полученные методом магнитотеллурического зондирования Земли. Значения кажущегося сопротивления $\rho_к$ связаны с модулем нормального импеданса Z формулой [9]

$$\rho_{\hat{e}} = \frac{|Z|^2}{\omega\mu_0}, \qquad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ω – круговая частота электромагнитного поля.

Для однородной горизонтально-слоистой модели среды нормальный импеданс является скалярной величиной и представляет собой отношение горизонтальных взаимно перпендикулярных компонент электрического и магнитного полей, измеренных на земной поверхности:

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}.$$

Такая характеристика среды удобна, так как однозначно определяется параметрами модели – удельным сопротивлением и мощностью слоев – в виде рекуррентной формулы Липской:

$$Z = \frac{i\omega\mu_1}{k_1} th\cdot(k_1h_1 + arth\cdot(\frac{k_1\mu_2}{k_2\mu_1} th\cdot(k_2h_2 + arth\cdot(\frac{k_2\mu_3}{k_3\mu_2} th\cdot(k_3h_3 + ... + arth\frac{k_{N-1}\mu_N}{k_N\mu_{N-1}})...),$$

где k_i – волновое число.

$$k_i = \sqrt{\frac{-i\omega\mu_i}{\rho_i}},$$

где ρ_i – удельное сопротивление, μ_i – магнитная проницаемость, h_i – мощность слоя, i – мнимая единица.

Из-за неоднородностей земной коры импеданс представляет собой тензор, в котором основную информацию о геоэлектрических свойствах пород несут антидиагональные члены $Z_{xy} = E_x/H_y$ и $Z_{yx} = -E_y/H_x$. В двумерном случае эти члены отвечают двум поляризациям естественного электромагнитного поля, которые по-разному реагируют на неоднородности в земной коре.

Амплитуды импедансов Z_{xy} и Z_{yx} определялись в частотном диапазоне 0.005–27 Гц как корень из отношения средних значений спектральной плотности мощности шума взаимно ортогональных компонент электрического и магнитного полей. Здесь использовалась та же информация, записанная в памяти измерителя во время проведения электромагнитных зондирований с контролируемым источником, только частоты для оценки спектральной плотности мощности естественного шума выбирались не совпадающими с частотами генерации электромагнитного поля.

Значения кажущегося сопротивления рассчитывались через амплитуды импедансов Z_{xy} и Z_{yx} для двух поляризаций естественного поля согласно формуле (1). Используя графики кажущегося сопротивления $\rho_к$, полученные по результатам электромагнитного зондирования с контролируемым источником, в качестве реперных значений, была выбрана наиболее подходящая для интерпретации кривая кажущегося сопротивления по данным МТЗ $\rho_{к(xy)}$, (рис. 6, номер 3). Из рис. 6 видно, что средний уровень значений кажущегося сопротивления $\rho_{к(xy)}$ отражает низкоомную природу осадочных пород. Кроме того, в диапазоне частот 0.1–1 Гц наблюдается пологий максимум, свидетельствующий о неоднородном строении осадочного чехла. Расхождение кривых, полученных разными методами, в диапазоне частот ниже 0.1 Гц можно объяснить высоким уровнем случайных промышленных помех, связанных с деятельностью трубопровода в районе измерений электромагнитного поля. Несмотря на это расхождение, локальные особенности кривой $\rho_{к(xy)}$ несут важную качественную информацию о геологическом строении осадочного чехла.

С целью исследования геоэлектрического разреза в данной точке наблюдений преобразуем кривую зависимости кажущегося сопротивления по данным МТЗ ρ_k от периода T электромагнитного поля в график зависимости действующего сопротивления ρ' от действующей глубины z' с помощью дифференциальной трансформации Молочнова-Ле Вьета [10]:

$$z' = \sqrt{\frac{\rho_k}{(\omega\mu_0}};$$

$\rho'(z') = \rho_к \cdot (1 + m/2)^2$ для нисходящей ветви кривой $\rho_к$;

$\rho'(z') = \rho_к \cdot (1 - m/2)^2$ для восходящей ветви кривой $\rho_к$,

где параметр m определяет тангенс угла наклона кривой кажущегося сопротивления в двойном логарифмическом масштабе:

$$m = \frac{d(\log(\rho_{\hat{e}}))}{d(\log(\sqrt{T}))}.$$

Полученный геоэлектрический псевдоразрез представлен на рис. 7, из которого видно, что график зависимости действующего сопротивления от глубины хорошо согласуется с результатами каротажа по сверхглубокой скважине СГ-6, показанными на рис. 4. Так, на глубинах порядка 100 м действующее сопротивление достигает 300 Ом·м, это может объясняться влиянием высокоомного мерзлого слоя. Далее, до глубин порядка 7000 м, значения действующего сопротивления колеблются в диапазоне единиц – десятков (Ом·м), отражая высокую электропроводность осадочного чехла. При этом наблюдаются отдельные максимумы графика $\rho'(z')$ на глубинах порядка 450, 1800, 2600 м, что свидетельствует о неоднородном строении осадочного чехла. Максимумы на глубинах 1800 и 2600 м отвечают зоне поровых коллекторов нижнемелового периода с относительно повышенным удельным сопротивлением.

Максимум на глубине 450 м наблюдается также и на каротажной кривой. Наконец, на глубине порядка 7000 м происходит рост действующего сопротивления до 300 Ом·м, определяющийся влиянием высокоомного складчатого фундамента.

Полученные результаты показывают целесообразность комплексной обработки данных глубинного электромагнитного зондирования с применением мощного контролируемого источника излучения и магнитотеллурического зондирования для построения геоэлектрического разреза исследуемой области.

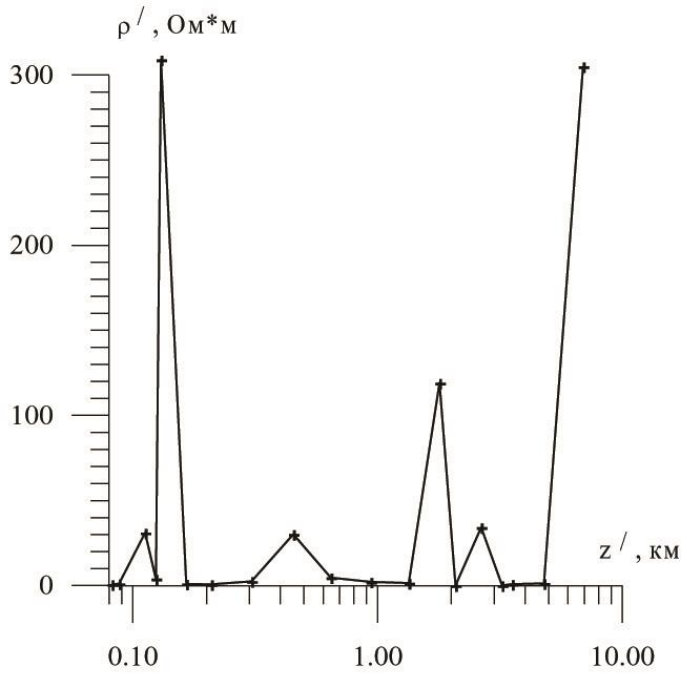


Рис. 7. График зависимости действующего сопротивления ρ′ от действующей глубины z′, полученный с помощью дифференциальной трансформации Молочнова-Ле Вьета кривой кажущегося сопротивления МТЗ

Выводы

Проведенные экспериментальные работы показали принципиальную возможность определения геологического строения земной коры на большую глубину в неблагоприятных геоэлектрических условиях низкоомного, мощного осадочного чехла Западно-Сибирской геологической платформы по результатам электромагнитного зондирования с мощным контролируемым источником излучения ЭНЧ-диапазона.

Установлено, что при зондированиях на очень низких частотах (порядка 0.01–0.1 Гц) на результаты измерений компонент электромагнитного поля начинал оказывать влияние складчатый фундамент. Возможность откартирования складчатого фундамента при проведении площадных съемок позволяет выявить крупные геологические структуры – грабены и горсты, контролирующие расположение крупных месторождений углеводородов. На частотах от 0.1 до 20 Гц измеренные компоненты поля несли информацию о геоэлектрических свойствах низкоомного осадочного чехла. Результаты интерпретации полученных данных в этом частотном диапазоне позволяют судить о геоэлектрическом строении осадочного чехла, выявлять зоны с относительно повышенным сопротивлением, перспективные на обнаружение месторождений углеводородов.

Ограниченность частот искусственно генерируемого излучения затрудняла дифференциацию слабоконтрастного осадочного чехла. Показано, что для построения

геоэлектрического разреза изучаемого участка работ целесообразно проводить совместную интерпретацию данных электромагнитного зондирования с контролируемым источником и данных магнитотеллурического зондирования, которые могут существенно дополнить информацию о геоэлектрическом разрезе земной коры. В свою очередь, данные ЭМЗ могут послужить надежным репером для выбора наименее искаженных кривых МТЗ.

При электромагнитных зондированиях на относительно высоких частотах (выше 20 Гц) измеренные компоненты электромагнитного поля определялись мощностью вечномерзлого слоя с высоким удельным сопротивлением. Интерпретация полученных данных в этом частотном диапазоне позволяет решать инженерно-геологические задачи, важные при строительстве объектов инфраструктуры: железных дорог, трубопроводов и т.п., и проектировании буровых скважин.

Авторы благодарны В.В. Колобову, В.Н. Селиванову, П.И. Прокопчуку за обеспечение генерации электромагнитного поля и Ю.В. Федоренко, С.В. Пильгаеву, П.Е. Терещенко, И.И. Демченко, М.В. Швецу за обеспечение регистрации сигналов при проведении экспериментальных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глубинные зондирования с промышленными ЛЭП в комплексе с МТЗ / *А.А. Жамалетдинов и др.* // Известия РАН. Физика Земли. 2007. № 3. С. 74–80. **2.** Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников / *А.А. Жамалетдинов и др.* // Известия РАН. Физика Земли. 2013. № 6. С. 99–115. **3.** Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / *Е.Д. Терещенко и др.* // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 4. С. 43–66. **4.** Разработка согласующего устройства стационарного источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона / *Е.Д. Терещенко и др.* // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Т. 4, № 1. С. 68–78. **5.** *Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В.* Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 73–75. **6.** *Шаманова И.И.* Прибрежная криолитозона центральной части Обской губы // Инженерная геология. 2008. № 3. С. 8–14. **7.** *Есипко О.А., Горбачев В.И., Соколова Т.Н.* Физические свойства пород Тюменской сверхглубокой скважины по данным геофизических исследований // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 6. С. 905–919. **8.** Объяснительная записка к Тектонической карте морей Карского и Лаптевых и севера Сибири М 1:2500000 / *Н.А. Богданов и др.* // Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с. **10.** Контролируемая трансформация кривых МТЗ / *Е.В. Андреева и др.* // Известия РАН. Физика Земли. 1991. № 10. С. 89–95.

Сведения об авторах

Любчич Владимир Алексеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН; e-mail: lubchich@yandex.ru

Григорьев Валерий Федосеевич – помощник директора Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН; e-mail: valgri@pgi.ru

Юрик Роман Юрьевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН; e-mail: roman.yurik@pgi.ru

УДК 551.467.3(268.45)

ДИНАМИКА МЕЖГОДОВЫХ И СЕЗОННЫХ АНОМАЛИЙ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

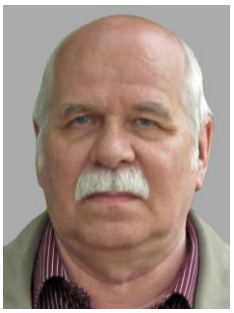
А.П. Жичкин
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Представлены результаты исследования межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря за 1934–2014 гг. и Карского моря за 1979–2014 гг. На основе электронной базы многолетних данных по ледовому режиму морей выделены однородные периоды с преобладающим знаком аномалии. Выполнен анализ временно́го распределения и повторяемости крупных и очень крупных аномалий ледовитости Баренцева моря за последние полвека и Карского моря с 1979 по 2012 гг.

Ключевые слова:

Баренцево море, Карское море, аномалии ледовитости, межгодовые и сезонные колебания.



Введение

Группа арктических морей России объединяет близкие по природе окраинные моря Северного Ледовитого океана, в том числе Баренцево и Карское. Оба моря лежат за полярным кругом, на юге ограничены естественным рубежом – побережьем Евразии, а на севере свободно сообщаются с океаном. При этом Баренцево и Карское моря значительно отличаются между собой по ледовому режиму.

Баренцево море занимает особое место среди морей Северного Ледовитого океана благодаря своим уникальным природным характеристикам. Из-за проникновения в Баренцево море теплых атлантических вод оно является единственным районом Арктики, который не замерзает круглый год. Баренцево море – один из богатейших промысловых районов Мирового океана. Причем биологическая продуктивность и распределение водных биоресурсов Баренцева моря в значительной степени зависят от изменчивости всех компонент климатической системы атмосфера – гидросфера – криосфера [1].

Ледовитость как интегральный климатический фактор существенно влияет на все основные звенья морских экосистем – от планктона (первичная продукция) до высших консументов (тюлени и белые медведи) [2]. Вместе с тем, ледовые условия порой ограничивают акваторию для ведения промышленного лова рыбы. В годы с высокой ледовитостью промысел ограничен районами южной и юго-западной частей Баренцева моря, в годы с отрицательными аномалиями ледовитости акватория лова значительно расширяется в северном и восточном направлениях [3–5].

Характерная черта ледового режима Баренцева моря – большая межгодовая и сезонная изменчивость его ледовитости [6, 7]. Поэтому несомненный интерес представляют особенности формирования и развития аномальности ледовых процессов различного временного масштаба.

В отличие от Баренцева, Карское море большую часть года покрыто сплошным ледяным покровом. При этом наблюдаются значительные различия ледовых условий юго-западной и северо-восточной частей моря. В юго-западной части лед держится в течение 8–9 месяцев – с ноября по июль. Северо-восточная часть моря в летний период не полностью очищается ото льда. К концу периода таяния (в сентябре) в среднем около половины района остается занятой остаточными льдами.

Материалы и методы

Расчет ежемесячных и среднегодовых аномалий ледовитости Баренцева моря выполнен на основе электронной базы многолетних данных по ледовому режиму этих морей, сформированной в лаборатории океанографии и радиоэкологии Мурманского морского биологического института (ММБИ). База содержит временные ряды ежемесячных значений общей ледовитости за 1934–2014 гг. для Баренцева моря и за 1979–2014 гг. для Карского моря.

Для характеристики ежемесячной аномальности ледовых условий применялась методика количественной классификации [1, 8, 9]. В качестве объективного критерия использовалась величина стандартного отклонения ледовитости от нормы σ. Среднемесячные и годовые аномалии ледовитости сравнивались с определенными величинами стандартного отклонения ледовитости от нормы, уровень аномалий оценивался по пяти градациям (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика аномалий ледовитости Баренцева моря

Тип аномалии	Условные обозначения	Градации аномалий (доля σ)
Положительная		
Очень крупная	+ ОКР	$\Delta S > 1.2\sigma$
Крупная	+ КР	$0.4\sigma < \Delta S \leq 1.2\sigma$
Около нормы (малая положительная и отрицательная)	Н	$\pm \Delta S \leq 0.4\sigma$
Отрицательная		
Крупная	– КР	$0.4\sigma < -\Delta S \leq 1.2\sigma$
Очень крупная	– ОКР	$-\Delta S > 1.2\sigma$

В результате обработки массива полученных результатов созданы календари ежемесячных ледовых аномалий Баренцева моря за период с 1960 по 2014 гг. и Карского моря за период с 1979 по 2012 гг. Затем с помощью этих календарей выполнен анализ временнóго распределения и повторяемости крупных и очень крупных аномалий ледовитости за рассматриваемые периоды.

Результаты и обсуждение

Межгодовые колебания ледовых аномалий Баренцева моря

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о значительных флуктуациях ледовых аномалий Баренцева моря за последние 80 лет. Проведенный анализ позволил выделить в пределах рассматриваемого отрезка времени ряд периодов похолоданий и потеплений различной продолжительности (рис. 1)

Наиболее ярко выраженными промежутками экстремального развития гидрометеорологических процессов в Баренцевом море стали периоды аномального похолодания 1962-1970 гг., 1977-1982 гг. и аномального потепления 2000-2014 гг.

В первом случае ослабление адвекции тепла атлантических вод из Норвежского моря, преобладание ветров северных направлений и интенсификация под их воздействием холодных течений способствовали формированию на акватории Баренцева моря значительного дефицита тепла и суровых ледовых условий с максимальными значениями аномалии в ледовых сезонах 1968-1969 (27 %) и 1978–1979 гг. (19 %).

Во втором – смещение траекторий атлантических циклонов к северу и усиление западного атмосферного переноса в высоких широтах способствовало формированию теплых аномалий

в западном секторе российской Арктики, росту температуры воздуха и поверхностного слоя моря, замедлению процессов ледообразования. Ледяной покров в Баренцевом море, за исключением сезона 2002/2003 гг., не получил широкого распространения и распределялся на достаточно ограниченной для зимнего сезона акватории.

По мнению ряда авторов [7, 10], характерная особенность климатических колебаний в Арктике заключается в смене периодов похолоданий и потеплений полей температуры воздуха и воды, сопряженных с изменчивостью крупномасштабной атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, а также с поверхностной температурой воды в Северной Атлантике. В свою очередь, в соответствии с климатическими изменениями в Арктике происходят колебания ледовых условий в арктических морях. Спектры колебаний, которые носят полициклический характер, характеризуются более или менее значимыми пиками на периодах 50–60 лет, около 20, 8–12, 5–7 лет и 2–3 года.

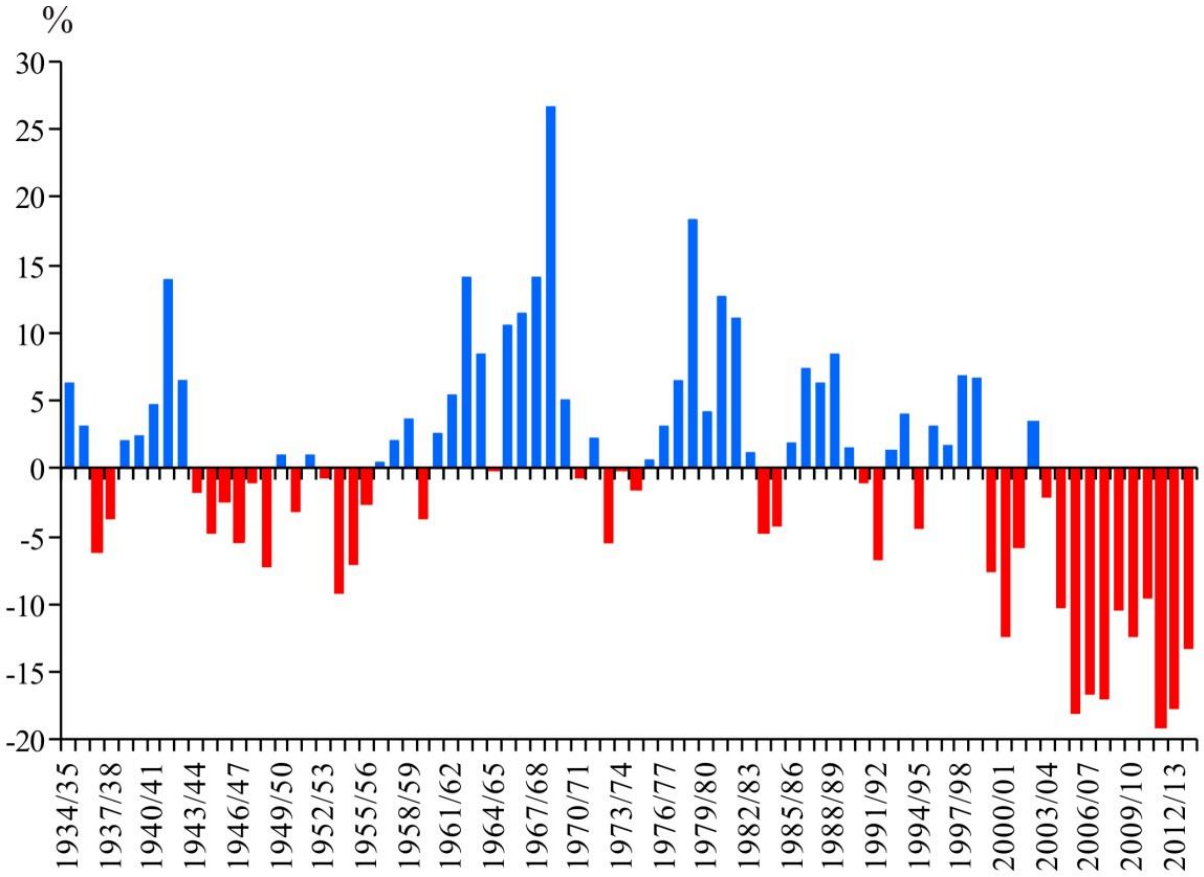


Рис. 1. Аномалии общей ледовитости Баренцева моря в 1934–2014 гг.

Статистические характеристики ледовитости Баренцева моря и ее аномалий в пределах выделенных однородных (по преобладающему знаку аномалий) периодов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики ледовитости Баренцева моря
и ее аномалий в холодные и теплые периоды (1934-2014 гг.)

Периоды	Ледовитость, %			Аномалии, %		
	максимум	минимум	средняя	максимум	минимум	средняя
Продолжительные периоды						
1943/1944–1959/1960	40	27	34	-9.1	0.4	-2.4
1960/1961–1998/1999	63	29	41	26.5	-0.1	4.5
1999/2000–2013/2014	39	17	25	-19.1	-2.1	-11.2
Короткие периоды						
1938/1939–1942/1943	50	38	42	13.9	1.9	5.8
1960/1961–1969/1970	63	36	46	26.5	-0.1	9.8
1970/1971–1975/1976	38	31	35	-5.4	-0.2	-0.9
1976/1977–1981/1982	54	39	45	18.3	3.1	9.2
1986/1987–1988/1989	45	42	43	8.4	6.2	7.3
1995/1996–1998/1999	43	38	41	6.8	1.6	4.5

Временное распределение и повторяемость различных градаций аномалий ледовитости Баренцева моря

Анализ временного распределения и повторяемости крупных и очень крупных аномалий ледовитости за последние полвека выполнен с помощью созданного календаря ежемесячных ледовых аномалий Баренцева моря (рис. 2).

Результаты анализа по выбранным градациям показали, что повторяемость вместе взятых очень крупных (ОКР) и крупных (КР) аномалий составила более половины всех аномалий (66 %). При этом доля ОКР аномалий обоих знаков составила 20 %. Соотношение положительных и отрицательных ОКР и КР аномалий, вместе взятых, оказалось одинаковым (по 33 %). Доля малых аномалий обоих знаков также составила одну треть всех аномалий (рис. 3*а*).

Обращает на себя внимание тот факт, что подавляющее большинство положительных ОКР и КР аномалий наблюдалось в начале рассматриваемого периода.

В то же время отрицательные ОКР аномалии ледовитости совсем отсутствовали, а отрицательные КР аномалии составили только около 3 %. (рис. 3*б*). Данное десятилетие оказалось чрезвычайно неблагоприятным как для мореплавания, так и для рыболовства.

К числу самых ледовитых лет в Баренцевом море, безусловно, следует отнести сезон 1968/1969 гг., характеризовавшийся 11 ОКР положительными аномалиями. Дополнительно к наиболее ледовитым были отнесены 1962/1963 и 1967/1968 гг. В эти сезоны отмечалось по 7 ОКР, а также 3 и 4 КР положительных аномалий соответственно.

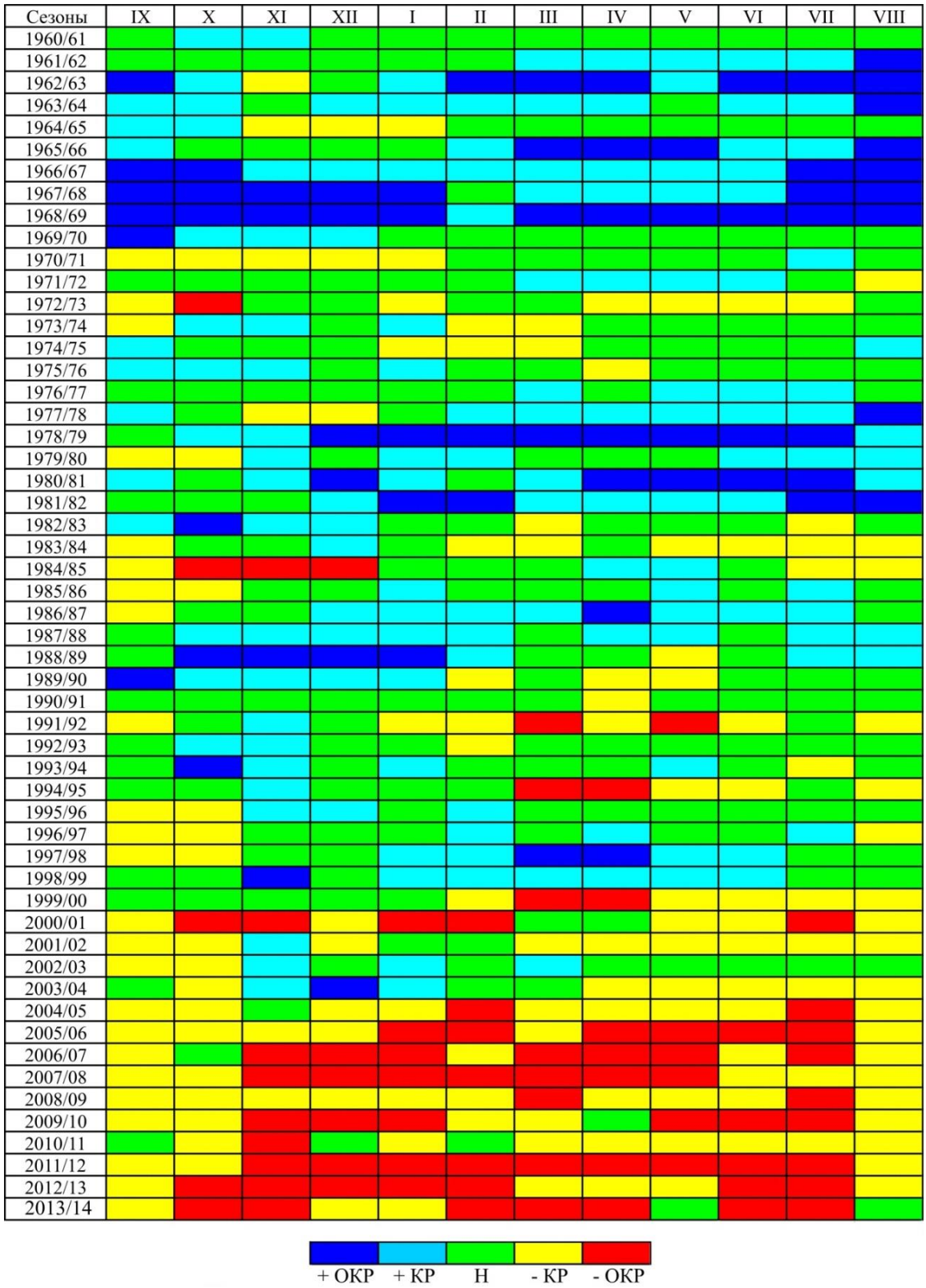


Рис. 2. Календарь ежемесячных ледовых аномалий Баренцева моря в 1960-2014 гг.

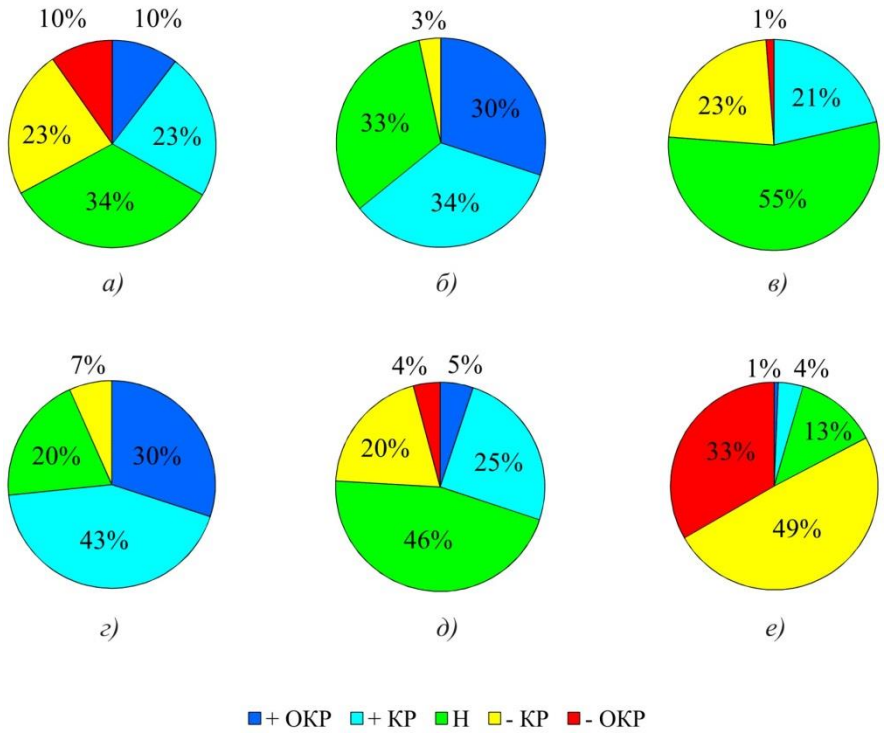


Рис. 3. Повторяемость различных типов ледовых аномалий в Баренцевом море:
а – 1960/1961 – 2013/2014 гг.; б – 1960/1961 – 1969/1970 гг.; в – 1970/1971–1976/1977 гг.;
г – 1977/1978 – 1981/1982 гг.; д – 1982/1983 – 1999/2000 гг.; е – 2000/2001 – 2013/2014

В первой половине 1970-х гг. повторяемость аномалий на максимуме была заметно ниже. В этот период преобладали малые аномалии обоих знаков (рис. 3*в*).

На рубеже 1970–1980-х гг. выделяется сезон 1978/1979 гг., когда наблюдалось 8 ОКР и 3 КР положительных аномалии (рис. 2). В сумме ОКР и КР положительные аномалии за холодный период сезонов 1977/1978-1981/1982 гг. составили 73 %, а отрицательные ОКР аномалии ледовитости полностью отсутствовали (рис. 3*г*).

В последующем до конца 1990-х гг. продолжительность ОКР и КР аномалий одного знака составляла не более 2–3 месяцев, а доля малых аномалий обоих знаков – 46 % (рис. 3*д*). Причем, как упоминалось выше, с начала 1990-х гг. в Баренцевом море наблюдается теплая фаза климатических колебаний, которая продолжается по настоящее время [11].

На протяжении первых 14 лет XXI века состояние экосистемы Баренцева моря характеризуется высоким теплосодержанием вод, низкой ледовитостью и доминированием отрицательных ледовых аномалий. В этот период сумма КР и ОКР отрицательных аномалий достигла 82 %, в то время как доля вместе взятых КР и ОКР положительных аномалий составила только около 5 %. (рис. 3е)

К числу самых малоледовитых лет, безусловно, следует отнести сезоны 2005–2006, 2007–2008, 2011–2012 и 2012–2014 гг., включавшие по 7–9 ОКР и 3–5 КР отрицательных аномалий. При этом в указанные ледовые сезоны никаких других аномалий, кроме отрицательных КР и ОКР, не наблюдалось.

Указанные обстоятельства обусловили относительно легкие условия для судоходства и более протяженные нагульные миграции промысловых видов рыб. В частности, в этот период

акватория промысла трески расширилась до прибрежных вод Новой Земли на востоке и до Возвышенности Персея на севере моря [4].

Особенности сезонных флуктуаций ледовых аномалий Баренцева моря

Отличительная особенность сезонных изменений ледовитости Баренцева моря состоит, с одной стороны, в том, что акватория моря никогда полностью не замерзает, а с другой – при среднемноголетних условиях ледяной покров полностью не вытаивает [6].

Анализ изменчивости ледовых аномалий Баренцева моря в периоды максимальной (февраль – апрель) и минимальной (август – сентябрь) ледовитости выявил, что аномалии в зимний период значительно превосходят таковые в летний период. В феврале – апреле на протяжении рассматриваемого периода размах аномалий ледовитости был 50-59 %, в то время как в августе – сентябре лишь в первое десятилетие рассматриваемого периода размах аномалий достигал 28-31 %, а в остальные годы не выходил за пределы 17-19 %.

Результаты расчетов показали, что стандартное отклонение ледовитости от нормы в Баренцевом море наибольшее в мае – июне (15.4 и 14.6 %), когда начинается разрушение ледяного покрова. В августе – сентябре (минимум годового хода ледовитости) стандартные отклонения ледовитости достигают минимальных значений (7.6 и 7.3 %). Вновь стандартное отклонение увеличивается в ноябре – декабре, когда происходит процесс льдообразования и интенсивное приращение площади льда.

Самостоятельней интерес представляют конкретные сезоны отдельных лет с экстремальными значениями аномалий ледовитости в Баренцевом море. Как уже отмечалось ранее, большинство экстремальных ситуаций с положительной (повышенной относительно нормы) ледовитостью имели место в 1960-е гг. В частности, в апреле 1966 г. наблюдалась самая высокая ледовитость (86 %) за весь период наблюдений, превышение ледовитости над нормой в этом случае достигло 27 %. Аналогичный случай наблюдался в марте 1963 г. (83 % ледовитость и 25 % аномалия), но экстремальная аномалия ледовитости приходится на ноябрь 1968 г. Величина аномалии в этом случае составляла 38 % выше нормы.

Наибольшее количество экстремальных ситуаций с пониженной ледовитостью отмечались в 2012 и 2013 гг. Так, соответственно в августе – октябре и в июле - октябре указанных лет акватория Баренцева моря была полностью свободна ото льда. Экстремальные величины ледовых аномалий в эти годы наблюдались в июле и составляли 20 и 21 % ниже нормы соответственно.

Межгодовые и сезонные колебания ледовых аномалий Карского моря

Анализ временнóго распределения и повторяемости ежемесячных ледовых аномалий Карского моря за период 1979–2012 гг. по выбранным градациям показал, что подавляющее большинство положительных крупных ОКР и крупных КР аномалий случались в летние месяцы и в сентябре – декабре первого двадцатилетия рассматриваемого периода, а отрицательные аномалии преобладали в 2005–2012 гг. (рис. 4). А с января по май ледовитость Карского моря была близка к норме, доминировали малые аномалии обоих знаков (91 %).

По продолжительности около половины всех аномалий (48 %) заняли ОКР и КР аномалии, вместе взятые. Соотношение положительных и отрицательных ОКР и КР аномалий составило 29 и 20 % соответственно. Причем, если повторяемость отрицательных ОКР и КР аномалий оказалась одинаковой (по 10 %), то в повторяемости положительных ОКР и КР наблюдается большая разница (3 и 26 % соответственно). Доля малых аномалий обоих знаков составила 52 %.

К числу самых ледовитых лет в Карском море следует отнести сезоны 1980–1981 и 1998–1999 гг., за которые случились по 3 ОКР и 4–5 КР положительных аномалий. Дополнительно к наиболее ледовитым можно отнести сезоны 1979–1980, 1982–1983 и 1990–1991 гг., когда отмечалось по 5–7 КР положительных аномалий.

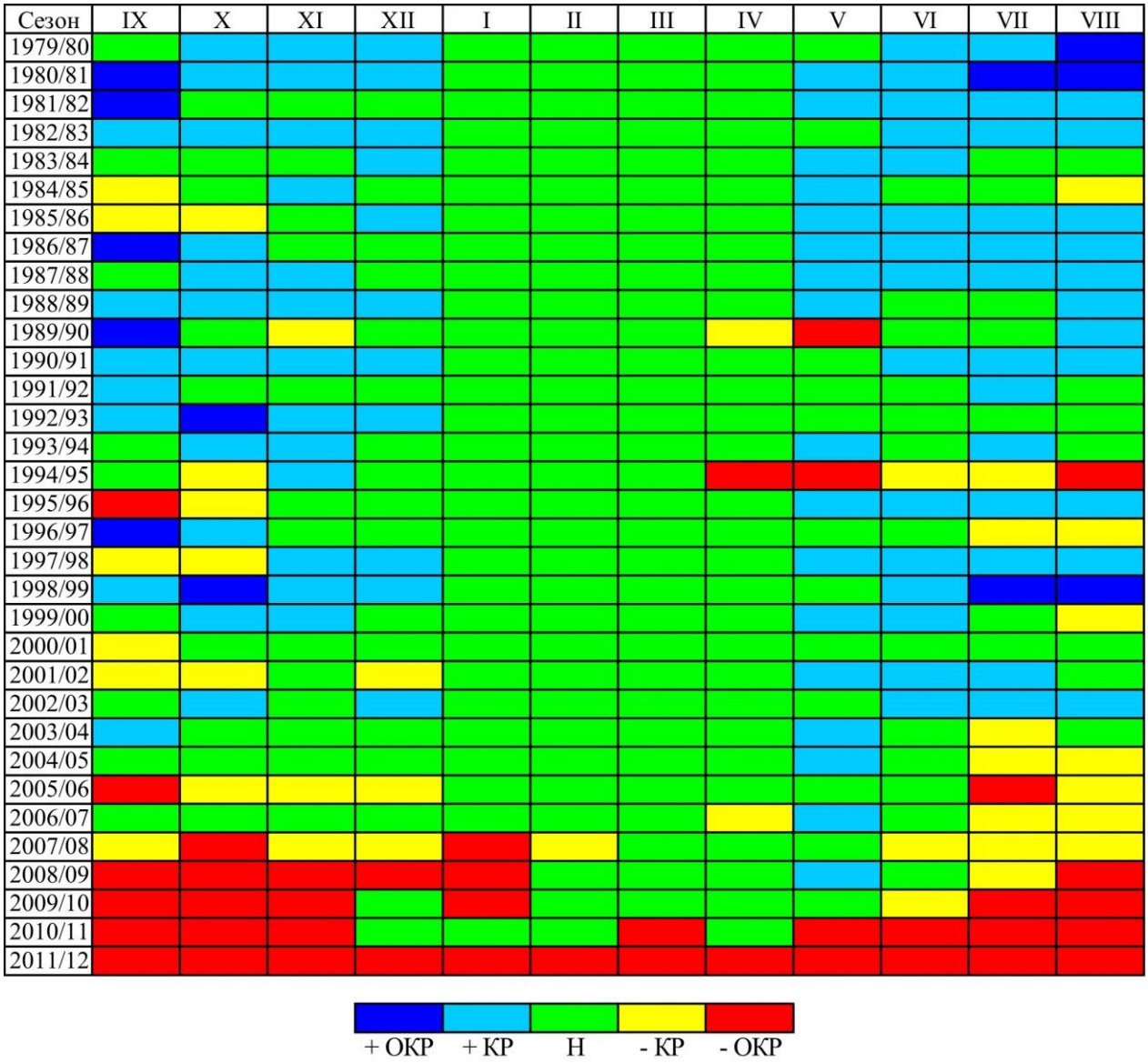


Рис. 4. Календарь аномалий ледовитости Карского моря в 1979–2012 гг.

В период 2005–2012 гг. имели место высокое теплосодержание вод и низкая ледовитость. КР и ОКР отрицательные аномалии составили более половины всех аномалий (62 %), в то же время наблюдалось только 2 КР положительные аномалии ледовитости, а положительные ОКР аномалии совсем отсутствовали.

Самым малоледовитым в этот период оказался сезон 2011–2012 гг. с 12 ОКР отрицательными аномалиями. Ледовые процессы в том сезоне развивались по легкому типу, что создало весьма благоприятные условия для мореплавания.

В целом, как следует из анализа, в отличие от Баренцева, для Карского моря не типичны резкие колебания ледовитости в зимнее время, когда обычно преобладают малые аномалии обоих знаков. Однако в начале 2012 г. в Баренцевом и Карском морях, в результате блокирования западного переноса в умеренной зоне отрогом Сибирского антициклона, сформировалась ярко выраженная положительная аномалия температуры воздуха и водных масс [12]. Отмеченные обстоятельства препятствовали процессу льдообразования и нарастания льда в европейском секторе Арктики в зимний период 2012 г. В Карском море впервые за последние 35 лет в зимние месяцы наблюдались обширные пространства чистой воды. При этом в феврале

почти вся юго-западная часть моря была свободна ото льда. Значительных размеров полынья сохранялась здесь и в марте – наиболее ледовитом месяце, по среднемноголетним данным, в Арктике. А среди зимних месяцев 2012 г. наиболее аномальным в Карском море оказался февраль, когда отрицательная аномалия ледовитости резко возросла до 20 % (рис. 5).

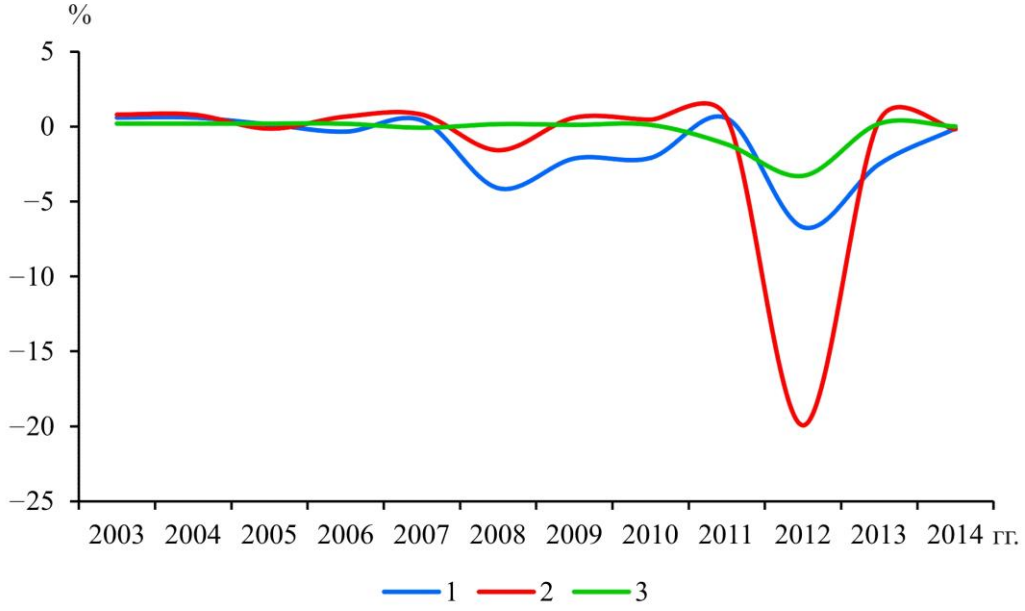


Рис. 5. Аномалии ледовитости (%) в Карском море в зимний период 2003-2014 гг.: 1 – январь, 2 – февраль, 3 – март

В зимний период 2013 г. в результате изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции над Северным полушарием в морях европейского сектора Арктики существовала тенденция к увеличению ледовитости по сравнению с тем же периодом 2012 г. При этом в Карском море в феврале – марте значения ледовитости вернулись к среднемноголетней норме (рис. 5).

Заключение

Анализ ледовых аномалий позволил выделить в Баренцевом море за последние 80 лет ряд периодов похолоданий и потеплений различной продолжительности. В структуре межгодовых колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря хорошо выражено присутствие циклических квазитридцатилетних холодных и теплых фаз, которые формируют 50–60-летние низкочастотные климатические колебания в Арктическом бассейне. На их фоне развиваются более мелкомасштабные процессы ледовых флуктуаций продолжительностью вплоть до 2–3 лет.

С помощью созданного календаря ледовых аномалий Баренцева моря, отражающего временно́е распределение и повторяемость крупных и очень крупных аномалий ледовитости, установлено, что наиболее крупные положительные ледовые аномалии произошли во второй половине 1960-х и на рубеже 1970-х и 1980-х гг. Так, количество крупных и очень крупных положительных аномалий за холодный период сезонов 1977/1978-1981/1982 гг. в сумме заняло 73 %, а отрицательные очень крупные аномалии ледовитости полностью отсутствовали.

Наиболее крупные отрицательные ледовые аномалии наблюдались в течение первых 13 лет XXI века. В этот период сумма крупных и очень крупных отрицательных аномалий достигла 82 %, а доля крупных и очень крупных положительных аномалий ледовитости, вместе взятых, составила только около 5 %. В 2013–2014 гг. проявилась тенденция к уменьшению отрицательных аномалий ледовитости.

Расчеты показали, что изменчивость сезонных ледовых аномалий Баренцева моря в период максимальной (февраль - апрель) ледовитости почти в два раза превосходит изменчивость аномалий в период минимальной (август - сентябрь) ледовитости.

Ледовые условия Карского моря на протяжении рассматриваемого периода были стабильны в зимние месяцы и значительно изменялись в остальные месяцы года. Наибольшие аномалии обоих знаков имели место в периоды весенне-летнего таяния и разрушения ледяного покрова, а также во время осеннего льдообразования и нарастания льда. Наиболее крупные отрицательные ледовые аномалии наблюдались в течение последних пяти лет с экстремальными значениями зимой 2012 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бочков Ю.А., Терещенко В.В.* Современные многолетние изменения гидрометеорологических условий в Баренцевом море и их биологические последствия // Экологические проблемы Баренцева моря: сб. науч. тр. ПИНРО. Мурманск, 1992. С. 225-243. **2.** *Денисов В.В.* Эколого-географические основы устойчивого природопользования в шельфовых морях (экологическая география моря). Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 502 с. **3.** Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries / *G. Matishov et al.* // Polar Biology. 2012. Vol. 35, № 12. P. 1773-1790. **4.** *Жичкин А.П.* Особенности климатических колебаний и рыбный промысел в высокоширотных районах Баренцева моря. // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2013. № 30. С. 108–115. **5.** *Матишов Г.Г., Жичкин А.П.* Влияние климатических флуктуаций на промысловую ихтиофауну экосистемы Баренцева моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2013. Т. 9, № 1. С. 61–70. **6.** *Миронов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 2004. 320 с. **7.** Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа / *И.Е. Фролов и др.* // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160. **8.** *Спичкин В.А.* Определение критерия крупной аномалии // Исследования ледовых условий Арктических морей, методы расчета и прогноза: тр. ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 15–19. **9.** Климатические аномалии Баренцева моря: отчет о НИР (заключ.) / под ред. Г.Г. Матишова. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2000. 98 с. **10.** Variability of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years / *I.V. Polyakov et al.* // J. Climate. 2004. Vol. 17, № 23, P. 4485–4497. **11.** *Жичкин А.П.* Климатические колебания ледовых условий в различных районах Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 69–78. **12.** Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov / *G.G. Matishov, S.L. Dzhenyuk, D.V. Moiseev, A.P. Zhichkin* // Oceanologia. 2014. 56 (3). P. 445–460.

Сведения об авторах

Жичкин Александр Павлович – к.г.н., старший научный сотрудник; e-mail: zhichkin@mmbi.info

УДК 551.579(268.45)

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ГУБЕ ДОЛГОЙ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Д.В. Моисеев, М.С. Громов
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

Аннотация

На основе исследований ММБИ КНЦ РАН, проведенных в 2008–2009 гг., и литературных данных дано описание гидрометеорологических условий губы Долгой Баренцева моря. Показаны основные черты метеорологического и гидрологического режимов губы Долгой в связи с планируемым строительством в ней приливной электростанции.

Ключевые слова:

губа Долгая, гидрометеорологические условия, температура, соленость, ветер.

Губа Долгая (69° 13’ N, 34° 59’ E) вдается в Мурманский берег Баренцевоморского побережья Кольского п-ова к востоку от о-ва Кильдин (рис. 1). Длина губы составляет примерно 5.7 км, а максимальная ширина – около 1 км (в северной и средней частях губы). Площадь губы чуть более 6 км^2. В 5 км на восток от губы Долгой расположена губа Териберская [1]. Изучение гидрометеорологических условий губы Долгой представляет особый интерес в связи с планируемым строительством в ней приливной электростанции (ПЭС) [2, 3]. Поэтому в 2008–2009 гг. ММБИ КНЦ РАН проводились комплексные экосистемные исследования данной губы, важной составляющей которых были гидрометеорологические наблюдения. Первые результаты опубликованы нами в 2010 г. [4]. Позже по этой же тематике вышла работа [5]. В настоящей публикации авторы обобщают известные гидрометеорологические сведения и более подробно рассматривают результаты исследований 2008, 2009 гг.

Рис. 1. Местоположение губы Долгая

Метеорологические условия

Метеорологические условия в губе Долгой отличны от открытого моря и во многом определяются влиянием суши, систематические метеонаблюдения не проводятся. Для описания использованы данные ближайшего к губе Долгой пункта регулярных гидрометеорологических наблюдений: ГУ «Мурманское УГМС» для ГМС «Териберка (в 5 км от губы). Среднемесячная многолетняя динамика температуры воздуха, влажности, повторяемости и средней скорости ветра с 1936 по 2007 гг. показана на рис. 2.

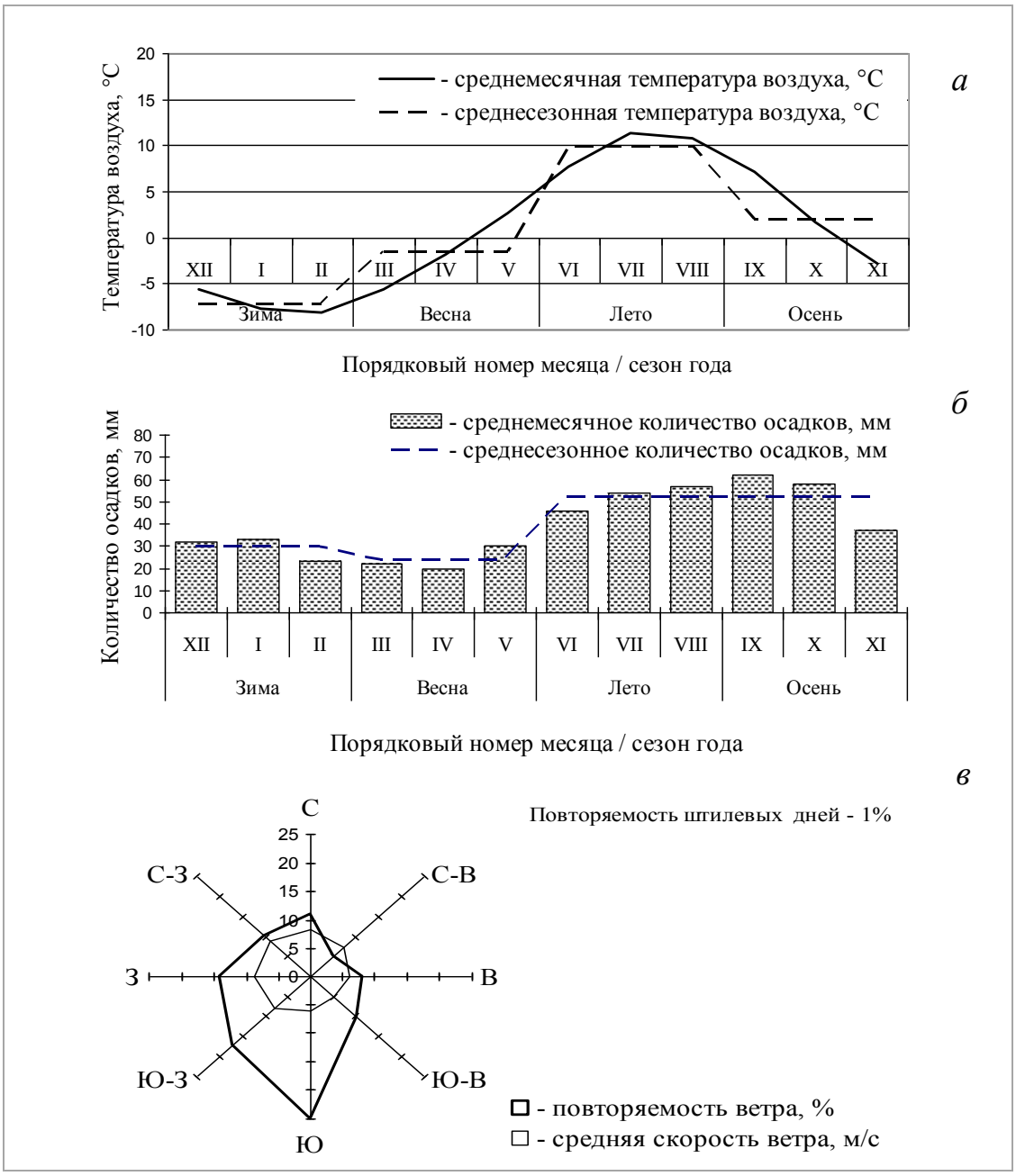


Рис. 2. Среднемесячная многолетняя динамика температуры воздуха (а), влажности (б), повторяемости и средней скорости ветра (в)

Средняя минимальная температура воздуха наиболее холодного месяца (февраль), по данным наблюдений, составляет -11.2 °С, средняя максимальная температура воздуха

наиболее жаркого месяца (июль) – 15.3 °С. Средняя продолжительность периода с температурой воздуха >0 °С – 181 день. Теплым сезоном является лето (среднесезонная температура составляет 9.9 °С), холодным – зима (-7.2 °С). Осень значительно теплее весны (на 3.6 °С), среднесезонная температура весной составляет 1.6 °С, а осенью – -2.0 °С).

Максимальное количество осадков, по данным 70-летних наблюдений на ГМС «Териберка», приходится на лето и осень (52 мм в сезон), а минимальное – на календарную весну (24 мм). За год выпадает около 474 мм, а годовое среднемесячное значение составляет 40 мм.

Губа Долгая открыта ветрам северных направлений, которые преобладают здесь с мая по август; повторяемость их 45 %. С сентября по апрель господствуют ветры от южного до юго-западного; суммарная повторяемость их достигает 65 %. Средняя скорость ветра в течение года – 4.4–9.1 м/с, наибольшая – 40 м/с [1].

Максимальный порыв ветра по флюгеру на ГМС «Териберка» превысил 45 м/с в январе 1972 г., а максимальный по анеморумбометру составил 43 м/с в феврале 1993 г. Скорость ветра, вероятность превышения которой составляет 5 %, равна 15 м/с.

В целом в течение года максимальная повторяемость наблюдается у ветров, воздействующих на территорию губы Долгая с южных направлений (юго-западное, южное и юго-восточное) – 52 %, минимальная с восточных – 23 %.

Независимо от сезона туманы чаще всего наблюдаются в гребнях повышенного давления, заключительных антициклонах и седловинах. В зимнее время туманы возникают еще и в зонах теплых фронтов. Для зимних туманов характерен пониженный, по сравнению с летним, фон давления. Туманы в губе Долгой наиболее часты с июня по август; зимой они редки, а в отдельные годы их совсем не бывает [1].

Баренцево море относится к району слабой грозовой активности. На акватории губы Долгой грозы возможны в течение всего года. Среднее число дней с грозовой деятельностью в году составляет 5–6 суток [6].

Гидрологический режим. Ветровое волнение

Штормовое волнение – один из основных факторов среды, создающих угрозу аварийных ситуаций в безледный период года и затрудняющих борьбу с их последствиями. В Баренцевом море, в отличие от других арктических морей, в течение всего года сохраняются обширные свободные ото льда пространства, что в сочетании с активной циклонической деятельностью приводит к высокой повторяемости штормового волнения. Волнение в губе наблюдается только при северных ветрах, в частности при северо-восточном, однако в вершине губы оно значительно слабее, чем в других ее частях. Среднемесячное число дней со штормом зимой – 10–12, летом – 2–3 [1].

Уровень моря

Уровенный режим Баренцева моря формируется под действием приливообразующих сил, метеорологических и ледово-гидрологических факторов. Наиболее общие его закономерности – преобладание приливной составляющей и возрастание колебаний уровня у побережий по сравнению с открытыми районами моря.

Сезонные колебания уровня обусловлены годовым ходом циркуляционных процессов в море и атмосфере, а также плотности морской воды. В Баренцевом море они выражены слабо [7].

Реальный размах колебаний уровня в приливном цикле в рассматриваемом районе побережья (без учета непериодической составляющей) характеризуется величиной приливов (табл. 1) [6; 8].

Средняя величина прилива в губе – 2.5 м. Скорость сизигийных приливных течений в губе не превышает 0.3 узла.

Непериодические колебания уровня в прибрежье Мурмана, в свою очередь, складываются из сгонно-нагонных, сезонных и межгодовых. Штормовые нагоны связаны

с прохождением глубоких циклонов, преимущественно с запада на восток или по «ныряющей» траектории с Баренцева моря на материк. Сгоны обычно вызываются воздействием барических полей мощных антициклонов. Максимальная повторяемость нагонов приходится на осень и зиму, сгонов – на месяцы с марта по май. Величина сгонно-нагонных колебаний уровня для побережья Мурмана, увеличивается с запада на восток: средний нагон в пределах 30–60 см, максимальный 90–115 см; средний сгон 25–35 см, максимальный 60–80 см. Продолжительность отклонений уровня соответствующего знака от его средних значений в приливном цикле составляет для нагонов: средняя – 70–75 ч, максимальная – 170–180 ч; для сгонов: средняя – 110–120 ч, максимальная – 270–300 ч [9].

Сезонные колебания уровня в губе Долгой обусловлены годовым ходом циркуляционных процессов в море и атмосфере, а также плотности морской воды. В Баренцевом море они выражены слабо – до 10 см в открытых районах и 20–25 см – на побережье Кольского п-ова. Минимальные значения при помесячном осреднении отмечаются в апреле-мае, максимальные – в октябре. Вклад межгодовых изменений, не превышающих 10 см за весь период наблюдений, еще меньше [6].

Таблица 1

Величина приливов для губы Долгая Баренцева моря, см

Характеристика прилива			Максимально возможный по астрономическим причинам
Квадратурный	Средний	Сизигийный	
178–267	250–347	312–471	374–565

Наиболее важной в практическом отношении характеристикой уровенного режима являются экстремальные значения уровня, обусловленные однонаправленным действием астрономических и атмосферных факторов. Для Баренцевоморского побережья Кольского п-ова максимальные зарегистрированные подъемы уровня по отношению к среднему многолетнему значению составляют 250–300 см, понижения – 250–270 см (табл. 1). Близкие к этому значения получены расчетным путем для колебаний уровня редкой повторяемости, возможных 1 раз в 10 лет; 100-летние максимумы и минимумы отличаются от 10-летних в среднем на 20 см [9].

Термохалинные условия

В поверхностном слое губы Долгой максимум прогрева и распреснения наблюдается в августе-сентябре, наибольшее выхолаживание в марте-апреле. С глубиной летние экстремумы смещаются на более поздние месяцы. В придонном слое рассматриваемые параметры в течение года меняются мало.

Губа находится в зоне прибрежных мурманских вод [6, 10–13].

В зимний период в губе вследствие развития конвективного перемешивания распределение температуры и солености по вертикали практически однородно [14]. Летом формируется прогретый и более или менее распресненный верхний квазиоднородный слой. Он подстилается слоем резкого изменения температуры и солености – сезонным термо- и галоклином.

Термохалинные условия в губе Долгой подвержены воздействию приливо-отливных течений, речного стока, процессов образования и таяния льда, сгонных и нагонных явлений.

Океанографические фронты в районе исследований

Положение и характеристики океанографических фронтальных зон имеют важное самостоятельное значение при описании фонового состояния природной среды. Значительное (на порядок и более) увеличение в этих зонах горизонтальных градиентов температуры, солености и плотности воды является причиной повышенной динамической активности, горизонтальных струйных течений и т.д. В связи с этим, с фронтами часто связаны районы высокой биологической продуктивности. Здесь же могут происходить накопление и интенсивные горизонтальные и вертикальные переносы загрязняющих веществ [15–17].

В губе Долгой возникают локальные прибрежные фронты, обостряющиеся и практически вертикальные в летний период, когда в результате сочетания усиления пресного стока с суши и приливного перемешивания на мелководьях повышенные градиенты гидрофизических параметров наблюдаются во всей толще вод от поверхности до дна. Такие микрофронты были обнаружены в период исследований 25–26 июля 2008 г.

Ледовые условия

В умеренные и суровые зимы в январе-апреле во внутренней части губы образуется неустойчивый ледяной покров.

Исследования ММБИ КНЦ РАН

В 2008 и 2009 гг. ММБИ КНЦ РАН проведены две экспедиции в губу Долгую – обе на НИС «Дальние Зеленцы» (рис. 3). В ходе экспедиционных исследований 25–26 июля 2008 г. в губе Долгой было выполнено 6 СТД-зондирований водной толщи от поверхности до дна. С 29 мая по 1 июня 2009 г. на акватории губы выполнялись СТД-зондирования водной толщи на 40 гидрологических станциях, 9 из них – с борта судна и 31 станция на мелководных участках – с катера «F500».

Все океанографические станции сопровождались попутными метеонаблюдениями, состоявшими из регистрации температуры приводного слоя воздуха, атмосферного давления, направления и силы ветра с помощью автоматической метеостанции AWS 2700. Видимость, высота волнения, облачность, атмосферные явления погоды оценивались визуально. Для определения степени прозрачности воды использовался диск белого цвета диаметром 30 см (диск Секки). Прозрачность определялась глубиной, до которой сохранялась видимость диска при погружении в воду на ручном лоте.

Организация палубных океанографических работ проводилась с помощью стандартных общепринятых методов, описанных в руководствах, методических рекомендациях и справочных пособиях [18–22]. Океанографические условия исследовались путем СТД-профилирования водной толщи от поверхности до дна зондом SEACAT SBE 19plus, оснащенным датчиками температуры, электропроводимости и давления. Полученные данные обрабатывались при помощи программного обеспечения от фирмы-производителя зонда в соответствии с руководством [23]. Датчики СТД-зонда были откалиброваны в лабораториях Ломоносовского отделения ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в 2008 г.

Метеорологические наблюдения в губе Долгой 25–26 июля 2008 г.

В ходе наблюдений температура воздуха изменялась в диапазоне от 8.6 (ст. 9) до 10.5 °С (ст. 5), при среднем значении 9.5 °С. Атмосферное давление практически не менялось, находясь в пределах 1019–1020 мб. Преобладал ветер северо-восточного направления. Средняя скорость ветра составила 4.9 м/с, максимальная – 10 м/с, минимальная – 1.2 м/с. Облачность была в основном сплошная слоистых форм. Преобладало ветровое волнение, направление которого совпадало с направлением ветра. Высота волн изменялась от 0.1 м до 1.5 м. Дальность видимости менялась от 4 до 22 км.

В период исследований в губе Долгой наблюдалась двухслойная структура вод (рис. 4). Глубина верхней границы слоя скачка плотности изменялась от 1 до 1.5 м. За пределами губы (на станции 10) слоя скачка плотности не наблюдалось.

В целом в районе исследований температура воды изменялась от 2.86 °С в придонном слое на станции 7 до 10.02 °С в поверхностном слое на станции 5 в куту губы, соленость воды варьировала от 15.99 ‰ в поверхностном слое на станции 5 до 34.27 ‰ в глубинных слоях на станциях 6–8 (рис. 4).

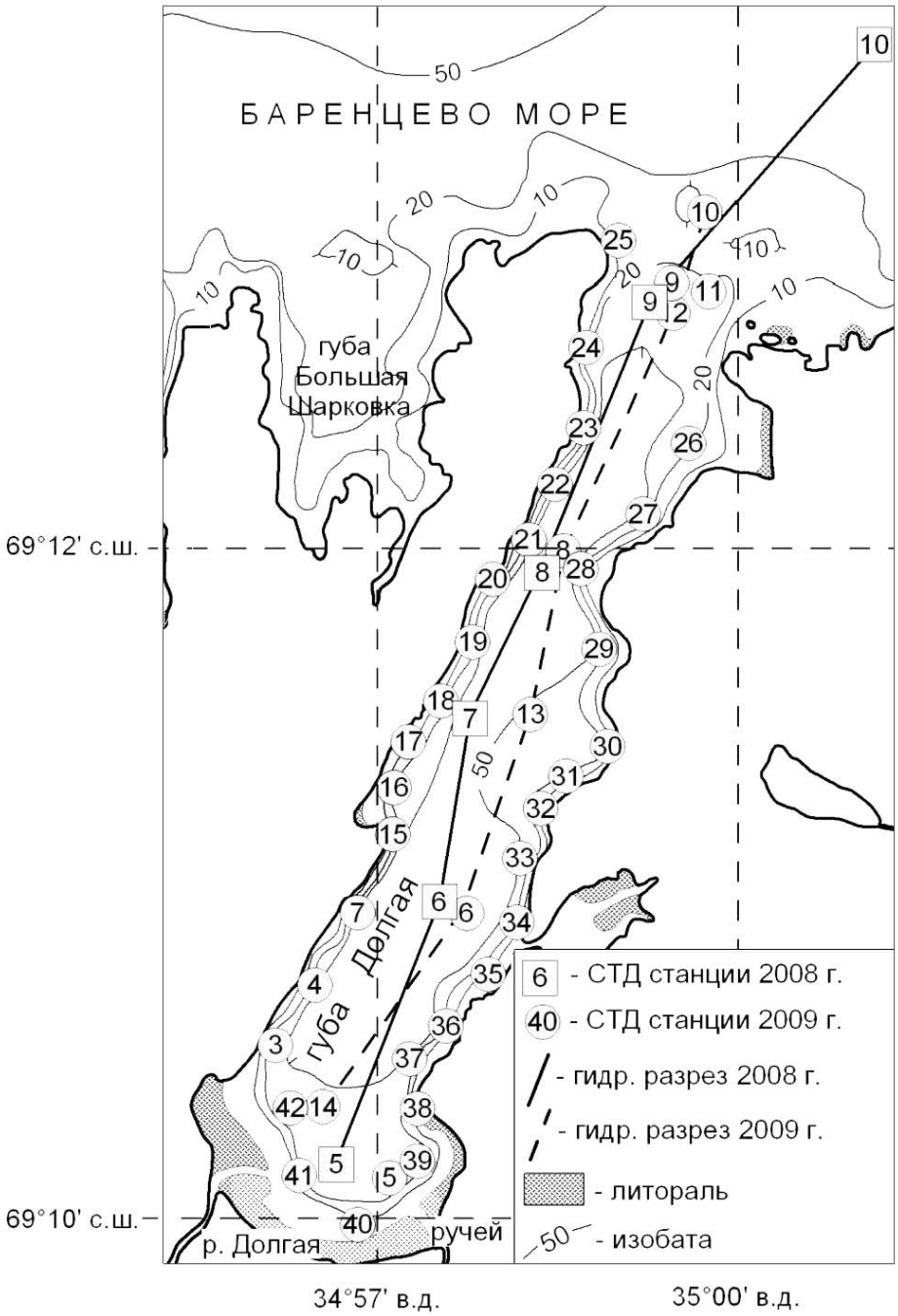


Рис. 3. Карта-схема расположения гидрологических станций, выполненных в губе Долгая в 2008 и 2009 гг.

До глубины примерно 50 м в губе Долгой наблюдался слой относительно прогретых вод, под которым находились холодные, сформированные в период осенне-зимней конвекции воды. Следует отметить, что водообмен этих вод с открытым морем затруднен из-за наличия на входе в губу подводного порога. Поэтому обновление придонных вод происходит преимущественно в результате вертикального конвективного перемешивания. На входе в губу, в районе подводного порога, в слое 15–35 м отмечены значительные горизонтальные градиенты температуры. В этом слое температурный микрофронт разделяет относительно холодные воды губы и теплые из-за хорошего перемешивания воды открытого моря. Значения градиента температуры воды доходят в микрофронте почти до 2 °С / км (рис. 4а).

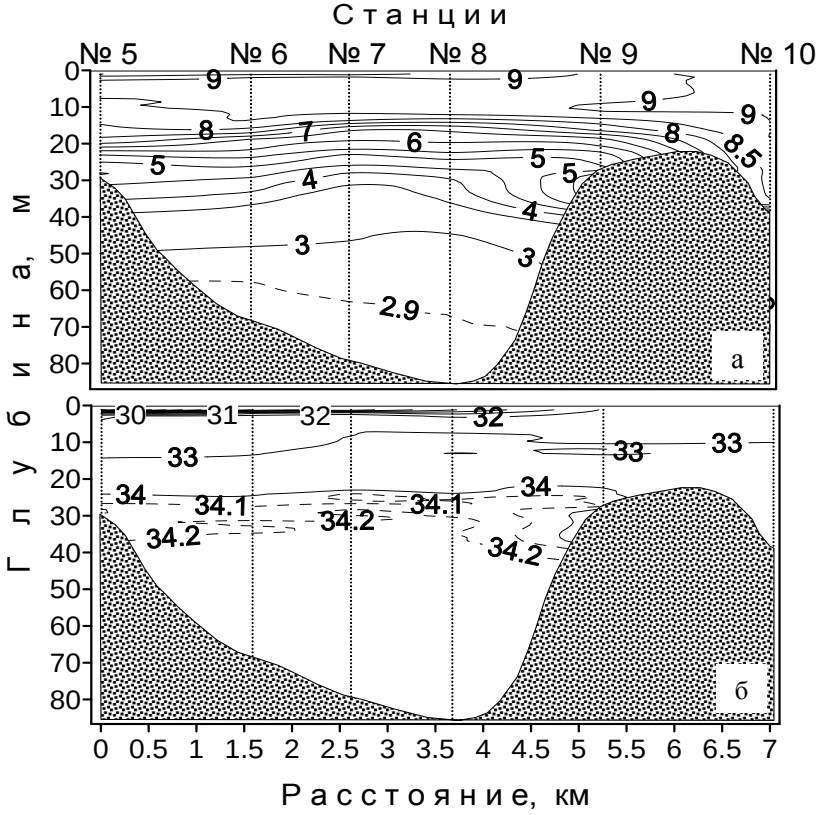


Рис. 4. Распределение температуры воды (°С) и солености (‰) на разрезе, выполненном вдоль губы Долгая 25–26 июля 2008 г.

Летом 2008 г. более всего был прогрет верхний 10-метровый слой (температура 9–10 °С). В нем вертикальный градиент температуры составил -0.81 °С. В промежутке от 10 до 30 м наблюдалось достаточно резкое падение температуры до 4.73 °С, в слое от 30 до 50 м падение теплосодержания вод было незначительным. Температура воды в этом слое уменьшалась примерно на 1 °С, от 50 м до дна – практически не изменялась (рис. 4а, табл. 2).

Для вертикального распределения солености воды было характерно наличие верхнего сильно распресненного слоя, наиболее хорошо выраженного в кутовой части губы и обусловленного пресным стоком реки Долгой. Ниже 25–35 м в губе залегают воды соленостью более 34 ‰, сформированные в период осеннее-зимней конвекции. На границе губы и открытого моря над подводным порогом в слое 20–0 м зарегистрирован соленостный микрофронт, разделяющий имеющие разную соленость воды губы и открытого моря. В слое 20–30 м соленость вод в открытом море меньше из-за более сильного вертикального перемешивания с вышележащими водами, чем в губе Долгой, где процессы вертикального перемешивания

затруднены наличием слоя пикноклина. Значения градиента в соленостном микрофронте достигали почти 0.5 ‰ / км (рис. 4б).

Таблица 2

Средние значения температуры (°С) и солености воды (‰), а также их градиенты по слоям на станциях, расположенных на акватории губы Долгая (ст. 5, 6–9) летом 2008 г.

Горизонт, м	Ср. *T*, ˚С	Ср. *S*, ‰	Слой, м	Градиент* *T*, ˚С	Градиент* *S*, ‰
1	9.53	25.55	1–3	-0.69	6.72
3	8.85	32.28	3–5	-0.11	0.37
5	8.74	32.65	5–10	-0.01	0.32
10	8.73	32.97	1–10	-0.81	7.41
20	6.22	33.79	10–20	-2.51	0.83
30	4.00	34.17	20–30	-2.22	0.38
40	3.15	34.25	30–40	-0.85	0.08
50	2.95	34.27	40–50	-0.20	0.02
60	2.91	34.27	50–60	-0.05	0.00
70	2.89	34.27	60–70	-0.02	0.00
80	2.88	34.27	70–80	-0.01	0.00
Дно	3.57	34.24	1–дно	-5.96	8.68

* Отрицательное значение градиента показывает уменьшение, положительное – рост.

Максимальный вертикальный градиент солености наблюдался в верхнем 10-метровом слое и составил 7.41 ‰. В слое 10–50 м значения содержания соли в воде изменялись незначительно – примерно на 1.31 ‰. От 50 м до дна солёность не менялась и составляла 34.27 ‰. Стоит отдельно отметить, что самые большие градиенты температуры и солености из расчета на 1 м глубины наблюдались в поверхностном 3-метровом слое, по теплосодержанию – 0.35 °С/м, по содержанию соли – 3.36 ‰.

Сравнение термохалинных свойств водных масс с литературными данными [6, 10, 11] позволяет считать, что в губе Долгой наблюдались прибрежные мурманские воды.

Метеорологические наблюдения в губе Долгой с 29 мая по 1 июня 2009 г.

Синоптическая обстановка в прибрежной зоне Кольского п-ова в это время обусловливалась влиянием циклонической деятельности. В конце мая на метеоусловия оказывали влияние два циклона. Центр одного из них, более глубокого (атмосферное давление в центре – 980 гПа), на 28 мая 2009 г. находился над Кольским п-овом. Циклон смещался на восток через центральную часть Баренцева моря со скоростью 60–70 км/ч. Второй циклон перемещался из Северной Атлантики на юго-восток Баренцева моря со скоростью 40–50 км/ч и находился в стадии заполнения (давление в центре – 1010 гПа). К концу наблюдений (начало июня) синоптическая ситуация принципиально не изменилась и определялась этими же двумя циклонами.

Активная циклоническая деятельность в основном сопровождалась пасмурной погодой (повторяемость – 80 % синоптических сроков), сильным ветром, осадками в виде дождя и снега. Максимальная повторяемость была характерна для ветров северо-западного (40 %) и северного (21 %) направлений, что характерно для этого сезона года (см. разд. Метеорологические условия). У входа в губу скорость северо-западного ветра достигала 22 м/с, северного –15 м/с. В южной части губы скорость ветра не превышала 7 м/с. Высокая повторяемость и скорость северо-западных ветров способствовали образованию волн, высота которых в районе выхода из губы доходила до 2.5 м, а в южной части губы в это время высота волн не превышала

1.0 м. Атмосферное давление в течение 4 дней варьировало в значительном интервале от 987 до 1025 мб и в среднем составило 1014 мб. Температура воздуха изменялась от 2 до 17 °С, а среднее значение составило 7 °С.

Гидрологические станции выполнялись на всей акватории губы на глубинах от 3 до 79 м (см. рис. 3). Анализ горизонтального распределения температуры в поверхностном слое воды показал, что атмосферный прогрев в конце мая – начале июня выражен относительно слабо. Термохалинное состояние вод у берега в основном определялось воздействием поверхностного стока талых вод, стекавших в губу через малые водотоки, а также стоком ручьёв, расположенных в юго-восточной части акватории, и стоком реки Долгой (в юго-западной части). Температура воды у берега составляла около 5 °С (от 4.5 до 5.6 °С) и только в юго-восточной части (у стока ручья) около 4 °С (от 3.2 до 4.5 °С) (рис. 5а).

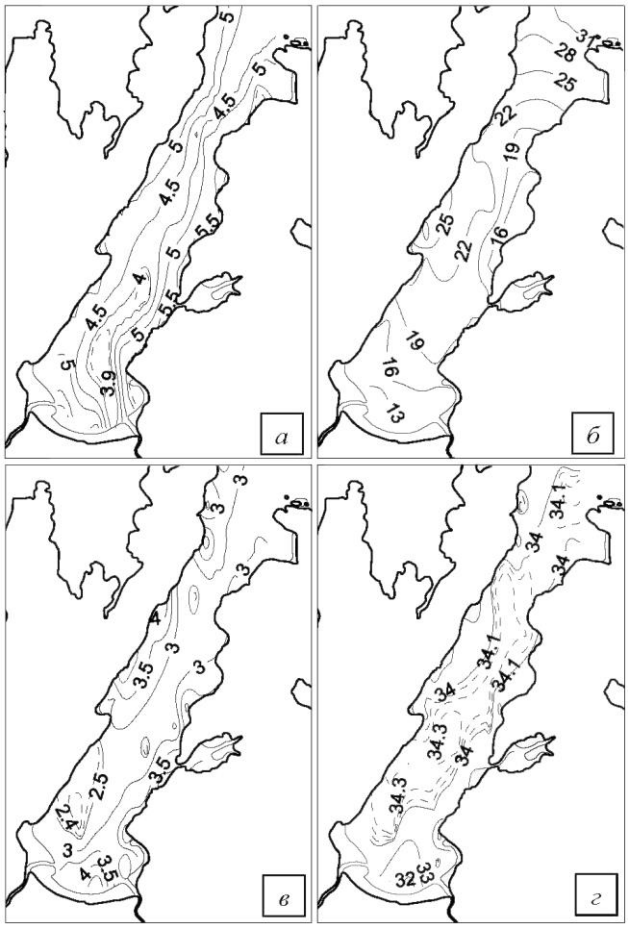


Рис. 5. Распределение поверхностной и придонной температур, °С (а, в), солености, ‰ (б, г) с 29 мая по 1 июня 2009 г.

Вероятное объяснение в том, что устье полноводного в весенний период ручья проходило через значительное количество лежавшего на сопках таявшего снега и вода не успевала прогреваться до входа в губу. Вдоль осевой линии исследуемой акватории температура воды была на 0.5 °С ниже, чем у берегов. Из-за большого количества водотоков, стекающих со скал, восточная периферия губы характеризовалась более низкой соленостью воды (около 16 ‰), чем западная (около 25 ‰) (рис. 5б). Содержание соли в метровом слое увеличивалось с юга на север (с 13 до 31 ‰). Южную часть губы сильно опреснял сток ручья и р. Долгой, поэтому значения солености в кутовой части и на выходе из губы различались почти на 18 ‰.

Значения температуры в придонном слое изменялись от 2.3 до 4.5 °С (рис. 5в), при этом на прибрежных мелководных участках (до 20 м) этот показатель составлял 3.5–4.5 °С, на более глубоководных (от 20 до 79 м) – 2.5–3.0 °С. Значения солености у дна варьировали от 28.8 до 34.3 ‰, при этом максимальные значения (около 34.3 ‰) в основном регистрировались в глубоководных частях губы и на выходе из нее. У берегов, на мелководье (до 15 м), величина, как правило, не превышала 33.0 ‰ (рис. 5г).

Разрез, построенный вдоль осевой линии губы с юга на север (станции 6, 8, 10, 12–14, рис. 3), показывает вертикальное распределение гидрологических характеристик от поверхности до дна (рис. 6).

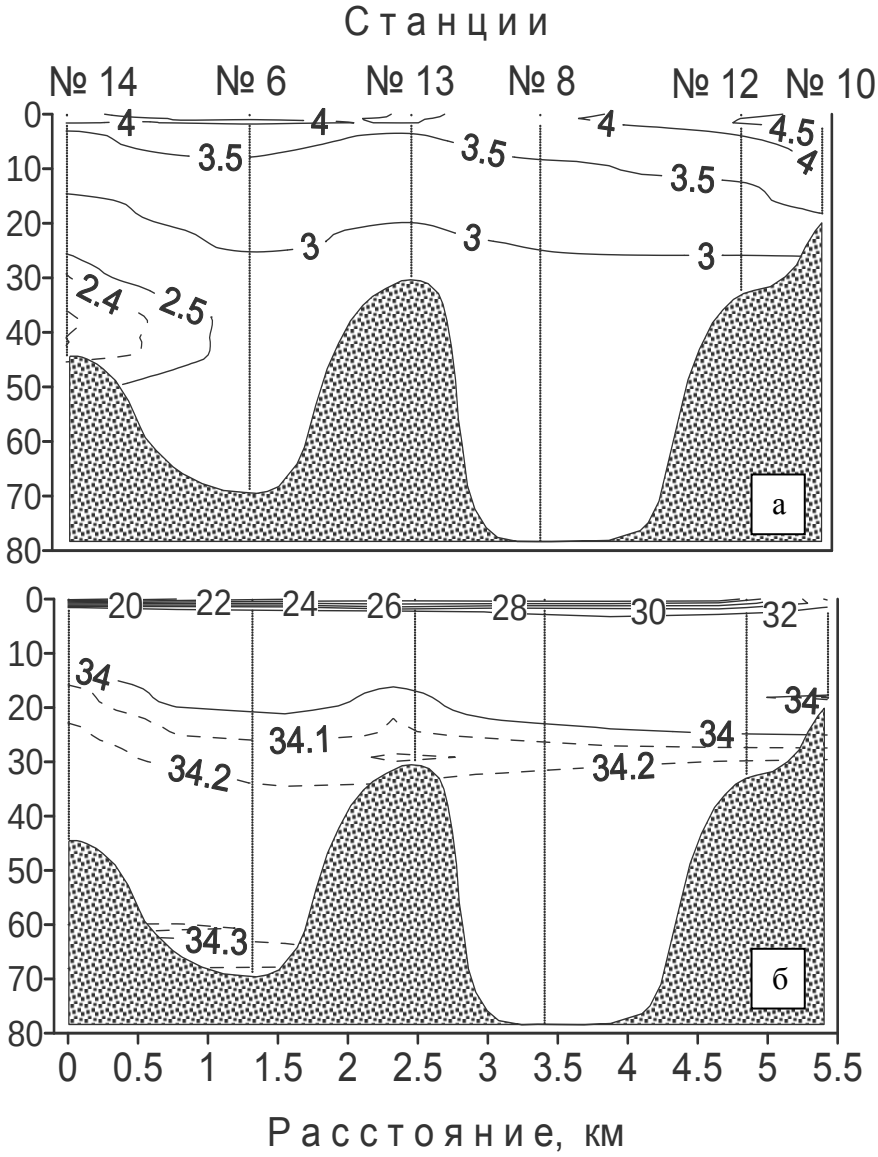


Рис. 6. Распределение температуры воды (°С) и солености (‰) на разрезе, выполненном вдоль губы Долгая 29 мая – 1 июня 2009 г.

Температура в поверхностном 1-метровом слое росла на 0.6 °С (с 4.1 до 4.7 °С), а соленость – на 11.4 ‰ (от 16.7 до 28.1 ‰) от кутовой к мористой части губы. В придонном слое, в зависимости от глубины места различия по температуре составляли 1.2 °С (от 2.30 до 3.54 °С) по солености 0.8 ‰ (от 33.48 до 34.30 ‰), при этом максимальная температура (3.54 °С)

и минимальная соленость (33.48 ‰) у дна наблюдались на мелководной 10-й станции (глубина 18 м), расположенной у входа в губу.

Среднее значение поверхностной температуры в метровом слое воды по разрезу составило около 4.0 °С, а солености – 24.5 ‰.

В период исследований с 29 мая по 1 июня 2009 г. в губе Долгой наблюдалась двухслойная структура вод. Глубина верхней границы слоя скачка плотности составила около 2–3 м. В верхнем слое (1–3 м) наблюдались максимальные изменения гидрологических характеристик с глубиной (вертикальные градиенты). За пределами губы на станции 10 слой скачка плотности почти отсутствовал.

Анализ СТД-профилей гидрологических станций и построенные по ним вертикальные и горизонтальные разрезы показали, что в губе Долгой в начале июня 2009 г. термоклин в отличие от галоклина был плохо выражен, что говорит о слабом прогреве и большом опреснении. Особенно ярко это наблюдалось у берегов, где происходил сток береговых вод. Средняя температура воды в поверхностном 1-метровом слое (по 40 станциям) составила около 5.0 °С, соленость – 20.8 ‰, у дна 3.2 °С и 33.6 ‰ соответственно. Ниже 20 м в губе наблюдались воды соленостью более 34 ‰, которые были сформированы в период зимне-весенней конвекции.

Как отмечалось ранее, наибольшие вертикальные градиенты (из расчета на 1 м глубины) наблюдались в поверхностном 3-метровом слое, по температуре – 0.13 °С/м, по солености – 5.08 ‰/м.

Таблица 3

Средние значения температуры воды (°С) и солености (‰), а также их градиенты по слоям на станциях разреза (кроме ст. 10, выходящей за пределы губы), весна 2009 г.

Горизонт, м	Ср. *T*, ˚С	Ср. *S*, ‰	Слой, м	Градиент* *T*, ˚С	Градиент* *S*, ‰
1	3.97	22.52	1–3	-0.25	10.15
3	3.72	32.67	3–5	-0.11	0.59
5	3.61	33.26	5–10	-0.20	0.40
10	3.41	33.66	1–10	-0.56	11.14
20	3.08	33.98	10–20	-0.33	0.32
30	2.66	34.19	20–30	-0.42	0.21
40	2.51	34.27	30–40	-0.15	0.08
50	2.59	34.29	40–50	0.08	0.02
60	2.59	34.30	50–60	0.00	0.01
70	2.59	34.30	60–70	0.00	0.00
80	2.59	34.30	70–80	0.00	0.00
Дно	2.51	34.28	0 – дно	-1.46	11.76

* Отрицательное значение градиента показывает уменьшение, положительное – рост.

В верхнем 10-метровом слое градиент температуры составил -0.56 °С, солености – -11.14 ‰. В промежутке от 10 до 50 м падение температуры и рост солености были незначительны – всего около 1 °С и 0.6 ‰ соответственно, от 50 м до дна (80 м) значения температуры и солености практически не изменялись и составили 2.59 °С и 34.30 ‰ соответственно. Таким образом, от поверхности до дна температура воды в среднем уменьшалась на 1.46 °С, а соленость возрастала на 11.76 ‰ (рис. 6, табл. 3).

Прозрачность воды в губе Долгой определялась на 9 станциях (5, 6, 8, 9, 10–14) с борта судна, в зависимости от облачности ее значения варьировались в диапазоне 4–7 м.

Минимальная прозрачность (4 м) наблюдалась при 10-балльной кучевой (Cu) и кучево-дождевой облачности (Cb), максимальная (7 м) – при безоблачном небе. В среднем прозрачность воды составила 5 м.

Заключение

Летом 2008 г. и весной 2009 г. преобладали ветра северных румбов, скорость которых достигала 10 и 22 м/с соответственно. Несмотря на большую скорость ветра (в мае 2009 г.) и высокую высоту волны (до 2.5 м) на входе в губу, в южной части акватории было достаточно спокойно. Высота волн не превышала 1 м, что говорит о достаточно быстром ее затухании за счет многократного отражения от берегов. Средняя температура воздуха в конце июля 2008 г. составила 9.5 °С, в конце мая 2009 г. – 7.0 °С, что свойственно этому участку побережья Кольского п-ова [6].

Средняя температура верхнего слоя вод в июле 2008 г. почти в 2–2.4 раза была выше за счет летнего прогрева и притока более прогретых, нежели весной речных вод. В целом можно сказать, что значения температуры в слое 0–50 м летом 2008 г. были примерно в два раза выше, чем в конце весны 2009 г. Глубже 50 м, независимо от сезона, находились холодные, сформированные в период осеннее-зимней конвекции воды, которые летом незначительно (на 0.3 °С) были теплее, чем весной.

В конце июля 2008 г. сильное распреснение верхнего двух-трехметрового слоя в основном наблюдалось в южной части губы, в районе устья р. Долгой. В мае 2009 г. кроме увеличенного под воздействием талых вод стока р. Долгой большой вклад вносили водотоки ручьев, образовавшиеся из тающего снега, которые стекали в губу с окружающих ее берегов. Вследствие этого соленость поверхностного слоя весной на разрезе в среднем была на 3 ‰ ниже, чем летом. В слое от 3 до 20 м соленость весной в среднем была на 0.5 ‰ выше, чем летом, а ниже 20 м разница по солености между 2008 и 2009 гг. практически отсутствовала. Прозрачность воды в губе Долгой в конце весны и середине лета составляла в среднем 7 м.

Касаясь вопросов оценки зоны влияния проектируемой ПЭС и предварительного прогноза возможных изменений окружающей среды, можно сказать, что относительно достоверно спрогнозировать влияние ПЭС на экосистему губы Долгой можно будет только после проведения подробных инженерно-экологических изысканий для каждого сезона. При этом следует учитывать, что губа Долгая не является абсолютно нетронутым человеком природным объектом, так как на ее берегах ранее существовала развитая военная инфраструктура. Учитывая опыт, накопленный в ходе мониторинга в губе Кислой с эксплуатируемой там Кислогубской ПЭС [24], можно предположить, что при неправильной эксплуатации плотина ПЭС повлияет на важнейшие абиотические условия существования экосистемы губы. Так, плотина нарушит циркуляцию водных масс и нормальный водообмен с открытым морем, что, в свою очередь, вызовет опреснение и создаст условия для формирования анаэробных условий в придонном слое. В долгосрочной перспективе такое изменение факторов среды может привести к полной или частичной деструкции существующей там сейчас экосистемы. Зона влияния ПЭС распространится на всю площадь губы. Негативное влияние будет велико только при неправильной эксплуатации технологического комплекса ПЭС, отвечающего за водообмен губы с открытым морем. Поэтому для контроля гидрометеорологических условий на всех этапах строительства и эксплуатации ПЭС необходимо проводить комплекс метеорологических и гидрологических наблюдений. Для этого соответствующие измерения нужно проводить на всех станциях отбора проб во время инженерно-экологических изысканий. Также следует установить в губе как минимум одну автономную буйковую станцию (АБС) для круглогодичного мониторинга гидрометеорологических условий в губе. Минимальный набор измеряемых АБС параметров должен включать следующие характеристики: температура, соленость воды, содержание растворённого кислорода, мутность, скорость и направление течений на нескольких горизонтах (0, 2, 5, 50 м, дно), колебания уровня воды в губе, температура и влажность воздуха,

скорость и направление ветра, количество осадков [25]. Кроме этого, аналогичные датчики следует установить на плотине ПЭС.

Авторы выражают благодарность Е.А. Гарбулю и А.А. Шумилову за помощь в проведении площадной съемки губы Долгой весной 2009 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоция Баренцева моря. Ч. II: От реки Ворьема до пролива Карские Ворота и Западные берега островов Новая Земля / ГУНиО МО. СПб., 2006. 496 с. **2.** Прогнозируемые экологические и социально-экологические последствия строительства Северной и Мезенской ПЭС / *В.Н. Безносов и др.* // Малая энергетика. 2008. № 4. С. 62–70. **3.** Северная приливная электростанция / *Ю.Б. Шполянский и др.* // Малая энергетика. 2011. № 1–2. С. 10–26. **4.** *Моисеев Д.В., Громов М.С.* Гидрометеорологические условия в губе Долгая летом 2008 г. и весной 2009 г. // Природа морской Арктики: современные вызовы и роль науки: тез. докл. междунар. науч. конф. (г. Мурманск, 10–12 марта 2010 г.). Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 158–160. **5.** *Демиденко Н.А.* Гидрометеорологические условия района Северной ПВЭС в губе Долгая Баренцева моря // Малая энергетика. 2011. № 1–2. С. 39–54. **6.** Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1: Баренцево море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 280 с. **7.** *Денисов В.В.* Циркуляция вод Баренцева моря как реакция на перемещающиеся циклоны // Проблемы Арктики и Антарктики. Л.: Гидрометеоздат, 1985. Вып. 61. С. 36–42. **8.** Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 6: Баренцево море. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. Вып. 1, 2. 263 с. **9.** *Денисов В.В., Потанин В.А., Турчанинов В.И.* Численное моделирование приливов Баренцева моря // Тр. ААНИИ. 1987. Т. 410. С. 7–19. **10.** Жизнь и условия ее существования в пелагиали Баренцева моря / под ред. *Г.Г. Матишова*. Апатиты: ММБИ АН СССР, 1985. 220 с. **11.** *Ожигин В.К., Ившин В.А.* Водные массы Баренцева моря. Мурманск: ПИНРО, 1999. 48 с. **12.** Климатические изменения морских экосистем Европейской Арктики / *Г.Г. Матишов, С.Л. Дженюк, Д.В. Моисеев, А.П. Жичкин* // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 7–21. **13.** *Matishov G.G., Matishov D.G., Moiseev D.V.* Inflow of Atlantic – Origin waters to the Barents Sea along glacial troughs // Oceanologia. 2009. Vol. 51, № 3. P. 321–340. **14.** *Моисеев Д.В., Жичкин А.П.* Термохалинные условия на Западном Мурмане в марте 2007 г. // Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики: материалы междунар. науч. конф. (Мурманск, 9–11 ноября 2008 г.). М.: ГЕОС, 2008. Вып. 8. С. 257–260. **15.** *Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 296 с. **16.** *Федоров К.Н., Гинзбург А.И.* Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с. **17.** *Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л., 1980. 269 с. **18.** Атлас облаков. СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. 249 с. **19.** *Бауман. И.А.* Синоптическая метеорология для океанологов. Л.: ЛГИ, 1983. 228 с. **20.** Методические указания по производству океанологических работ на судах Запрыбпромразведки. Калининград, 1977. 203 с. **21.** Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. **22.** Учет специфики термохалинных градиентов при СТД-профилировании моря / *Г.Г. Матишов, Д.Г. Матишов, Д.В. Моисеев, В.В. Кулыгин* // Вестник Южного научного центра РАН. 2008. Т. 4, № 2. С. 34–45. **23.** SBE 19plus SEACAT PROFILER: User Manual, Version 012. Bellevue, Washington, 2005. **24.** *Семенов В.Н.* Изменения экосистемы под влиянием Кислогубской приливной электростанции на побережье Баренцева моря // Современное состояние и перспективы исследований экосистем Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых: тез. докл. междунар. конф. Мурманск, 1995. С. 84–86. **25.** *Моисеев Д.В., Громов М.С.* Дистанционный гидрометеорологический мониторинг прибрежья Баренцева моря // 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. 160–161.

Сведения об авторах

Моисеев Денис Витальевич – к.г.н., зам. директора по науке Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: Denis_Moiseev@mmbi.info

Громов Михаил Станиславович – научный сотрудник лаборатории океанографии и радиоэкологии Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: gromov@mmbi.info

УДК 597.5:591.9 (268.45)

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И НЕКОТОРЫЕ ЧЕРТЫ БИОЛОГИИ ЧЕРНОБРЮХОГО ЛИПАРИСА *LIPARIS* CF. *FABRICII* KRØYER, 1847 В КАРСКОМ МОРЕ

Е.В. Смирнова, О.В. Карамушко
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Рассматриваются основные факторы среды, влияющие на пространственное распределение чернобрюхого липариса в Карском море. Установлено, что данный вид встречался на глубинах от 17 до 414 м, при температуре от -1.91 до 0 °С. Предпочитает илистые и песчано-илистые с глиной грунты. В Карском море отмечены особи длиной от 3.9 до 18.8 см, большинство из них самки. Некоторые были со зрелой икрой (8.33 %), а незначительное количество (3.33 %) с текучими половыми продуктами.

Ключевые слова:

чернобрюхий липарис, пространственное распределение, размерный состав, Карское море.

Причинно-следственные связи между распределением различных видов рыб внутри ареалов и параметрами окружающей среды позволяют выявить наиболее благоприятные для обитания биотопы, а также получить данные для прогнозирования возможных изменений в рыбной части сообществ при климатических колебаниях и антропогенной активности на шельфе арктических морей. Поиск взаимосвязей основан на анализе основных абиотических факторов, влияющих на пространственное распределение вида (температура, глубина, соленость, тип грунта), что позволит определить их приоритетную значимость. Для этих целей необходимы достаточно многочисленные, не совершающие миграций и распространенные арктические виды, чей жизненный цикл проходит в относительно устойчивых стенобионтных условиях, незначительное изменение которых может оказать влияние на их распространение. С точки зрения авторов настоящей статьи, один из таких видов – чернобрюхий липарис *Liparis* cf. *fabricii* Krøyer, 1847, обитающий именно в Карском море, разнообразные биотопы которого в результате глобальных процессов и разработки углеводородных месторождений могут измениться в первую очередь.

Материал и методы

Данные о распространении чернобрюхого липариса в Карском море получены в экспедициях ММБИ в 1981 г. [1], 2000 г. и 2012 г., а также дополнены литературными сведениями [2, 3–5]. Независимо от периода сбора материала траления осуществляли с НИС «Дальние Зеленцы» донным тралом, который был оснащен мелкоячейной вставкой с размером ячеи 12 мм. Поскольку размеры тралов иногда варьировали по ширине и высоте раскрытия, все уловы унифицированы (приведены в соответствие с конкретным облавливаемым объемом и площадью). Продолжительность тралений с НИС «Дальние Зеленцы» составляла 30 мин, а при использовании литературных данных их пересчитывали к такому же периоду. На большинстве обследованных станций измеряли придонную температуру, соленость,

определяли тип грунта. Из литературных сведений использовались только те, которые имели координаты лова, данные параметров среды и описание биотопов.

При построении карт-схем пространственного распределения этого вида использовали программу MapViewer 7 (Golden Software, Inc.).

Связь обилия вида с параметрами среды оценивали с помощью метода множественного регрессионного анализа, проведенного в программе STATISTICA 6.0, который позволяет определить вес вклада каждого фактора в пространственное частотное распределение какого-либо объекта исследований и получить интегральный показатель, учитывающий все включенные в анализ данные [6].

Результаты и обсуждение

Факторный анализ местообитаний. Чернобрюхий липарис обитает в морях Северного Ледовитого океана повсеместно, а в Карском море – это один из наиболее часто встречающихся видов рыб [2, 4, 7] (рис. 1). В 2012 г. на обследованных станциях в Карском море частота встречаемости этого вида достигала 50.0 %, доля в уловах составила 9.4 % от общей массы выловленных рыб.

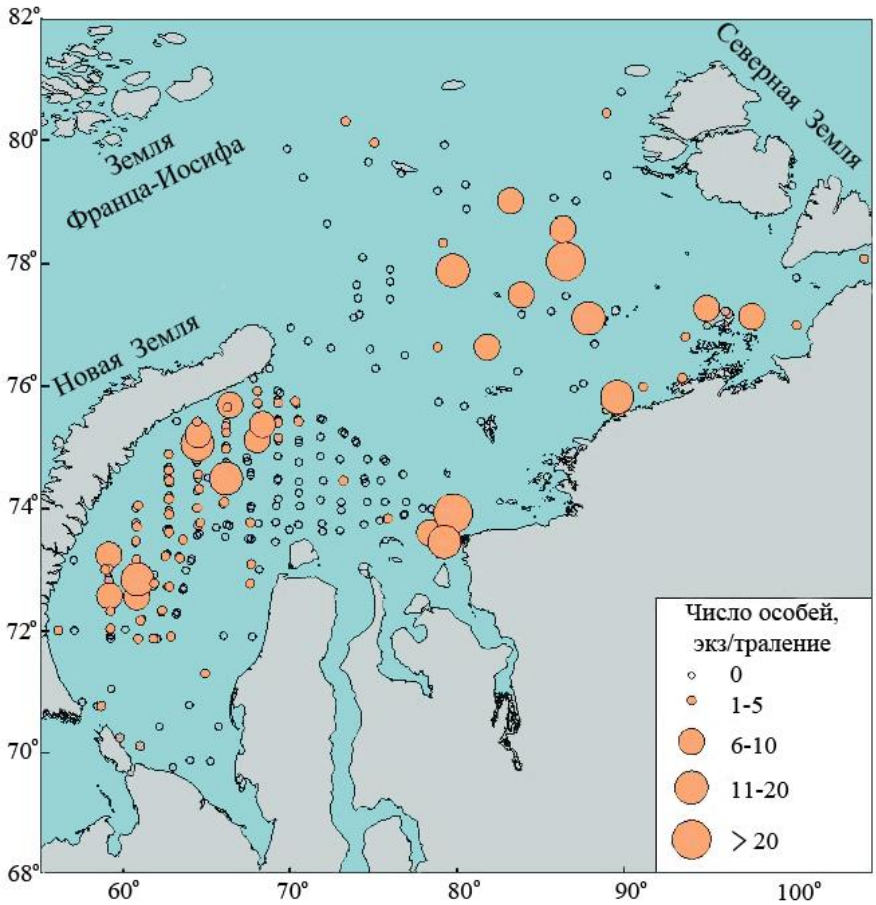


Рис. 1. Карта-схема распределения чернобрюхого липариса в Карском море по результатам экспедиционных исследований и литературным данным

По степени связи с дном и пелагиалью чернобрюхий липарис является придонным видом [2, 8]. По имеющимся сведениям, данный вид встречается в глубоких желобах и в целом, в Арктике может обитать на глубинах до 1800 м [2, 7]. В период наших экспедиционных исследований батиметрический диапазон обитания чернобрюхого липариса составлял от 17

до 414 м, но в Карском море он может встречаться на глубинах до 628 м [4, 8]. Таким образом, чернобрюхий липарис обитает практически во всем диапазоне имеющихся в Карском море глубин. И если на глубинах менее 50 м его численность минимальна, то в районах, превышающих такую глубину, вид достаточно многочислен, а наибольшее количество рыб отмечено на глубинах от 50 до 400 м (рис. 2).

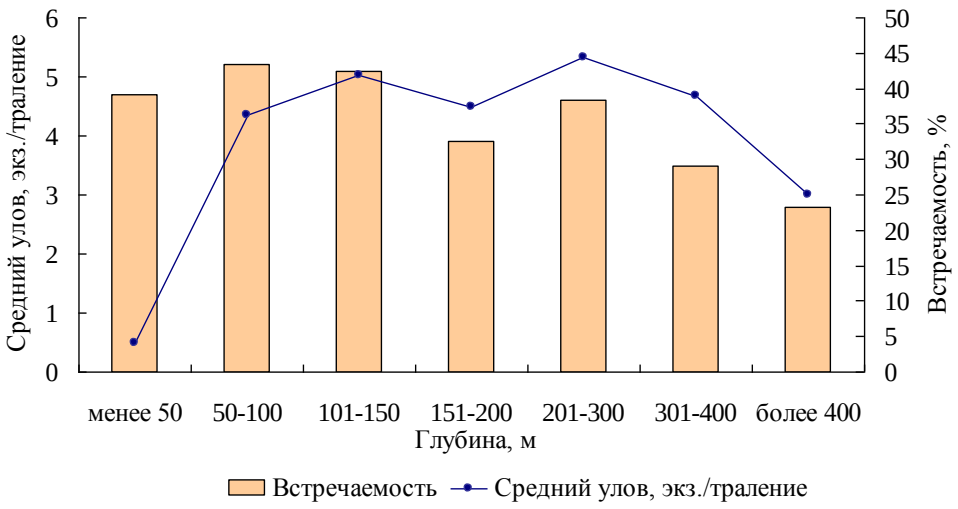


Рис. 2. Батиметрическое распределение чернобрюхого липариса в Карском море

Как известно, чернобрюхий липарис – арктический вид, обитающий при температурах от -1.9 до 2.3 °С [2, 8], но в Карском море встречался преимущественно при отрицательных температурах [1, 3–5, 7]. По нашим данным, придонная температура водных масс в местах отлова чернобрюхого липариса варьировала от -1.91 до 0 °С, а наиболее многочисленным он был при температуре от -1.0 до -0.5 °С, хотя более высокая встречаемость приурочена к более низким температурам (рис. 3).

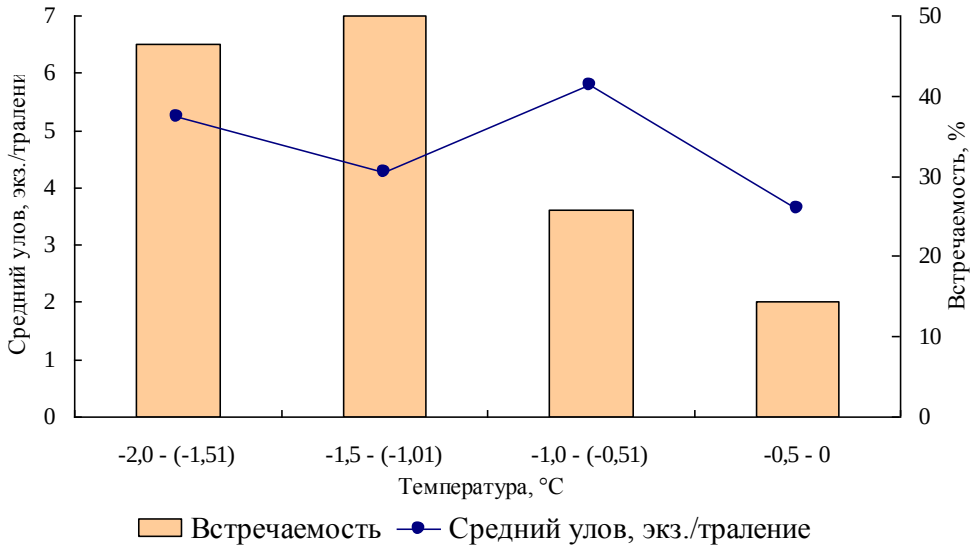


Рис. 3. Распределение чернобрюхого липариса в Карском море в зависимости от температуры придонных водных масс

Поскольку чернобрюхий липарис – придонный вид, не совершающий длительных миграций, можно предположить наличие его избирательности в отношении определенных типов грунта. Данных, указывающих на приуроченность чернобрюхого липариса к таким характеристикам биотопов, крайне мало. В большинстве случаев отмечено, что этот вид встречался на илистых грунтах, изредка на песчано-илистых, а также приведены сведения о поимке рыб на грунтах других типов [2, 4]. Основываясь на информации о типах грунтов в местах поимок чернобрюхого липариса, все соответствующие данные разделены нами на 6 групп. Установлено, что наибольшее количество особей отмечено в районах, характеризующихся наличием песчаных илов с глиной (рис. 4).

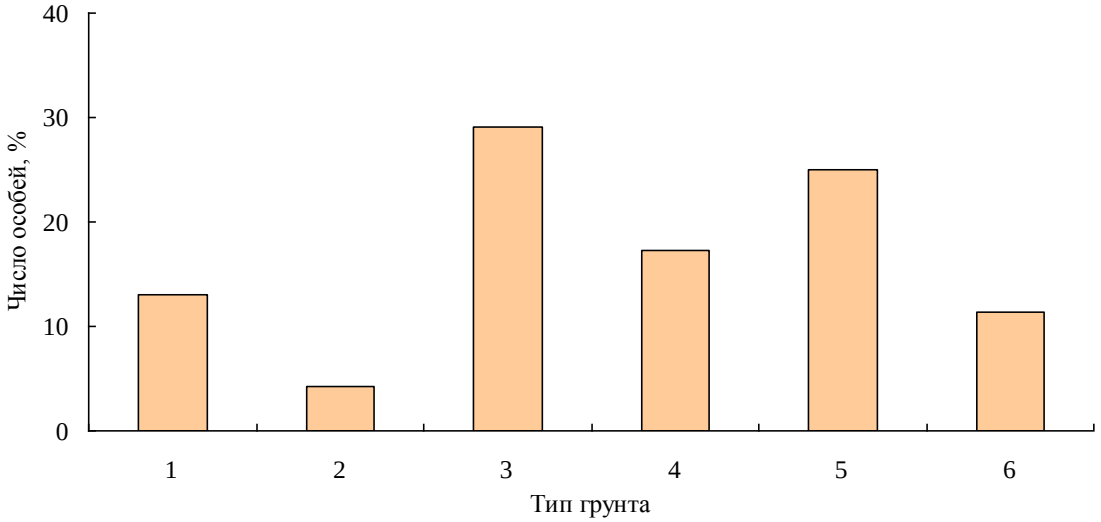


Рис. 4. Встречаемость чернобрюхого липариса на грунтах разного типа:
1 – песок; 2 – илистый песок; 3 – песчаный ил с глиной; 4 – песчанистый ил;
5 – ил; 6 – коричневый ил с глиной

В Карском море чернобрюхий липарис обитает в водах с соленостью от 24.4 ‰ до океанической [3, 8], а в периоды наших наблюдений этот диапазон был немного уже и составлял 29.47–35.18 ‰.

Таким образом, учитывая вышеизложенные характеристики среды обитания чернобрюхого липариса, мы попытались получить количественную оценку связи обилия вида и рассматриваемых параметров с помощью метода множественного регрессионного анализа, где представление об индивидуальном вкладе каждого фактора дают частные корреляции, предполагающие равенство прочих условий (табл. 1). В результате анализа установлено, что в пределах акватории со сходной температурой придонных водных масс более значимы другие факторы, влияющие на распределение вида, основным из которых оказалась соленость.

Другими словами, на данном этапе существования экосистемы Карского моря с высокой долей вероятности можно предположить, что температурный фактор не оказывает лимитирующего влияния на жизнедеятельность и распространение такого арктического вида рыб, как чернобрюхий липарис. Также следует отметить, что хотя рассчитанные параметры и указывают на некоторое влияние солености в количественном распределении вида, но для окончательных выводов, основанных на факторном анализе местообитаний, необходимы дополнительные данные из прибрежных и северо-восточных районов Карского моря.

Некоторые черты биологии чернобрюхого липариса в Карском море. На основании экспедиционных материалов и литературных данных нами также проанализирован размерный состав чернобрюхого липариса (всего 210 особей). За весь период наблюдений в Карском море

встречались рыбы от 3.9 до 18.8 см, хотя в Баренцевом море максимальные размеры несколько больше – 21 см [9]. В целом, размерный ряд чернобрюхого липариса имеет нормальное распределение за исключением левой части (рис. 5), что может быть связано с относительно большим количеством станций, выполненных на мелководьях, где встречаются в основном мелкие представители вида. Средняя длина для чернобрюхого липариса в Карском море в 2012 г. составила 10.34±2.38 см.

Таблица 1

Коэффициенты регрессионного анализа связи параметров окружающей среды и обилия чернобрюхого липариса (число особей на станции)

Параметры	Коэффициенты		*p*
	P	*B*	
Глубина	0.036	0.038	0.770
Температура	–0.184	–0.187	0.132
Тип грунта	–0.193	–0.199	0.115
Соленость	**–0.266**	**–0.278**	**0.028**

Примечание. P – коэффициент частной корреляции для факторов, вносящих вклад в результат пошаговой множественной регрессии; *B* – регрессионный коэффициент, определяющий вклад каждой независимой переменной в предсказание зависимой переменной; *p* – статистическая значимость результата.

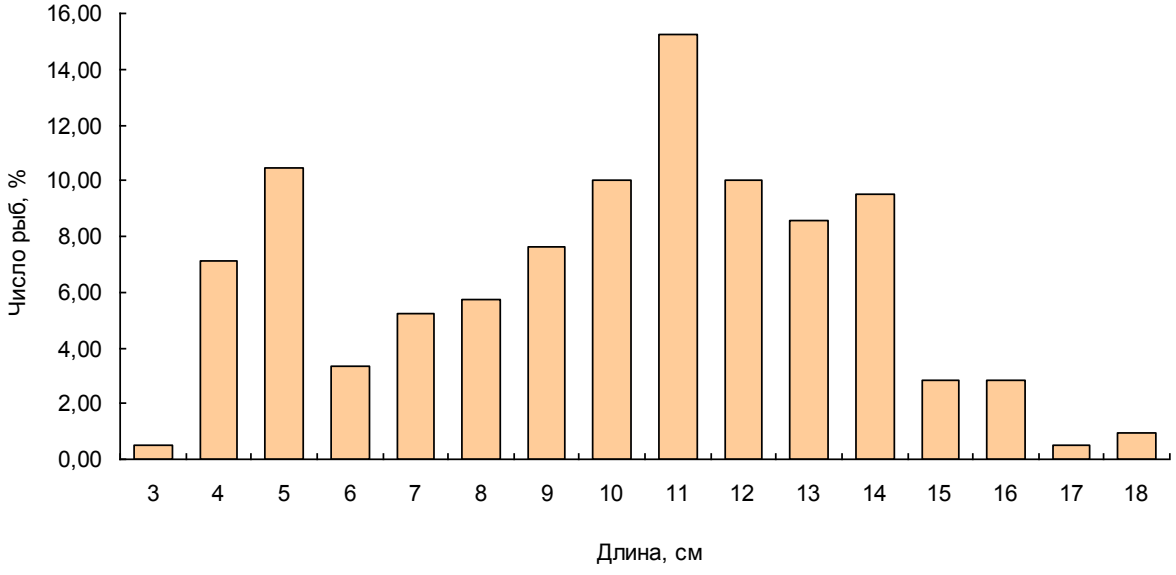


Рис. 5. Размерный состав чернобрюхого липариса в Карском море

Длина самцов чернобрюхого липариса в Карском море в 2012 г. варьировала от 10.5 до 18.8 см, а самок – в пределах 7.9–16.0 см. Соответственно, и масса особей разного пола существенно различалась (табл. 2).

Соотношение между линейными размерами и массой чернобрюхого липариса, аппроксимированное степенной функцией, показало, что у самок наблюдалась небольшая положительная аллометрия ($b > 3$), когда прирост массы больше, чем длины (рис. 6). У самцов

же процессы роста имели обратную тенденцию ($b < 3$), что указывает на более высокий темп линейного роста.

Таблица 2

Размерно-массовые характеристики самцов и самок чернобрюхого липариса в Карском море (*M* – среднее значение, lim – пределы колебаний)

Самцы				Самки			
Длина, см		Масса, г		Длина, см		Масса, г	
lim	*M*	lim	*M*	lim	*M*	lim	*M*
10.5–18.8	143.12±0.25	18.0–94.0	43.55±2.44	7.9–16.0	11.62±0.17	6.3 – 48.0	23.54±1.11

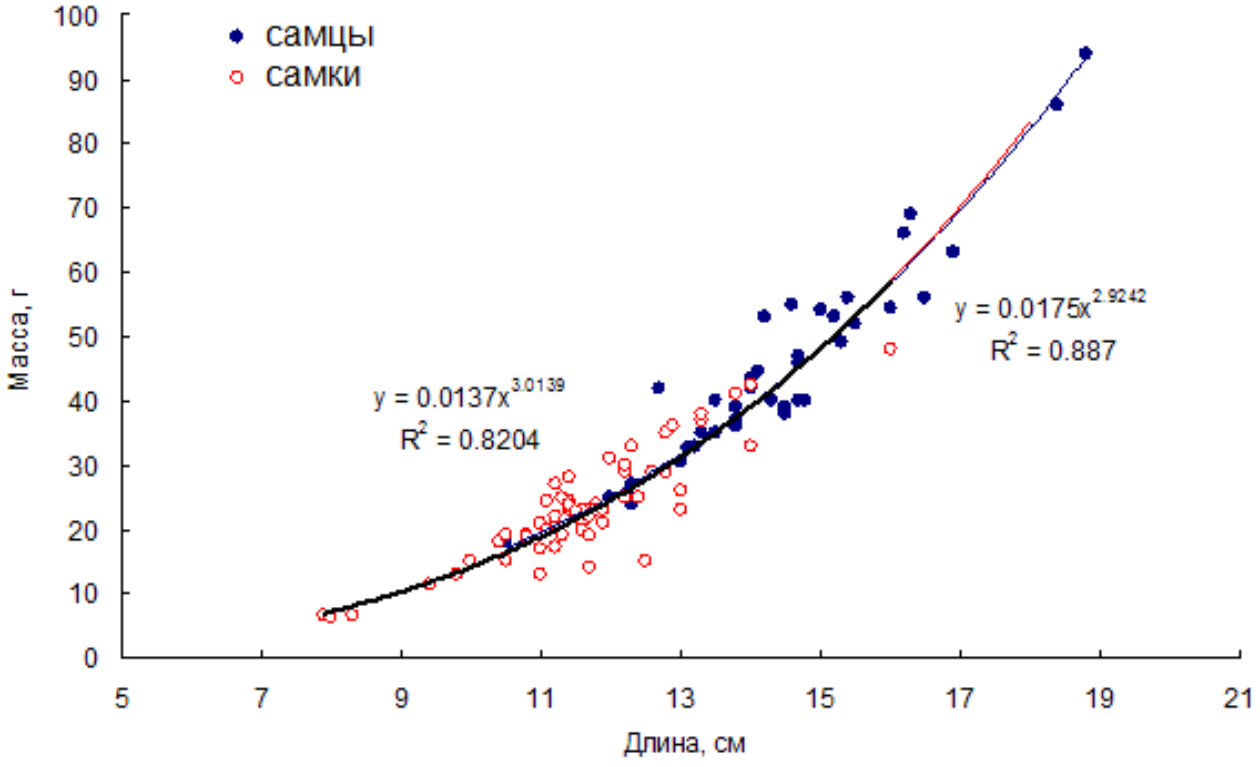


Рис. 6. Зависимость между массой и длиной тела у самцов и самок чернобрюхого липариса в Карском море в осенний период 2012 г.

Чернобрюхий липарис – планктофаг и основу его питания в Карском море составляют гипериды и крылоногие моллюски [10]. По результатам анализа питания в осенний период 2012 г. большинство особей питались гипериидами. В желудках обнаружены также амфиподы и части полихет, относящихся к сем. Sabellidae.

Таким образом, представленные в работе материалы дают определенное представление о закономерностях пространственного распределения чернобрюхого липариса *Liparis* cf. *fabricii* Krøyer, 1847 в Карском море и дополняют имеющиеся данные по биологии вида.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь в сборе и обработке материала к.б.н. Наталье Владимировне Черновой (Зоологический институт РАН) и Евгению Владимировну Расхожеву (ММБИ КНЦ РАН).

ЛИТЕРАТУРА
1. *Астафьева А.В. Антонов С.Г., Петров А.А.* Траловые работы в Карском море // Особенности биологии рыб северных морей: сб. науч. тр. / ММБИ КФАН СССР. Л.: Наука, 1983. С. 3–12. **2.** *Андрияшев А.П.* Рыбы северных морей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 556 с. **3.** *Есипов В.К.* О рыбах, собранных экспедицией на л/п «Садко» в 1935 г. Зоол. журн. 1939. Т. 18, вып. 5. С. 877–887. **4.** *Есипов В.К.* Рыбы Карского моря. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 146 с. **5.** *Солдатов В.К.* Материалы по ихтиофауне Карского и восточной части Баренцева морей по сборам экспедиции Института в 1921 г. // Тр. Плавучего морского научн. ин-та. 1923. Вып. 3. С. 5–79. **6.** *Ефимов В.М., Ковалева В.Ю.* Многомерный анализ биологических данных. 2008. 85 с. **7.** *Боркин И.В., Васильев А.В., Четыркина О.Ю.* Ихтиофауна // Экосистема Карского моря. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2008. С. 179–181. **8.** *Чернова Н.В.* Липаровые рыбы евро-азиатской Арктики. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1991. 112 с. **9.** Atlas of the Barents Sea Fishes / *R. Wienerroither et al.* Murmansk, Bergen: IMR, PINRO, 2011. №1. 272 p. **10.** *Долгов А.В., Бензик А.Н., Четыркина О.Ю.* Новые данные по питанию непромысловых рыб в Карском море // Глобальные климатические процессы и их влияние на экосистемы антарктических и арктических регионов: тез. докл. междунар. науч. конф. / ММБИ КНЦ РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2011. С. 53–54.

Сведения об авторах

Смирнова Елена Владимировна – м.н.с. лаборатории ихтиологии и физиологии рыб Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: smirnova@mmbi.info
Карамушко Олег Владимирович – к.б.н., зав. лаборатории ихтиологии и физиологии рыб Мурманского морского биологического института КНЦ РАН; e-mail: karamushko_o@mmbi.info

УДК 581.132

СУТОЧНЫЕ РИТМЫ ФОТОСИНТЕЗА И ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ

П.А. Кашулин, Н.В. Калачёва
Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН

Аннотация

Методами импульсной флуоресцентной спектроскопии проведен мониторинг фотосинтетической активности листопадных древесных пород и культурных кустарников на Кольском Севере в августе – октябре 2014 г. Обнаружено, что квантовый выход флуоресценции хлорофилла характеризуется суточной цикличностью и зависит от внешней среды. *Salix caprea*, *Lonicera edulis*, *L. tatarica*, *Syringa josikaea* при высокой регулярности циклов более толерантны к низкой температуре, солнечной и УФ-радиации, чем *Betula pendula.* Предположена связь механизмов суточной цикличности и холодоустойчивости.

Ключевые слова:

субарктический, холодоустойчивость, цикличность, листопадное растение, фотосинтез, флуоресценция хлорофилла.

Введение

Устойчивый многолетний рост концентрации диоксида углерода в биосфере делает актуальным изучение особенностей его ассимиляции в новых, быстро меняющихся экологических условиях. Потенциальная угроза крупномасштабных климатических изменений стимулирует поиск путей управления процессом фотохимической конверсии и разработку способов повышения её эффективности. Недавно обнаруженное увеличение амплитуд сезонных флуктуаций диоксида углерода в Северном полушарии, обусловленных интенсификацией продуктивности культурных растений, подсказывает возможные пути стабилизации его концентрации [1]. Это подтверждает принципиальную важность продолжительных мониторинговых наблюдений состава атмосферы и физиологического состояния живых, растительных стабилизаторов её газового состава.

В работе представлены результаты мониторинга фотосинтетической активности бореальных лесообразующих видов и некоторых культурных листопадных кустарников в Кольской Субарктике с августа по октябрь 2014 г. В указанный период осуществлялась ежедневная оптическая регистрация основных флуоресцентных параметров хлорофилла ассимиляционных органов индикаторных образцов листопадных культурных и дикорастущих древесных пород, произрастающих в лесопарковой зоне южного предгорья Хибинского горного массива. На основе измерений проведена сравнительная оценка эффективности фотосинтеза, надежности фотозащитных систем и фотосинтетического аппарата (ФСА) при акклимации объектов наблюдения к изменениям световых условий среды и осенним похолоданиям. Хлорофилл – основной хромофор ФСА, участвующий в улавливании фотонов, а также в регуляции перераспределения энергии возбуждения реакционных центров между фотохимической конверсией, формированием редокс-потенциала и протонного градиента на мембранах тилакоидов. Хотя хлорофилл выполняет эти задачи с высокой эффективностью, малая доля поглощенных фотонов высвечивается в виде красной флуоресценции. Флуоресценция зависит от метаболической активности, физиологического состояния растения

и позволяет контролировать его светозависимую энергетику в полевых условиях, путем измерения флуоресценции интактных листовых пластинок [2], хвои [3] или коры однолетних побегов [4].

Возможности фотосинтеза бореальных растений ограничены трендами сезонных температур, зависят от уровня фотосинтетически активной радиации (ФАР) и коротковолновых компонент спектра, включая ультрафиолет [5]. В свою очередь, восприимчивость и реакции растения зависят от его наследственности, способности к адаптации и акклимации, физиологического состояния и возраста. Поэтому параллельно измеряли локальную ФАР и УФ-радиацию в непосредственной близости от листовых пластинок.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов были использованы образцы индикаторных древесных пород разного возраста, представляющих аборигенные листопадные виды: ива *Salix caprea* L., осина *Populus tremula* L., берёза *Betula pendula* Roth – и окультуренные кустарники, интродуцированные на Кольский Север: жимолость съедобная *Lonicera edulis* Turcz. Ex Freyn., жимолость татарская *L. tatarica* L., сирень венгерская *Syringa josikaea* Jacq. fil.

Физиологическую активность ФСА листовых пластинок определяли *in situ,* измеряя их собственную или искусственно активированную светодиодами импульсно-модулированную флуоресценцию. Анализировали её долю, контролируемую фотосистемой II (ФС II):

$$Y(\mathrm{II}) = \frac{F_v^{'}}{F_m^{'}},$$

где $F_v^{'} = F_m^{'} - F_0^{'}$ – переменная, $F_0^{'}$ – минимальная и $F_m^{'}$ – максимальная флуоресценция хлорофилла в условиях активирующего освещения, то есть амплитуда максимального флуоресцентного выхода предварительно освещенного образца. Параметр Y(II) отражает долю энергии возбужденных реакционных центров, израсходованную на фотохимическую конверсию, которая близка к среднему квантовому выходу фотосинтеза и зависит от световых условий среды, поэтому используют также параметр F_v/F_m, измеряемый после темновой адаптации растения [6, 7]. Для расчета F_v и F_m использовали результаты вечерних измерений, на их основе находили *NPQ* – долю поглощенной световой энергии, утилизируемую в регулируемых, нефотохимических путях по формуле [8]

$$NPQ = \frac{F_m - F_m^{'}}{F_m^{'}}.$$

Измерения проводили в полевых условиях с помощью портативного флуориметра PAM-2100, «WALZ, Effetrich», Германия. В качестве источника активирующего света использовали светодиод, излучающий импульсы красного света с длиной волны 655 нм, интенсивностью около 3000 мкЕ/м^2·с$^{-1}$ длительностью 800 мс, подаваемый при включенном активирующем свете 250 мкЕ/м^2·с$^{-1}$. Интенсивность измеряющего импульсного света частотой 0.6 или 20 кГц не превышала 5 мкЕ/м^2·с$^{-1}$. Неинвазивность метода и пассивный характер сбора данных обеспечивали непрерывное получение информации о текущем состоянии ФСА одних и тех же листовых пластинок на протяжении наблюдений, вплоть до их опадения. Параллельно измеряли интенсивности ФАР и УФ-радиации, температуру с помощью полевого анализатора ТКА-ПКМ в непосредственной близости к листовой пластинке. Измерения проводили ежесуточно или с более высокой частотой сбора данных. Для измерения суточного ритма флуоресцентных характеристик использовали деревья и листья с затененной кроной, в этих же условиях проводили измерение ФАР и УФ-радиации. У открытых для солнечной экспозиции растений измерения проводили в вечерние часы.

Результаты и обсуждение

В результате измерений выявлена многодневная динамика изменений фотосинтетической активности разных видов в августе – октябре 2014 г. Различия между видами заключались в абсолютных значениях *Y*(II), в специфике убывания параметра при осенних похолоданиях, особенностях реакции растений на внешние условия и в сроках жизнеспособности листьев. На рис. 1 показаны временные ряды изменений флуоресценции листьев берёзы и ивы в августе и сентябре вплоть до опадения индикаторных листьев берёзы 14–17 сентября. У ивы на тот момент не наблюдалось признаков снижения общего тренда фотосинтетической активности, который сохранялся вплоть до второй недели октября. У березы зафиксированы более высокие значения в начале августа, но в целом она оказалась менее устойчивой, пониженная толерантность к резким снижениям температуры, флуктуациям ФАР и УФ-радиации привели к быстрому угасанию её фотосинтеза в начале сентября.

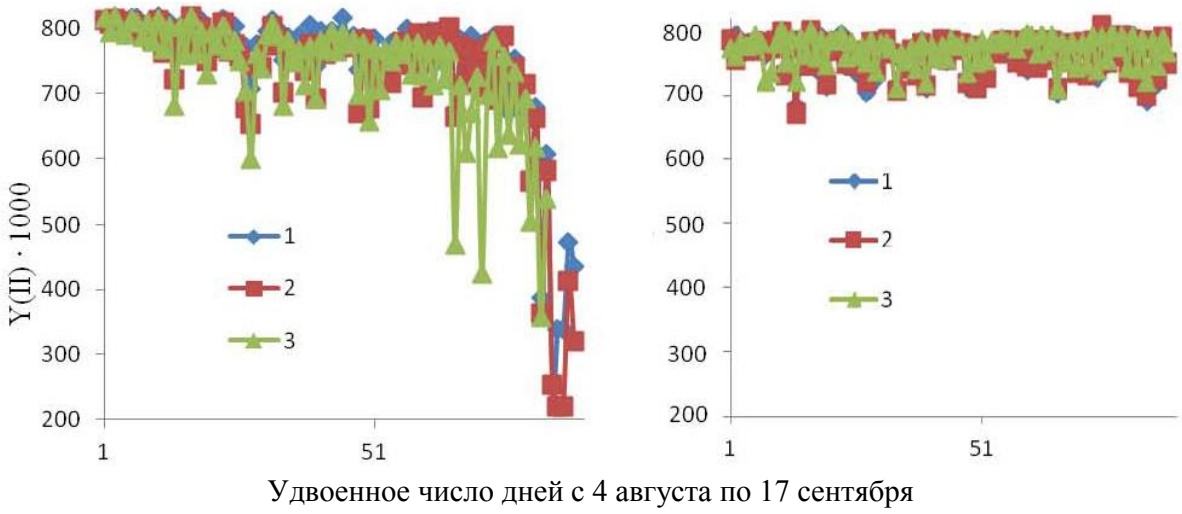


Рис. 1. Динамика флуоресценции хлорофилла для 3 разных листьев берёзы (слева) и ивы (справа), с номерами 1, 2, 3 соответственно в период с 4 августа по 17 сентября 2014 г. Показаны чередующиеся полуденные и вечерние ежедневные измерения

В результате ежесуточных дневных/вечерних измерений выявлена суточная цикличность *Y*(II), а значит, и квантового выхода фотосинтеза и доли, поглощаемой листом световой энергии, используемой для фотохимической конверсии. Чем больше *Y*(II), тем выше эффективность фиксации CO_2 и образования высокомолекулярных ассимилянтов в сопряженных биохимических циклах. В южных и умеренных широтах в полдень обычна полуденная депрессия фотосинтеза, зависящая от световой толерантности вида растения, в вечерние часы фотосинтез усиливается. Подобную периодичность наблюдали применительно к квантовому выходу флуоресценции ФС II субарктических видов. На рис. 2 и 3 показана многодневная динамика берёзы и ивы в августе при более высоком временном разрешении. Для листьев ивы и берёзы характерна цикличность суточного ритма фотохимической конверсии, вечерние значения *Y*(II), как правило, превышали полуденные. Цикличность оказалась устойчивой к температурным изменениям, но робастность её циклов менялась у разных видов и зависела от возраста дерева. Для количественной оценки робастности использовали высоту первых пиков разложения временного ряда значений Y(II) в ряд Фурье. Для молодых деревьев берёзы и ивы самые высокие пики для записи этого параметра с 4 августа по 10 сентября находились на частотах 0.5 сутки$^{-1}$ и составили 41 и 42.3 тыс. циклов соответственно.

Таким образом, суточная цикличность ивы в целом оказалась более устойчивой к неблагоприятным факторам окружающей среды, чем у берёзы. Для обоих видов цикличность зависела от расположения листа в кроне. Более высокая стабильность ритма и длительность пребывания листа на дереве характерна для апикальной части ветви. По мере роста пластохрона листа возрастала хаотичность многодневной динамики Y(II), а время пребывания на дереве убывало. Это связано с изменением гормонального статуса листовых пластинок по мере удаления от апекса. Низкая толерантность к неблагоприятному воздействию листа № 3 наблюдаемой берёзы вызвала наиболее сильные флуктуирующие падения его флуоресценции, ускоренное старение и первоочередной отрыв от материнского дерева 14 сентября (рис. 1). В этот же период для всех наблюдаемых листьев ивы не обнаружены какие-либо признаки снижения общего уровня фотохимической конверсии, а воздействие среды вызвало её незначительные флуктуации.

Зафиксированные нарушения ритма были обусловлены комплексным стрессовым воздействием, включающим флуктуации ультрафиолета, которым предшествовали резкие перепады температур. Флуктуации УФ-радиации зарегистрированы нами 17–18 августа, мощность ее потока в затененных условиях древесной кроны в вечерние часы составляла 9800 мВт/м^2 после внезапного и сильного похолодания в середине августа. Это вызвало сбой суточной цикличности фотосинтеза берёзы с 17 по 20 августа и одиночное изменение ритма ивы 19 числа (рис. 2, 3). Нарушения суточного ритма берёзы и ивы наблюдали также 29–31 августа и в сентябре (рис. 1–3).

Атмосферные события этих дней повлияли также на индексы флуоресценции хлорофилла старовозрастной берёзы и осины, но не снизили эффективность ФСА культурных интродуцированных кустарников. Жимолость татарская, жимолость съедобная, сирень венгерская оказались устойчивы к воздействию. Это обусловлено наследственно закрепленной адаптацией интродуцентов к более высокому уровню внешней УФ-радиации в условиях их естественного, более южного ареала.

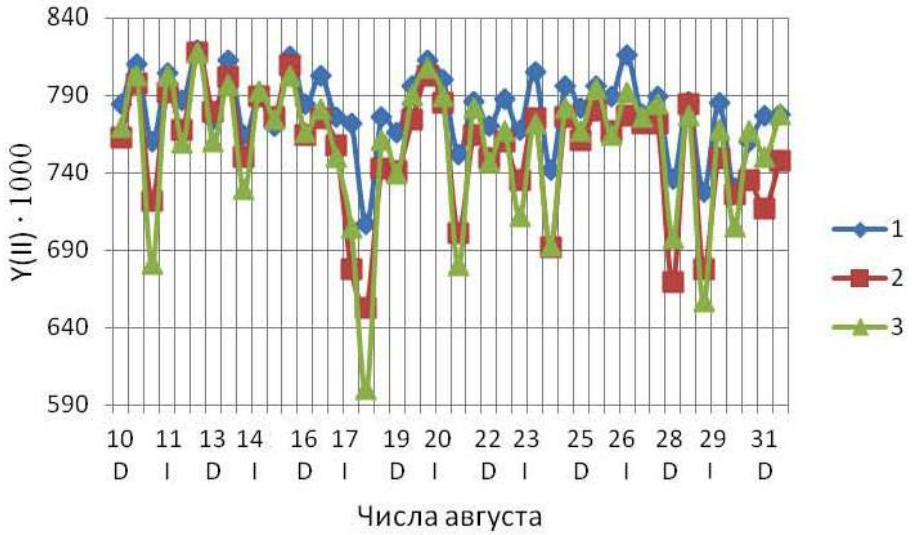


Рис. 2. Суточная цикличность флуоресценции хлорофилла для 3 листьев растения берёзы с номерами 1, 2, 3 в период с 10 по 31 августа, 2014 г. Показаны дневные (D) и вечерние (I) ежедневные измерения

Эта закономерность подтверждена и при сравнении холодостойкости разных видов. Отличающиеся более высокой робастностью ритма ива и черёмуха сохраняли листовые

функционально активные листовые пластинки вплоть до второй недели октября и до 16 октября соответственно, а наблюдаемое дерево берёзы утратило всю листву 18 сентября.

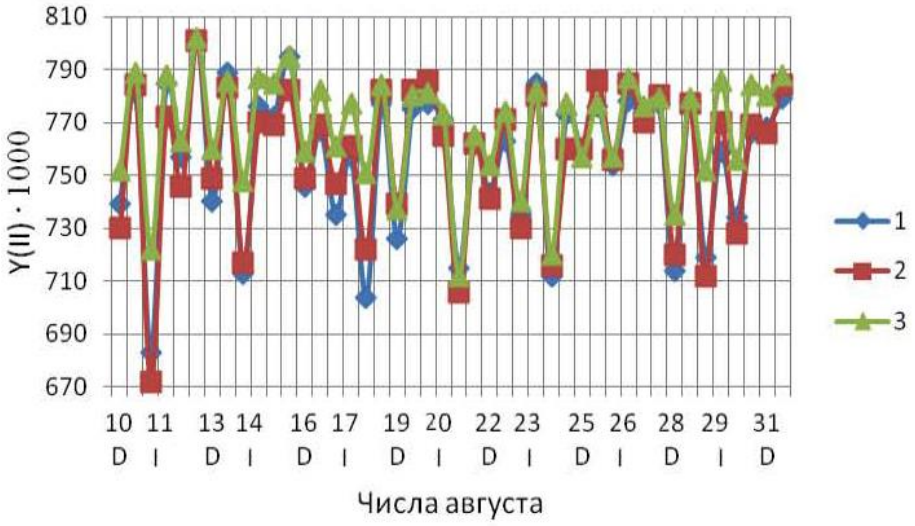


Рис. 3. Суточная цикличность флуоресценции хлорофилла для 3 листьев ивы с номерами 1, 2, 3 в период с 10 по 31 августа 2014 г. Показаны дневные (D) и вечерние (I) ежедневные измерения

Культурные формы декоративных кустарников обнаружили высокую устойчивость к УФ-радиации, интенсивные флуктуации 18, 29–30 августа и 21–23 сентября не нарушили их циркадного ритма и не снижали тренда *Y*(II). Хлорофилл не показывал признаков деструкции до начала октября, его флуоресценция оставалась в рамках физиологической нормы, характерной для нормальных летних условий. Значительные, но обратимые снижения тренда наблюдали после ночных заморозков 10 и 13 октября (рис. 4).

Низкие температуры при ясном небе в эти дни резко активировали нефотохимические физиолого-биохимические пути ФСА растений, отражаемые динамикой *NPQ*. Увеличение *NPQ* свидетельствует о стимуляции тепловой диссипации энергии возбуждения в антенных комплексах [8]. Что может обеспечить локальное демпфирование негативных последствий низких температур. Кратковременные экстремальные воздействия на ФСА носили обратимый характер, последующие устойчивые похолодания с 15 октября привели к монотонному росту и снижению фотохимической конверсии вплоть до её остановки. Тем не менее, суточная ритмичность *Y*(II) жимолости съедобной, жимолости татарской и сирени венгерской сохранялась до последней декады октября, когда сильные ночные заморозки вызвали общее резкое падение его тренда.

Биологические ритмы – системная характеристика физиологической активности живых организмов, опосредующая их связь с окружающей средой. Важная особенность физиолого-биохимических механизмов, контролирующих эндогенные околосуточные ритмы самых разных эктотермных организмов, – устойчивость к температуре. Большинство биохимических процессов чувствительны к температуре, так что их скорость меняется в 2–3 раза с изменением температуры на каждые 10°, то есть Q_{10} = 2–3 [9]. В то же время, для циркадных ритмов разных видов растений Q_{10} меняется в пределах 0.8–1.4, а для растения *Arabidopsis* в 20-градусном интервале – в пределах 1.0–1.1 [10].

Результаты позволяют предполагать, что циркадианный ритм фотосинтеза обеспечивает не только оптимальные фотопериодические реакции на изменение светового дня, но и повышает общую устойчивость растения к неблагоприятным факторам среды. Физиолого-биохимические

механизмы, обеспечивающие слабую температурную зависимость суточного ритма, функционально связаны с холодоустойчивости высших растений. Робастность ритма ФАС хлоропластов способствует удлинению срока физиологической активности листовых пластинок в осеннее время, следовательно, продлению времени активной ассимиляции диоксида углерода. Устойчивость к флуктуациям УФ-радиации связана также с адаптивной способностью накапливать вторичные метаболиты. Эти соединения выполняют экранирующую функцию, проявляют антиоксидантную активность и являются биологически активными соединениями [3]. Защитные метаболиты фенольной природы химически устойчивы и выполняют важную функцию долговременного депонирования связанного углерода в окружающей среде. Для растений, например ив, обладающих набором благоприятных для окружающей среды качеств, наряду с общепринятым термином «хозяйственно ценные» оправдано использование термина «экологически ценные».

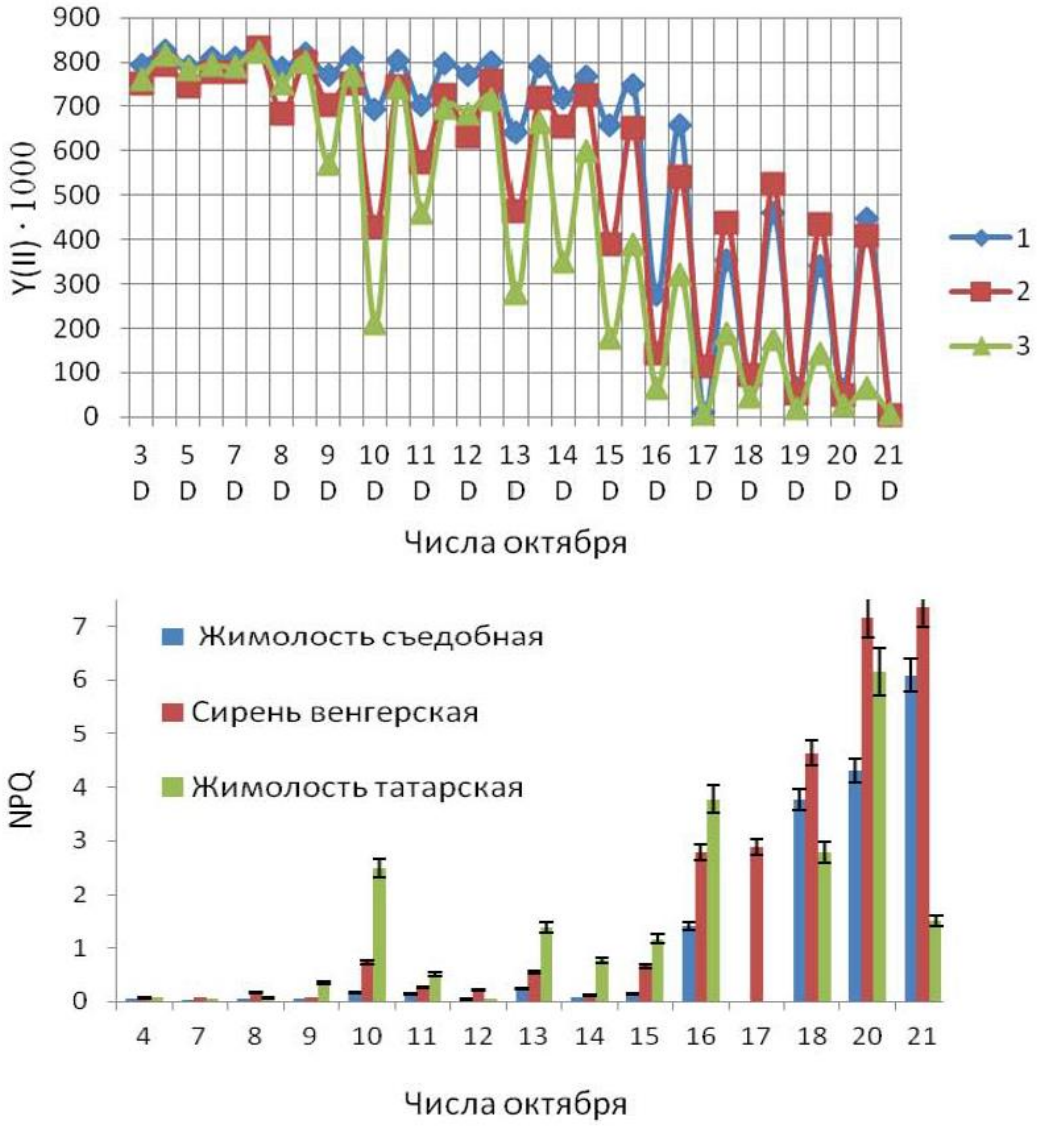


Рис. 4. Флуоресценция хлорофилла листьев жимолости съедобной (1), сирени венгерской (2), жимолости татарской (3), представлены дневные (D) и вечерние значения (вверху). Уровень нефотохимического тушения NPQ и его стандартное отклонение (внизу)

Выводы

Многодневная динамика фотосинтетической активности листопадных древесных пород и культурных кустарников на Кольском Севере при завершении сезона вегетации характеризуется суточной цикличностью, степень регулярности которой связана с устойчивостью вида к неблагоприятным влияниям среды, холодостойкостью и продолжительностью функциональной активности листьев на дереве. Ассимиляционные органы ивы *Salix caprea*, окультуренные кустарники жимолости съедобной *Lonicera edulis*, жимолости татарской *L. tatarica*, сирени венгерской *Syringa josikaea* более толерантны к низким температурам, чем у берёзы *Betula pendula*. Повышению холодостойкости способствуют своевременный сброс энергии возбуждения антенных комплексов ФСА путем тепловой диссипации энергии и активация регулируемого нефотохимического канала её утилизации, обнаруженная нами при осенних заморозках у холодостойких кустарников. Можно предположить, что молекулярные процессы в ФСА, контролирующие устойчивость фотосинтеза, и своевременная активация *NPQ* функционально связаны с физиолого-биохимическими механизмами водителя суточного ритма, активность которого имеет слабую температурную зависимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Direct human influence on atmospheric CO_2 seasonality from increased cropland productivity / *J.M. Gray et al.* // Nature. 2014. Vol. 515, No 7527. P. 398–401. **2.** Funct. Ecolol. Chlorophyll fluorescence as a probe of he photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrumentation / *H.R. Bolhar-Nordenkampf et al.* 1989. Vol. 3. P. 497–514. **3.** *Кашулин П.А., Калачева Н.В.* Возрастные изменения функций фотосинтетического аппарата сосны европейской // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. № 2 (5). С. 34–40. **4.** Изучение физиологического состояния древесных растений по характеристикам флуоресценции в коре однолетних побегов деревьев / *П.С. Венедиктов и др.* // Экология. 2000. № 5. С. 338–342. **5.** Фотохимические процессы в растениях на Севере и окружающая среда / *П.А. Кашулин, Н.В. Калачева, Н.А. Артемкина, С.А. Черноус* // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, вып. 1. С. 137–142. **6.** *Genty B., Briantais J-M., Raker N.R.* The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence // Biochim. Biophys. Acta. 1989. Vol. 990. P. 87–92. **7.** New flux parameters for the determination of QA redox state and excitation fluxes / *D.M. Kramer, J. Johnson, O. Kiirats, G.E. Edwards* // Photosynthesis Res. 2004. Vol. 79. P. 209–218. **8.** *Klughammer Ch., Schreiber U.* Complementary PS II quantum yields calculated from simple parameters measured by PAM fluorometry and the saturation pulse method // PAM Application Notes. 2008. Vol. 1. P. 27–35. **9.** A clock-work green circadian programs in photosynthetic organisms / *C.H. Johnson et al.* // Biological Rhythms and Photoperiodism in Plants. Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1998. P. 1–34. **10.** *Somers D.E.* The physiology and molecular bases of the plant circadian clock // Plant Physiology. 1999. Vol. 121. P. 9–19.

Сведения об авторах

Кашулин Пётр Александрович – д.б.н., главный научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН; e-mail: falconet1@yandex.ru

Калачёва Наталия Васильевна – младший научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН; e-mail: natty1000@yandex.ru

УДК 574.3:58.009

К ХАРАКТЕРИСТИКЕ НЕКОТОРЫХ ПРИРЕЧНЫХ ТРАВЯНЫХ БОЛОТ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

С.В. Асминг[1, 2], Н.Р. Кириллова[1]
[1]Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН
[2]Кольский филиал Петрозаводского государственного университета

Аннотация
Описаны особенности трех травяных приречных болотных сообществ в юго-восточных окрестностях г. Апатиты: флористический состав, экологические характеристики среды и др. Травяные приречные болота, находящиеся под воздействием кальцийсодержащих потоков с горы Доломитовая, высоким содержанием редких видов сосудистых растений не отличаются, но при этом имеют ресурсное и народохозяйственное значение.

Ключевые слова:
травяные болота, ресурсы, флора, Мурманская обл.

Болотные сообщества в биосфере выполняют комплекс важных функций – поддерживают газовый и гидрологический баланс, ландшафтное и биологическое разнообразие. В окрестностях г. Апатиты, как и во всей Мурманской обл., болота занимают значительную часть территории. В 2011 г. сотрудниками лаборатории популяционной биологии выделена группа травяных болот в юго-восточных окрестностях г. Апатиты [1]. Исследования по ним были включены в тему НИР «Демографические особенности ценопопуляций сосудистых растений в фитоценозах травяных болот Мурманской области», так как для изучения популяций необходимо знать, в каких эколого-фитоценотических условиях они существуют. По мере накопления материала и его анализа была выделена группа минеротрофных болот [2]. Оставшиеся сообщества отличаются видовым составом и тем, что находятся на границе лесных и водных экосистем и представляют экотонную зону. Расположение по периферии водотоков обусловливает их характерную форму (линейную). Находящаяся в этом районе гора Доломитовая, богатая высококальциевыми горными породами, обеспечивает приречные сообщества кальцийсодержащими соединениями.

Цель данной работы – описание трех приречных заболоченных сообществ, включающее особенности их экологии и флористического состава. Эти исследования вносят определенный вклад в изучение болотных сообществ в регионе.

Материалы и методы

Работы выполнены в 2011–2014 гг. в юго-восточных окрестностях г. Апатиты Мурманской обл. (67°54’ с.ш., 33°47’ в.д.) в трех приречных заболоченных сообществах (рис. 1, 2).

В течение вегетационного сезона проводили геоботанические описания по стандартной методике в естественных границах сообществ (табл.).

Рис. 1. Карта востоко-юго-восточных окрестностей г. Апатиты с указанием расположения участка (красный квадрат) с изучаемыми приречными травяными болотами

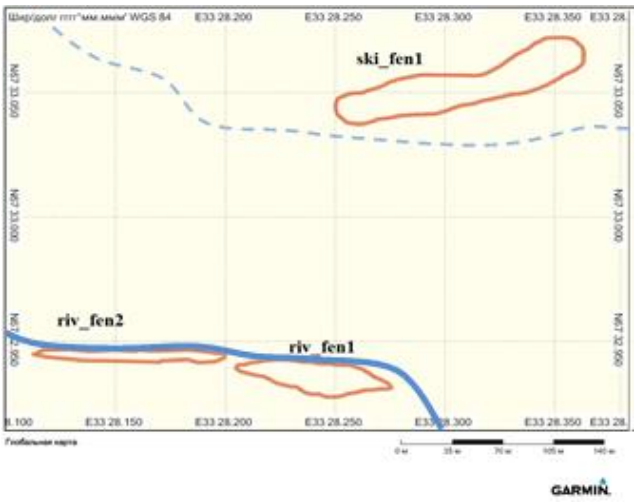


Рис. 2. Приречные травяные болота в юго-восточных окрестностях г. Апатиты: ерниковое вахтово-осоковое болото (ski_fen1); приречный елово-берёзовый лес таволго-астрагалово-осоковый (riv_fen1); калганово-пушицево-осоковое болото с сосной и берёзой (riv_fen2)

Для определения границ и площадей сообществ использовали навигатор Garmin Etrex 10 (Garmin Ltd., США). Нуль высот принят стандарта WGS84. Для определения кислотности почвы использовали портативный pH-метр (Pen Type pH Meter) PH-009(I) (Kelilong, Фуцзянь, Китай), предназначенный для измерения уровня pH – концентрации свободных ионов водорода в воде с диапазоном измерений 0–14 и ценой деления 0.1. Для установления общей минерализации в почве нами был использован солемер TDS Meter 4 (HM Digital, Китай) с диапазоном измерений 0–9990 ppm (мг/л) и ценой деления 1 мг/л. Освещенность измеряли с помощью портативного прибора Digital lux meter AR813A (Smart sensor, США, Техас),

диапазон 1–100000 лк, цена деления 1 лк и погрешность ±5 %. Электропроводность растворов определяли кондуктомером AP-2 (HM Digital, Китай) с диапазоном измерений от 0 до 9999 мкСм и ценой деления 1 мкСм.

Экологические характеристики и флористический состав
приречных болот юго-восточных окрестностей г. Апатиты

Показатели	Приречные болота		
	ski_fen1	riv_fen1	riv_fen2
Освещенность, лк	31826	37319	26717
Кислотность почвы (pH)	6.6±0.6	6.7±0.5	6.9±0.4
Минерализация почвы, мг/л	37±29	35±38	41±22
Электропроводность, мкСм/см	61±21	66±11	91±54
Общее проективное покрытие, %, в т.ч.	100	100	100
древесный ярус, %	1	5	3
травяно-кустарничковый ярус, %	90	95	80
Общее число видов, в т.ч.			
сосудистых	80	71	78
споровых	3	5	4
голосеменных	2	4	3
покрытосеменных	75	62	71
однодольных	25	17	24
двудольных	50	45	47
Древесный ярус			
Betula subarctica	+	+	+
Picea obovata	+	+	+
Pinus friesiana	+	+	+
Кустарниковый ярус*			
Betula nana	+	+	+
Juniperus communis		+	
Juniperus sibirica		+	+
Salix arbuscula		+	
Salix borealis	+		
Salix myrsinites	+	+	+
Salix myrtilloides	1		+
Salix nigricans	+		
Salix phylicifolia	1	+	+
Травяно-кустарничковый ярус*			
Agrostis tenuis			+
Andromeda polifolia	2	+	1
Angelica sylvestris	+	+	+
Antennaria dioica			+
Astragalus frigidus		2	2
Baeothryon alpinum	+	1	+
Baeothryon cespitosum	+		+
Bartsia alpina	+	+	1
Bistorta vivipara	+		1

Показатели	Приречные болота		
	ski_fen1	riv_fen1	riv_fen2
Calamagrostis neglecta	+	+	+
Calluna vulgaris	2	+	1
Cardamine dentata		+	+
Carex adelostoma			+
Carex capillaris	+		
Carex cespitosa	+		+
Carex chordorhiza	+		
Carex cinerea	1	+	1
Carex dioica	1	+	1
Carex flava	+	+	+
Carex lasiocarpa	2		2
Carex limosa	1		+
Carex media			+
Carex nigra	+	+	
Carex panicea	+		1
Carex rostrata	2a	2	2a
Carex vaginata	+		+
Cerastium scandicum	+		
Chamaenerion angustifolium	1	1	+
Cirsium heterophyllum	+	3	1
Comarum palustre	+		+
Corallorrhiza trifida	+	+	
Crepis paludosa		1	
Dactylorhiza maculata		+	+
Deschampsia cespitosa		1	+
Drosera anglica	+		+
Eleocharis quinqueflora		+	
Empetrum hermaphroditum	+	1	2
Epilobium palustre	+	+	
Equisetum fluviatile		+	1
Equisetum hiemale	1		1
Equisetum palustre	2	+	+
Equisetum variegatum		+	
Eriophorum latifolium		+	
Eriophorum polystachion	+		+
Eriophorum vaginatum	+		+
Festuca ovina		+	
Filipendula ulmaria	+	3	3
Galium uliginosum	+	1	2
Geranium sylvaticum	1	2	1
Geum rivale	+	1	1
Gymnocarpium dryoptheris	+	+	
Juncus atrofuscus		+	
Juncus filiformis	+		
Juncus nodulosus	+		
Ledum palustre		+	

Показатели	Приречные болота		
	ski_fen1	riv_fen1	riv_fen2
Listera cordata	+	+	
Luzula multiflora	+		+
Luzula pilosa	1		+
Melampyrum pratense	1	+	+
Melampyrum sylvaticum	+	+	1
Melica nutans		+	
Menyanthes trifoliata	2		+
Molinia caerulea	+	2	2
Moneses uniflora	+	+	+
Orthilia secunda		+	
Oxyccoccus microcarpus	1		+
Parnassia palustris	1	+	2
Pedicularis palustris			+
Pedicularis sceptrum-carolinum		2	1
Pinguicula alpina	1	+	+
Pinguicula vulgaris	+		+
Potamogeton alpinus			r
Potentilla erecta	2	2	3
Pyrola media	+	+	
Pyrola rotundifolia	+	+	+
Ranunculus acris		+	+
Rhinanthus minor	+	+	
Rubus chamaemorus	1	+	
Rubus saxatilis	+		+
Sanguisorba officinalis	1	1	2
Saussurea alpina	+	1	1
Saxifraga aizoides	+		+
Selaginella selaginoides		+	1
Solidago virgaurea	+	1	+
Taraxacum sp.			+
Thalictrum alpinum	+	2	2
Tofieldia pusilla		+	+
Trientalis europaea	+	+	+
Trifolium pratense	r		
Triglochin palustre	+		
Trollius europaeus	r	+	+
Utricularia minor	+		
Vaccinium uliginosum	+	1	1
Vaccinium vitis-idaea	+	1	1
Viola epipsila	+	+	
Viola montana	1	+	+

[*] Шкала покрытия: "r" = 1–3 особи; "+" = меньше, чем 1 %; "1" = 1–5 %; "2a" = 5–15 %; "2b" = 15–25 %; "3" = 25–50 %; "4" = 50–75 %; "5" = 75–100 %.

Латинские названия высших растений приведены по С.К. Черепанову [3], таксон *Sanguisorba officinalis* принимается авторами настоящей статьи по Т.А. Зайцевой [4], которая показала, что на европейской территории России он представлен единым, неделимым видом, состоящим из серии эколого-географических популяций. Под численностью популяции понимали общее число побегов данного вида в сообществе.

Результаты и обсуждение

Из девяти болотных сообществ, выявленных в юго-восточных окрестностях г. Апатиты, три – приречные. Два сообщества – заболоченные елово-берёзовые леса (приречный елово-берёзовый лес таволго-астрагалово-осоковый (riv_fen1) и калганово-пушицево-осоковое болото с сосной и берёзой (riv_fen2)) – находятся в непосредственной близости от р. Нивастровская и прилегают к её берегам, третье – ерниковое вахтово-осоковое болото (ski_fen1) – располагается на расстоянии около 170 м от её русла в непосредственной близости от ручья (притока р. Нивастровская), протекающего на расстоянии 40 м от центра болота. Приречные болота характеризуются хорошей освещенностью (26717–37319 лк), нейтральной кислотностью почвы (pH 6.6–6.9), довольно высокой минерализацией (35–41 мг/л) и электропроводностью (61–91 мкСм/см). Приручьевые и приречные болота занимают небольшие площади (433–1987 м^2), протяженные вдоль водотоков. Флористический состав изучаемых сообществ хотя и довольно разнообразен (в общей сложности 108 видов), но содержит в основном обычные и широко распространенные виды, отсутствуют виды, характерные для минеротрофной группы травяных болот [2]. Древесный ярус принимает значительное участие в сложении сообществ, однако не отличается разнообразием, состоит из трех пород. Кустарники представлены ерником, ивами и можжевельниками. Характерными видами сообществ являются *Astragalus frigidus, Pedicularis sceptrum-carolinum, Filipendula ulmaria, Cirsium heterophyllum, Geum rivale, Rhinanthus minor, Salix arbuscula, Potamogeton alpinus*, доминантами и содоминантами – *Carex rostrata, Carex lasiocarpa, C. dioica, Menyanthes trifoliata.* В изучаемых сообществах отмечено четыре охраняемых в Мурманской обл. вида сосудистых растений, включенных в региональную Красную книгу [5]. Один вид – *Salix arbuscula* – относится к редким (категория 3), три (*Viola montana, Eriophorum latifolium, Saxifraga aizoides*) – представлены в перечне видов, нуждающихся в особом внимании к их состоянию в природной среде Мурманской обл. (бионадзор).

***Ерниковое вахтово-осоковое болото* (*ski_fen1*)** площадью 1987 м^2 находится в ~3.3 км на юго-восток от центра г. Апатиты, в долине р. Нивастровская (рис. 1–3), на севере граничит с сосновым кустарничковым лесом, а на юге полоса соснового травяно-кустарничкового леса с берёзой и можжевельником отделяет его от таволго-пушицево-осокового болота (ski_fen2). По периферии болота произрастают ивы (*Salix phylicifolia, S. myrsinites, S. myrsinifolia*). Растительный покров довольно однородный, образованный осоками (*Carex lasiocarpa, C. rostrata*) и *Menyanthes trifoliata* в западной части. Древесно-кустарниковый ярус по всей площади сообщества разреженный, единично *Betula subarctica, Picea obovata, Pinus friesiana*.

***Приречный елово-берёзовый лес таволго-астрагалово-осоковый* (*riv_fen1*)** занимает 808 м^2 площади, находится в ~3.4 км на юго-восток от центра г. Апатиты (рис. 1–3). Имеет форму узкой полосы ~52 м длиной и ~15 м шириной, с одной стороны ограниченной р. Нивастровская, с другой – елово-сосновым кустарничковым лесом. Сообщество представляет собой заболоченный разреженный елово-берёзовый лес с ивами, растительный покров довольно однородный. На приствольных кочках деревьев растут кустарнички (*Vaccinium uliginosum, V. vitis-idaea*), а во влажных понижениях микрорельефа – осоки (*Carex limosa, C. rostrata, C. cespitosa*), *Molinia caerulea, Geranium sylvaticum, Cirsium heterophyllum, Potentilla erecta, Solidago lapponica* и *Trollius europaeus*. Приречная болотная растительность, помимо перечисленных видов, представлена *Astragalus frigidus, Filipendula ulmaria, Deschampsia cespitosa, Geum rivale, Pedicularis sceptrum-carolinum, Sanguisorba officinalis* и *Thalictrum alpinum*.

***Калганово-пушицево-осоковое болото с сосной и берёзой* (riv_fen2)** площадью 433 м^2 находится приблизительно в 3.4 км на юго-восток от центра г. Апатиты (рис. 1–3), протянулось узкой полосой между берегом р. Нивастровская и елово-сосновым кустарничковым лесом. Болото представляет собой серию обводненных понижений с господством осок (*Carex lasiocarpa, C. rostrata, C. flava, C. dioica*) и повышений, образованных приствольными кочками деревьев с кустарничками (*Andromeda polifolia, Vaccinium uliginosum*), *Astragallus frigidus*. В числе видов приречной растительности доминируют почти исключительно *Equisetum fluviatile* и *Geum rivale*. Кроме того, значительное участие в покрове сообщества принимают *Potentilla erecta* и *Filipendula ulmaria*.

Приречный елово-берёзовый лес таволго-астрагалово-осоковый (riv_fen1)

Ерниковое вахтово-осоковое болото (ski_fen1)

Калганово-пушициево-осоковое болото с сосной и березой (riv_fen2)

Рис. 3. Внешний вид приречных болот в юго-восточных окрестностях г. Апатиты

В результате исследований приречных болот в окрестностях г. Апатиты выявлено, что флористический состав высших сосудистых растений включает 108 видов, относящихся к 72 родам и 35 семействам. К споровым растениям относится 6 видов (5 %), которые представлены папоротниками, хвощами, плаунами. Четыре вида принадлежат к голосеменным

хвойным растениям – сосна, ель, можжевельники. Остальные (91 %) – покрытосеменные или цветковые растения, из которых 33 % – однодольные (сем. Poaceae, Cyperaceae, Juncaceae, Orchidaceae и др.), а 58 % – двудольные. Соотношение дву- и однодольных составляет приблизительно 2:1. Наибольшим разнообразием отличаются семейства Cyperaceae с 17 видами, Ericaceae и Rosaceae с 7 видами, Scrophulariaceae с 6 видами, Asteraceae, Poaceae, Salicaceae, Juncaceae – по 5 видов. Всего в восьми ведущих семействах представлено 57 % флоры.

Сравнение приречных болот с региональными минеротрофными болотами [2] показывает некоторые отличия в строении сообществ, ценности флористического состава и экологических параметрах. В отличие от минеротрофных, на приречных болотах менее разнообразен древесный ярус, отсутствуют *Alnus kolaënsis, Sorbus gorodkovii, Salix caprea*, однако в кустарничковом ярусе есть *Juniperus communis, Salix arbuscula, S. Nigricans*, не отмеченные для минеротрофных болот. Не встречаются на приречных болотах такие доминантные и редкие виды минеротрофных болот, как *Triglochin maritimum, Carex echinata, Carex hostiana, C. juncella, C. pauciflora, C. rariflora, Phragmites australis* и др. Число охраняемых видов отличается в разы – 16 видов на минеротрофных и только 4 вида – *Salix arbuscula, Viola montana, Eriophorum latifolium, Saxifraga aizoides* – на приречных болотах.

Большинство видов приречных болотных сообществ обычные и широко распространенные, однако среди них присутствуют ценные ресурсные растения, например, доминант сообществ *Potentilla erecta*, известный своими лекарственными свойствами [6]. Численность популяций этого вида значительная (80–100 побегов/м^2), что определяет высокий ресурсный потенциал данных болотных экосистем. Значимость таких видов, как, например, *Carex rostrata* – кормовые для водоплавающих птиц, более выражена на болотах, связанных с водоемами. На минеротрофных болотах *Carex rostrata* встречается только на участках с низкими значениями pH по окраине сообществ и не образует крупных фрагментов с высокой плотностью, в отличие от приречных сообществ, где этот вид – содоминант с плотностью популяций около 50 (36–90) побегов/м^2.

Многие авторы в своих работах [7–10] по Северо-Западу России в целом и по Кольскому п-ову в отдельности отмечали болота с травяным покровом. По классификации Н.Е. Королевой [11] сообщество ski_fen1, на взгляд авторов настоящей статьи, близко к соснякам с берёзой кустарничково-травяно-сфагновым (11b), riv_fen1 и riv_fen2 – к ельникам кустарничково-разнотравным приручьевым и приречным (8a) и соснякам с берёзой кустарничково-травяно-сфагновым (11b). Травяные болота достаточно трудно классифицировать, видимо, в связи с тем, что раньше исследователями больше внимания уделялось болотным сообществам других типов, поэтому в существующих классификациях есть ряд пробелов и несоответствий. На сегодняшний день классификация травяных болот для Мурманской обл. недостаточно хорошо разработана.

Болота представляют собой малонарушенные системы, которые играют важную гидрологическую роль, регулируя водный баланс территории. Но в результате человеческой деятельности (активного сбора ягод и грибов и пр.) происходят негативные изменения в растительности, выражающиеся в вытаптывании, замусоривании, нарушении травяно-почвенного покрова болот мототранспортом. Роль приречных болот в природе и для народного хозяйства как ресурсных и средообразующих велика, они занимают значительные площади, что в совокупности делает актуальным их изучение в регионе.

Авторы благодарят д.б.н. И.В. Блинову, зав. лабораторией популяционной биологии растений ПАБСИ КНЦ РАН, за критические замечания и редакцию статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Блинова И.В.* О некоторых особенностях структуры популяций сосудистых растений в фитоценозах травяных болот Мурманской области // Биоразнообразие и культуроценозы в экстремальных условиях: материалы докл. всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты: K&M, 2012. С. 17–19. **2.** *Блинова И.В., Петровский М.Н.* К характеристике минеротрофных травяных болот в центральной части Мурманской области и о необходимости

их охраны // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 3. С. 38–55. **3.** *Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с. **4.** *Зайцева Т.А.* К систематике Кровохлебки лекарственной // Бюлл. ГБС. М.: Наука, 1980. Вып. 117. С. 31–36. **5.** Красная книга Мурманской области. 2-е изд., перераб. и доп. / отв. ред. *Н.А. Константинова, А.С. Корякин, О.А. Макарова, В.В. Бианки*. Кемерово: Азия-принт, 2014. 584 с. **6.** Растительные ресурсы России. Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 3: Семейства Fabaceae-Apiaceae. 2010. 608 с. **7.** *Боч М.С.* О болотах лесной полосы Кольского полуострова // Бот. журн. 1989. Т. 74, № 12. С. 1747–1756. **8.** *Боч М.С., Смагин В.А.* Редкие ассоциации болот Северо-Запада европейской части СССР. (II. Primulo-Schoenetum ferruginei Oberd. 62, Caricetum hostianae ass. nova, Cladietum marisci Allorge 22) // Бюл. МОИП. 1987. Т. 92, вып. 4. С. 104–110. **9.** *Смагин В.А.* Растительность болот таежной зоны Европейской России // Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: материалы всерос. конф. (г. Петрозаводск, 22–27 сентября 2008 г.). Ч. 5: Геоботаника. Петрозаводск: Кар. науч. центр РАН, 2008. С. 286–289. **10**. *Смагин В.А.* Комплексы растительных сообществ болот таежной зоны Европейской России // Бот. журн. 2014. Т. 99, № 11. С. 1185–1223. **11.** *Королева Н.Е.* Основные биотопы северо-таежных лесов и березовых криволесий Мурманской области: ландшафтное и ботаническое разнообразие, основания для охраны // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С. 819–832.

Сведения об авторах

Асминг Светлана Викторовна – к.б.н., лаборант-исследователь Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН, доцент Кольского филиала Петрозаводского государственного университета; e-mail: asming@yandex.ru

Кириллова Наталья Руслановна – м.н.с. Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН; e-mail: knr81@mail.ru

УДК 550.4 (471.21)

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ И ПРИГРАНИЧНОЙ ТЕРРИТОРИИ СОПРЕДЕЛЬНЫХ СТРАН

В.А. Даувальтер, Н.А. Кашулин
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Аннотация

На основе исследований, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, установлены основные закономерности распределения тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской обл. и приграничной территории сопредельных стран. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в донных отложениях озер обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920–1930-ми гг., а максимальных значений достигает в 1970–1980-е гг., как результат металлургической деятельности в этом регионе. Заметный рост концентраций Pb в донных отложениях озер зафиксирован в начале XVIII века. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных загрязнителей. Особенно это характерно для озер Финляндии и Норвегии. Заметное увеличение содержания халькофильных Pb, Hg, As и Cd в донных отложениях озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Великой Отечественной войны, в том числе со всё усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства в регионе.

Ключевые слова:

донные отложения, озера, Мурманская обл., тяжелые металлы, загрязнение.

Введение

Европейский Север всегда ассоциировался с громадным количеством озер и рек с чистейшей водой, в которых обитают ценные виды рыб и беспозвоночных. Водоемы северо-запада Мурманской обл. в целом включают два различных типа – крупные озерно-речные системы основных рек и систему многочисленных малых озер и рек. Такие водоемы, изначально обладая высокими природными качествами, представляют собой важнейшие природные ресурсы Субарктики. Водные ресурсы Севера играют важнейшую роль в жизни коренных народов и экономике региона в целом. Однако глобальные изменения, происходящие на нашей планете, бросают качеству северных водоемов серьезный вызов. Бурный рост промышленности в XX веке обусловил процессы глобального загрязнения окружающей среды.

Для арктических регионов приобретает все большую актуальность проблема оценки последствий долговременного аэротехногенного загрязнения водоемов, расположенных как в импактных зонах промышленных предприятий, так и фоновых районах. В силу особенностей циркуляции атмосферы в Северном полушарии, в приполярные области переносится огромная часть атмосферных загрязнений, выбрасываемых промышленными предприятиями более южных индустриально развитых регионов [1]. Попадающие в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению непосредственно в водоемах и на территории их водосбора.

Пресноводные экосистемы принимают и накапливают загрязняющие вещества с обширных территорий водосборных поверхностей. Территория северо-запада Мурманской обл. подвержена

серьезному антропогенному воздействию, связанному главным образом с деятельностью металлургического комбината «Печенганикель». Основные загрязняющие вещества, поступающие в водоемы, – соединения серы и тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd, Co, As, Hg и др.), полициклические ароматические углеводороды и устойчивые органические соединения.

Значительный вклад в загрязнение атмосферы вносят и многочисленные местные источники загрязнения – котельные, энергетические установки, двигатели внутреннего сгорания и т.д. Осаждающиеся из атмосферы загрязнения постепенно накапливаются в наземных и пресноводных экосистемах, приводя к их деградации. С точки зрения человека, это относительно медленные процессы, но в геологическом плане они чрезвычайно стремительны. За несколько десятилетий произошли существенные изменения гидрохимического режима поверхностных вод, химического состава донных отложений (ДО), структурно-функциональной организации биотических сообществ.

Наибольшую опасность при этом представляют загрязняющие вещества, способные накапливаться и длительное время циркулировать в экосистемах. Мурманская обл. – один из наиболее индустриализованных районов Арктики. Трансграничный перенос загрязняющих веществ воздушными массами из индустриальных центров Европы, Америки и Азии, экстенсивное развитие местных источников загрязнения (горнодобывающие и горно-перерабатывающие, металлургические, энергетические предприятия, транспорт и т.д.) привели к резкому увеличению количества загрязняющих веществ, осаждающихся из атмосферы как непосредственно на водную поверхность, так и на территорию их водосборов. Водоемы – своеобразные коллекторы загрязнений. Большая часть попадающих на территорию водосбора загрязняющих веществ в конечном итоге оказывается в водных экосистемах, даже если они и были включены в биогеохимические циклы наземных экосистем, что определяет лишь временную задержку.

Для пресноводных экосистем Арктики и Субарктики чрезвычайно опасны выбросы предприятий металлургического и энергетического комплексов, несущие огромное количество кислотных окислов и различных металлов. Низкая минерализация вод этого региона обусловливает их высокую уязвимость к данному виду воздействия [2–4]. Учитывая многочисленные источники, широкое распространение и множественные влияния металлов на биологические системы, загрязнение окружающей среды ТМ справедливо считают одним из самых опасных последствий деятельности человека. Они обладают высокой токсичностью, имеют потенциальное свойство накапливаться в живых организмах, не разлагаются и способны длительное время циркулировать в биологических системах [5–9].

Тяжелые металлы постоянно присутствовали и присутствуют в окружающей нас природной среде. Они находятся в горных породах, почве, природных водах, растениях и животных. Роль этих элементов в сложных взаимодействиях биоты и окружающей среды весьма неоднозначна. С одной стороны, за редким исключением, они необходимы и в микроколичествах входят в состав всех живых организмов. Их недостаток может привести к различным функциональным нарушениям в организме, с другой стороны, при повышенном содержании они становятся высокотоксичными веществами.

Наибольший вклад в загрязнение арктического региона, как и наибольшую опасность, вносят Hg, Cd, Pb, которые, как полагают биологи и экологи, не имеют никакой известной биологической функции, но способны к биоаккумуляции, могут быть токсичны даже в малых количествах. В настоящее время они присутствуют в больших количествах даже в районах, удаленных от антропогенных источников. Другие металлы, например, Ni и Cu, распространены сравнительно более локально и приурочены, как правило, к районам действия металлургических предприятий.

Несмотря на снижение поступлений SO_2 от комбината «Печенганикель» практически на треть (от максимальных уровней конца 1970-х – начала 1980-х гг.), выпадение серы в районе воздействия в настоящее время представляет серьезную опасность. Концентрации сульфатов

в озерах и реках вблизи предприятия «Печенганикель» выше по сравнению с другими районами. Вместе с тем, значительные показатели буферной емкости указанных водоемов за счет высоких значений содержания основных катионов в коренных горных породах являются мощным фактором, препятствующим закислению водоемов. Это отчетливо отражается на качестве вод данного района: озера с относительно высокими концентратами сульфатов в воде также имеют повышенные содержания основных катионов и высокую щелочность [2, 10–12].

Исторически сложилось так, что оценка содержания элементов в водных системах проводилась только на основании анализа образцов воды. Она включала определение общих и растворенных концентраций элементов и соединений посредством отбора и анализа соответственно нефильтрованной и фильтрованной воды. Концентрации взвешенных веществ (взвесей, сестона) определялись по разнице между общими и растворенными концентрациями. Естественно, что при таком подходе достоверность результатов химических анализов взвешенных веществ вызывала сомнение. В большинстве водных систем концентрации элементов в верхних слоях ДО намного выше, чем концентрации элементов, растворенных в водной толще. Следовательно, невозможно получить достоверные результаты по распределению, геохимической миграции и доступности для живых организмов элементов и веществ, находящихся в водных объектах, а также определить или предсказать их влияние на окружающую среду только посредством отбора проб воды.

Донные отложения – «хранилища» многих загрязняющих веществ, поэтому их следует тщательно исследовать при оценке качества воды водоемов, которые предполагается использовать в различных целях, например для питьевого водоснабжения или рыборазведения, по следующим причинам [13]:

• во-первых, участки накопления ненарушенных ДО водоемов фиксируют все изменения геохимических условий на территории водосбора. Если будет обнаружен достаточно большой и стабильный участок накопления ДО, это позволит изучить изменения геохимических условий во времени и установить фоновые уровни, с которыми можно будет сравнивать и сопоставлять существующие условия;

• во-вторых, под влиянием изменения физико-химических условий в водоеме (например, дефицит растворенного кислорода, усиление биологической и бактериальной активности) связанные с ДО элементы могут переходить в водную толщу, поступать в пищевую цепь и оказывать существенное влияние на окружающую среду;

• в-третьих, некоторые относительно инертные или безвредные для окружающей среды неорганические вещества могут разрушаться в ДО или реагировать с другими, образуя растворимые и потенциально токсичные формы (например, переход элементарной ртути в метил ртути);

• в-четвертых, ДО можно рассматривать как один из главных источников загрязнения. Следовательно, их необходимо исследовать для определения путей потенциальной геохимической миграции загрязняющих веществ. Под влиянием изменения гидрологических условий (например, сильный шторм или весенний паводок), вероятность загрязнения водных объектов за счет аккумулированных в ДО соединений может увеличиться; что приведет к значительному негативному воздействию на гидробионты, в конечном счете и на человека.

Все вышеуказанные сведения подтверждают то, что информация о ДО, как и данные о концентрациях элементов и веществ в растворенной и взвешенной форме, необходимы для понимания того, какое влияние они оказывают на качество воды. В результате использования таких данных можно установить источники поступления загрязняющих веществ (в том числе ТМ), изучить их миграцию и определить потенциальное токсичное действие (в повышенных содержаниях) на водные организмы. Данные о химическом составе ДО требуются также для моделирования процессов переноса загрязняющих веществ в водных системах и окружающей среде в целом, для оценки геохимических циклов и установления доступности различных элементов в экологической системе.

Материалы и методы

Настоящая статья написана на основе исследований, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, включая работы в рамках международных проектов (Interreg IIIA Kolarctic project «Development and implementation of an environmental monitoring and assessment programme in the joint Finnish, Norwegian and Russian border area»), а также тем НИР Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Авторы использовали материалы ранних публикаций [4, 14–23] и исследований, проведенных в последние годы. Северо-Запад Мурманской обл. – наиболее изучаемый район вследствие наличия очень мощного источника загрязнения ТМ – комбината «Печенганикель». Имеются результаты химического состава ДО для более чем 50 озер этого района Мурманской обл., 20 норвежских и 10 финляндских озер. Район исследованных озер показан на рис. 1.

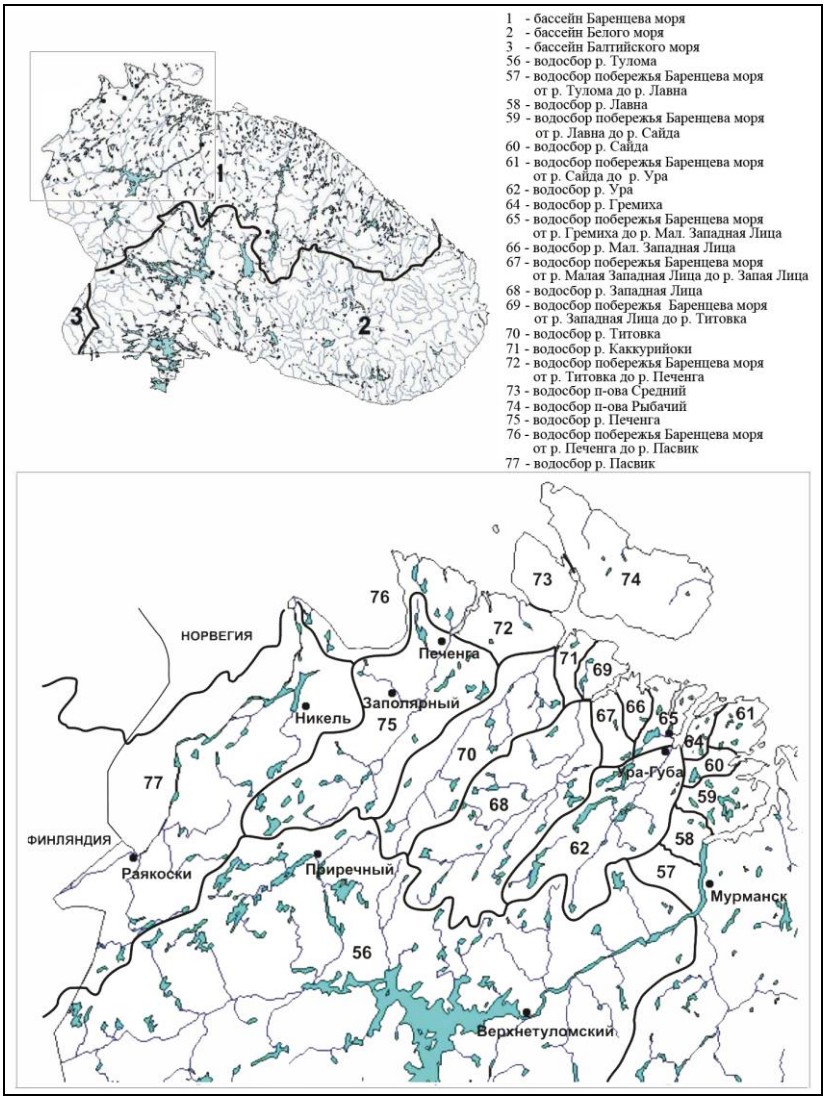


Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер северо-запада Мурманской обл. и приграничных территорий Финляндии и Норвегии

Для оценки экологического состояния озер производился отбор колонок ДО и определялись содержания ТМ в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [24, 25].

Результаты и их обсуждение

Для оценки аккумуляции и распределения ТМ в ДО исследуемых озер рассматривались четыре аспекта: 1) фоновые концентрации; 2) вертикальное распределение; 3) концентрации в поверхностных ДО; 4) значения коэффициента и степени загрязнения, создаваемого ТМ, накопленными в ДО.

Фоновые концентрации тяжелых металлов

Изучение фоновых концентраций ТМ в ДО – один из центральных вопросов при исследовании загрязнения озер. Образцы ДО, отобранные из самых глубоких слоев колонок (обычно более 20 см), позволяют получить фоновые концентрации ТМ при изучении загрязнения озер. Эти слои, согласно ранее проведенным работам [26], образовались более двух столетий назад, т.е. до индустриального развития Северной Фенноскандии. Фоновые концентрации ТМ отражают геохимические особенности территории водосбора, дают возможность оценить количественные значения степени загрязнения водных объектов и выявить аномалии с целью поисков месторождений полезных ископаемых.

Максимальные фоновые значения ТМ отмечены в ДО озер Куэтсъярви, Сальмиярви и других озер, расположенных вблизи месторождений медно-никелевых руд (территория комбината «Печенганикель»). Фоновые концентрации Cu, Ni, Zn, Co в этих озерах в 2–10 раз больше, чем в других. Настолько повышенные концентрации, вероятно, связаны с геохимическими и морфометрическими особенностями как водосборов, так и самих озер.

В озерах, находящихся в непосредственной близости к г. Заполярный и пос. Приречный, также зафиксировано значительное увеличение фоновых концентраций Cu, Ni, и Zn, что связано с разнообразием геологического строения коренных и четвертичных пород, слагающих водосборы озер.

В основном средние фоновые концентрации изучаемых металлов в водоемах Печенгского района (табл. 1.) подобны средним фоновым концентрациям для озер Мурманской обл. [27], немного превышая последние по всем ТМ, что, вероятно, вызвано геохимическими особенностями этого района, главным образом наличием месторождений и залежей сульфидных медно-никелевых руд Печенгского района. Фоновые концентрации ТМ в ДО исследуемых озер довольно непостоянны, что отражает значительные вариации в геохимии коренных и четвертичных пород и покрывающих их почв, растительности, рельефа и др., т.е. всех условий формирования химического состава ДО озер.

Таблица 1

Средние, минимальные, максимальные фоновые концентрации ТМ (мкг/г сух. веса) и стандартное отклонение в ДО исследуемых озер

Значение	Тяжелые металлы							
	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	35.5	34.2	105.2	18.3	0.261	4.6	4.2	0.044
Медиана	30.1	28.0	102.2	14.9	0.202	4.3	2.5	0.040
Минимальное	2.5	4.3	33.0	2.5	0.030	0.5	0.5	0.003
Максимальное	86.8	101.0	250.5	69.1	1.702	15.0	13.7	0.112
Средние по Мурманской обл.*	27	27	96	13	0.23	4.4	3.2	0.035
Стандартное отклонение	21.7	20.5	40.4	12.3	0.242	3.1	3.7	0.027

* По работе [27].

Долговременная антропогенная нагрузка на водосборы озер привела к изменению природных условий формирования химического состава ДО. Следовательно, фоновые концентрации ТМ играют важную роль при определении влияния индустриальной деятельности на водные экосистемы.

Вертикальное распределение элементов в донных отложениях

Исследования толщи ДО позволяют восстановить историю событий, происходящих на территории водосбора конкретного озера. Они помогают проводить обоснованную оценку изменений поступлений элементов за большой промежуток времени. Эти исследования крайне актуальны для территорий с высокоразвитой горно-металлургической промышленностью, где существует аномальное распределение ТМ вследствие геохимических особенностей и влияния загрязнения [18].

Поверхностные слои донных ДО отражают аккумулирующий эффект аэротехногенной нагрузки металлов на водосборы, которые зачастую могут не регистрироваться гидрохимическими исследованиями. Пылевые выбросы в атмосферу плавильных цехов металлургических комбинатов – главные источники повышенных концентраций Ni, Cu и Co (в 10–380 раз больше фоновых значений) в поверхностных слоях ДО на расстоянии до 30–40 км [16]. Указанные элементы имеют тесную положительную корреляцию между собой, что свидетельствует о едином антропогенном источнике их поступления и сходных путях миграции.

Вариации содержания микроэлементов в ДО водоемов за последние 60–70 лет могут быть обусловлены, главным образом, изменениями в атмосферных выпадениях элементов. Co, Cu и Ni поступают в атмосферу с выбросами металлургических комбинатов и далее выпадают на территорию водосборов озер. Увеличение концентраций Ni и Cu в ДО озер Северной Фенноскандии датируется 1930–1940-ми гг., что связано с началом горно-металлургической деятельности на территории Печенгского района (рис. 2). С увеличением расстояния от металлургических комбинатов уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО и снижается разброс содержаний в целом по колонке.

Более высокие концентрации Pb в ДО не вызваны выбросами плавилен. Значительное увеличение концентраций Pb датируется концом XIX – началом XX вв. С увеличением расстояния от металлургических комбинатов Pb, а также As, Hg и Cd становятся основными загрязнителями.

Маркерами загрязнения водосборных бассейнов служат As и Cd (рис. 2). Начало загрязнения As и Cd датируется серединой XIX в., это обусловлено развитием промышленности в Европе и России и воздушным трансграничным переносом загрязняющих веществ в высокие широты. Освоение северных территорий и дальнейшее развитие промышленности в Европе сказалось в последующем увеличении концентраций As и Cd в начале текущего столетия. Резкое повышение концентраций As на (порядок по сравнению с фоновыми слоями) и Cd в середине XX в. связано с развитием промышленности в послевоенные годы.

Выявлено уменьшение содержания ТМ в колонках ДО озер, расположенных на различном расстоянии от источников загрязнения, с увеличением глубины слоев ДО в озерах на расстоянии до 50 км от источников загрязнения. Концентрации Ni, Cu и Co в верхних 3–7 см ДО значительно выше, чем фоновые значения. Начиная с глубины 7 см наблюдается увеличение содержаний глобальных загрязнителей окружающей среды Европейской Субарктики – Pb и Cd. По мере удаления от источников концентрации в верхних слоях значительно уменьшаются и разница между содержаниями в верхних и нижних слоях становится меньше.

Средние скорости осадконакопления, рассчитанные с помощью определения возраста по хронологии ^{210}Pb с использованием модели датирования CRS и CIC [28], в исследуемых озерах довольно постоянны и находятся в пределах 0.7–1.6 мм/год. Максимальная скорость осадконакопления отмечена в оз. Кочеяур. Увеличение содержания Ni, Cu и Co в ДО озер,

в которых проведено датирование, обычно обнаруживалось в слоях, возраст которых оценивается 1920-ми и 1930-ми гг., а максимальных значений достигает в 1970–1980-е гг., как результат металлургической деятельности в этом регионе. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» уменьшаются концентрации Ni и Cu в поверхностных слоях ДО и снижается разброс содержаний в целом по колонке. Наиболее интересными получились результаты по длинной колонке из норвежского оз. Раббватнет (рис. 3): первое заметное увеличение содержания Ni и Cu датируется серединой XVII в., что, вероятно, связано с началом промышленной революции в европейских странах, увеличением выбросов ТМ в окружающую среду, а также с их воздушной миграцией в направлении Арктики.

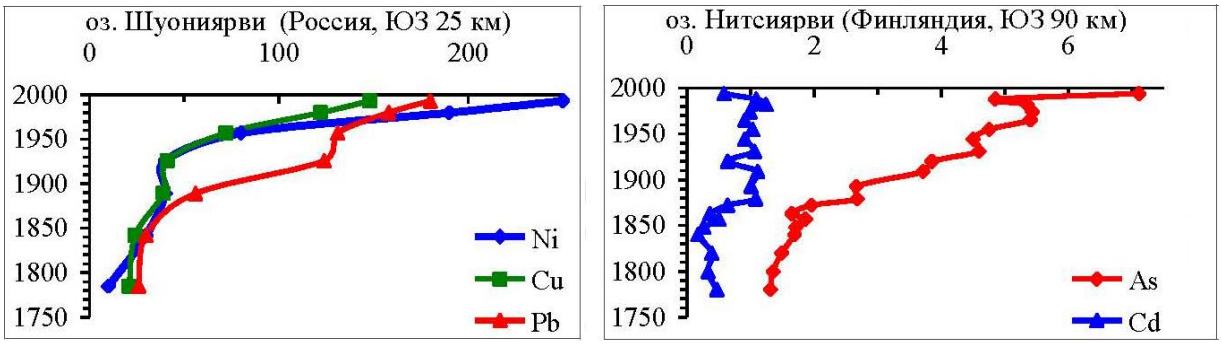


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций Ni, Cu, Pb, As и Cd (мкг/г сух. веса) в датированных ДО оз. Шуониярви (Россия, 20 км юго-западнее комбината «Печенганикель») и оз. Нитсиярви (Финляндия, 90 км юго-западнее комбината «Печенганикель»)

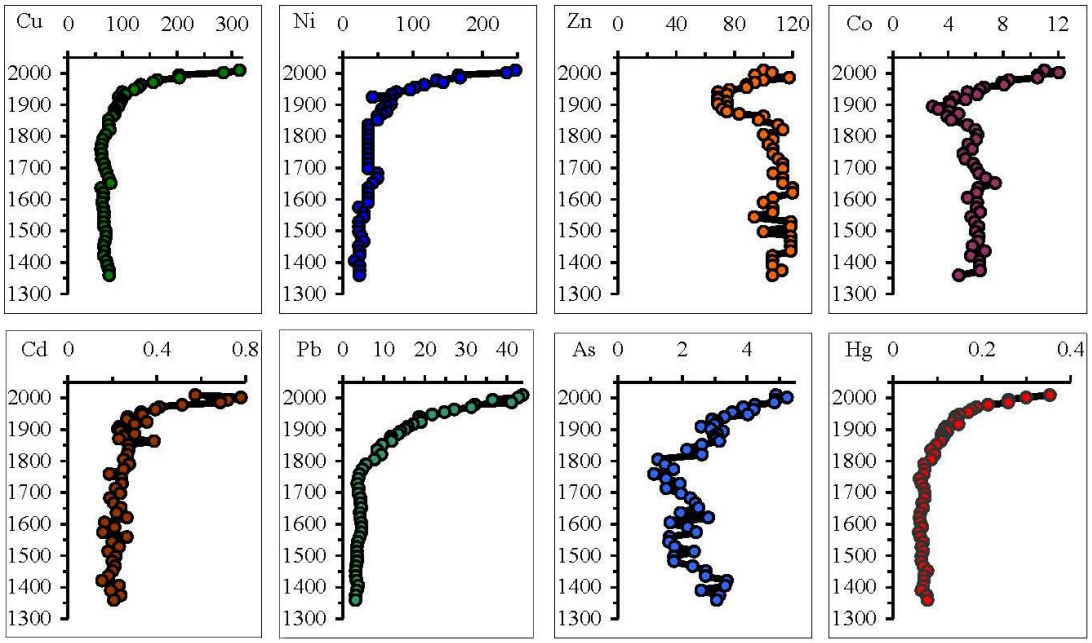


Рис. 3. Вертикальное распределение концентраций ТМ (мкг/г сух. веса) в датированных ДО оз. Раббватнет (Норвегия, 30 км северо-восточнее комбината «Печенганикель»)

Заметный рост концентраций Pb в датируемых ДО оз. Раббватнет отмечен в начале XVIII в. С увеличением расстояния от комбината «Печенганикель» Pb становится одним из основных

загрязнителей. Особенно это характерно для озер Финляндии. Заметное увеличение содержания халькофильных Pb, Hg, As и Cd в ДО всех исследованных озер произошло в середине прошлого века, и связано это с интенсивным развитием промышленности в целом после Великой Отечественной войны, в том числе со все усиливающимся использованием этилированного бензина и возобновлением металлургического производства на комбинате. Снижение содержания халькофильных элементов в поверхностном слое ДО зафиксировано в большинстве исследуемых озер и датируется одним-двумя последними десятилетиями, что вызвано осознанием высокой опасности этих токсичных металлов и уменьшением их глобального выброса.

Распределение элементов в поверхностных слоях донных отложений

Большая часть ТМ, входящих в состав выбросов и стоков промышленных предприятий, связывается и остается в ДО. Пылевые выбросы в атмосферу комбината «Печенганикель» и стоки плавильных цехов, шламоотвалов, хвостохранилищ и рудников – главные источники повышенных концентраций Ni, Cu, Co, Cd, Zn и Hg в поверхностных слоях ДО озер Печенгского района. Вода в большинстве водоемов района относится к слабокислым, что усиливает токсичные свойства металлов.

Наибольшие концентрации Ni и Cu, превышающие фоновые значения в 10–25 раз, замечены в озерах на расстоянии до 10 км от комбината (рис. 4). Значительное уменьшение концентраций, до 3–7 фоновых значений, наблюдается на расстоянии до 20–30 км от источника загрязнения.

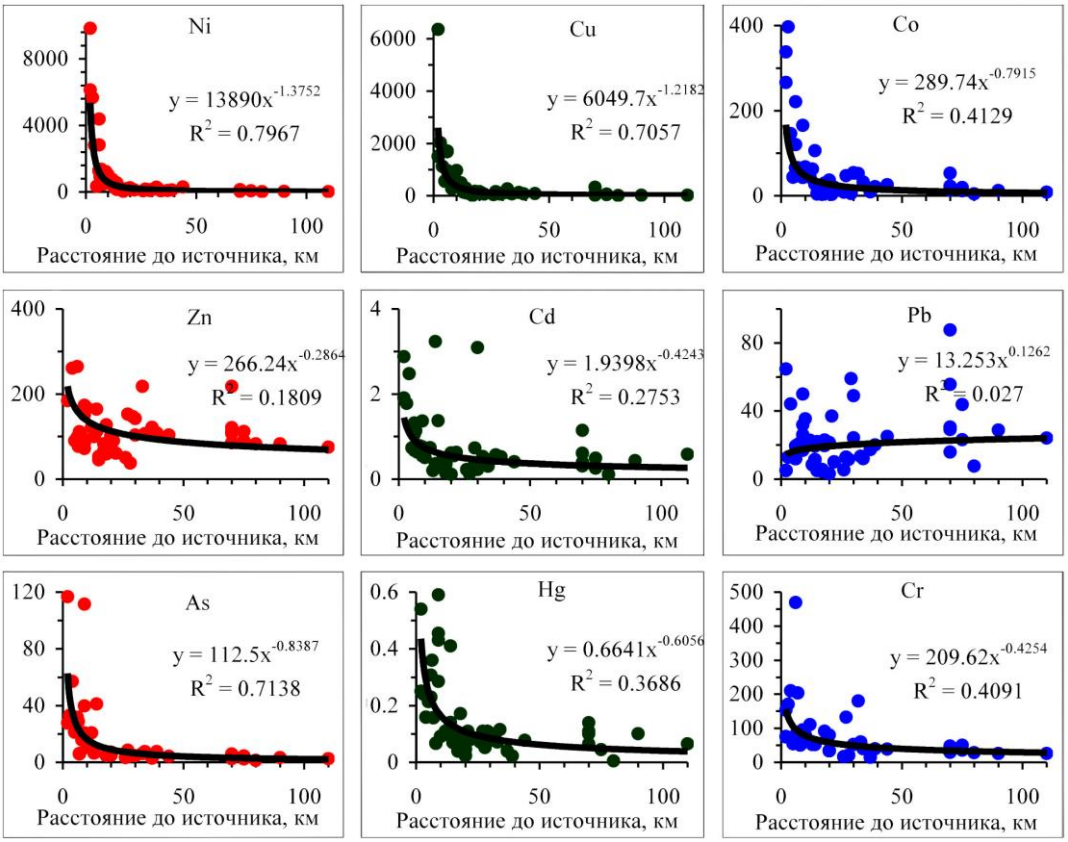


Рис. 4. Распределение концентраций основных загрязняющих элементов (мкг/г сух. веса) в поверхностном слое (0–1 см) ДО исследуемых озер по мере удаления от комбината «Печенганикель»

Распределение Zn, Co и Cd имеет аналогичную закономерность. Наиболее интенсивно загрязняется зона до 10 км. Здесь концентрации металлов превышают фоновые значения от 2 до 5 раз. При удалении от комбината на 20–30 км концентрации металлов уменьшаются до 2–3 фоновых значений. As и Hg распределены аналогично Ni, Cu, Co и другим металлам.

В распределении Pb отмечена отличная от всех ТМ картина – небольшое увеличение концентраций в поверхностных ДО по мере удаления от комбината, это свидетельствует, что ГМК «Печенганикель» – не единственный источник загрязнения свинцом.

В целом наиболее загрязнены озера, находящиеся вблизи комбината «Печенганикель», – Куэтсъярви, LN2, LN3, расположенные в 10-км зоне, получающие основную часть стоков комбината и характеризующиеся максимальными концентрациями Ni, Cu, Co, Cd, Cr и Hg в поверхностных слоях ДО.

По мере удаления от комбината на 20–25 км зарегистрировано уменьшение концентраций Ni, Cu, Co и других металлов. Озера Каскамаярви, Пороярви, Кеудшеръяур и Трифоноярви имеют умеренное и значительное загрязнение. Анализ территориального распределения ТМ в поверхностных ДО исследуемых озер выявил совпадение ареалов высоких значений концентраций тесно коррелируемых элементов Ni, Cu, Co и Hg, они ограничиваются 40-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Увеличение содержаний Pb прослеживается с востока на запад, что отражает общий поток переноса загрязняющих веществ из центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb глобальными загрязнителями являются также и Cd, Hg и As.

Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер

Для оценки экологического состояния поверхностных вод нами выбрана методика определения коэффициента и степени загрязнения, предложенная шведским ученым Л. Хокансоном [29], она адаптирована для условий Европейской Субарктики с учетом выявленных закономерностей формирования химического состава ДО и фоновых содержаний элементов в ДО. Коэффициент загрязнения C_f^i подсчитывался как частное от деления концентрации элемента или соединения в поверхностном сантиметровом слое на доиндустриальное фоновое значение. Степень загрязнения C_d определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих веществ.

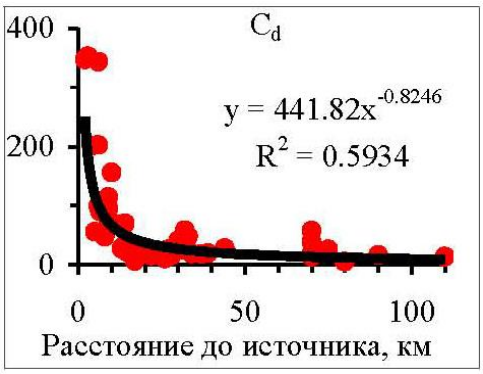


Рис. 5. Распределение значений степени загрязнения C_d в озерах на различном расстоянии от комбината «Печенганикель»

В этом подходе придерживались следующей классификации C_f^i: $C_f^i < 1$ – низкий, $1 \le C_f^i < 3$ – умеренный, $3 \le C_f^i < 6$ – значительный, $C_f^i \ge 6$ – высокий коэффициент загрязнения. Аналогично, при характеристике степени загрязнения, слагаемой коэффициентами загрязнения отдельных элементов, придерживались следующей классификации (из расчета, что суммируем значения коэффициентов загрязнения по 8 элементам – Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg): $C_d < 8$ – низкая,

$8 \leq C_d < 16$ – умеренная, $16 \leq C_d < 32$ – значительная, $C_d \geq 32$ – высокая степень, свидетельствующая о серьезном загрязнении.

Очень высокие значения C_d отмечены в исследуемых озерах на расстоянии до 30 км от источников загрязнения, а значительные значения – до 50 км (рис. 5), причем озера, расположенные по превалирующему направлению господствующих ветров (к северо-западу от комбинатов), имеют бóльшие значения C_d. В озерах, расположенных ближе 40 км, основной вклад в величину C_d вносят металлы, выбрасываемые в атмосферу комбинатом «Печенганикель» в больших количествах (Ni, Cu, Co), а в более удаленных озерах основными загрязняющими элементами становятся Pb, Cd, Hg и As, которые в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов.

Заключение

Функционирование горно-металлургического комплекса в Печенгском районе в течение более 70 лет привело к загрязнению озер сточными водами и атмосферными выбросами, содержащими газовые и пылевые составляющие, в том числе и ТМ, в повышенных концентрациях. Анализ антропогенной нагрузки на водоемы в этом районе позволяет выделить три основных блока, влияющих на изменение гидрохимического состава и аккумуляцию элементов, главным образом ТМ, в ДО:

1) сточные воды предприятий горно-металлургического комплекса (оз. Куэтсъярви, р. Пасвик). Их поступление в водоемы сопровождается загрязнением хозяйственно-бытовыми стоками, что активизирует адсорбцию и седиментацию ТМ;

2) аэротехногенное загрязнение пылеватыми выбросами медно-никелевых производств, содержащих ТМ. Пылеватые выбросы выпадают вблизи индустриальных центров, их растворение в воде вызывает повышение уровня ТМ в воде и ДО;

3) воздушное загрязнение кислотообразующими веществами (сернистым газом и окисями азота) и ионными формами металлов, распространяющимися на значительные расстояния. Закисление водоемов способствует переходу металлов в ионных (наиболее токсичных) формах из ДО в водную толщу. Несмотря на низкие концентрации, токсичные эффекты ТМ в кислой среде увеличиваются.

Образцы ДО озер дают хорошую возможность оценить экологическое состояние озер и влияние загрязнения местного и глобального характера. Анализ территориального распределения ТМ в ДО озер северо-запада Мурманской обл. показал, что ареалы высоких концентраций загрязняющих элементов, таких как Ni, Cu, Co и Hg, совпадают и ограничены 50-километровой местной зоной вокруг металлургических предприятий. Увеличение содержания Pb прослежено с востока на запад, что отражает общий поток загрязнения веществ от центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb, глобальными загрязняющими элементами являются также другие халькофильные элементы – Cd, As и Hg. Максимальные концентрации Ni и Cu, которые превышают их фоновое содержание в 10–130 раз, зарегистрированы в пределах 10-километровой от комбината «Печенганикель». На расстояниях 10–30 км от источника загрязнения эти концентрации только в 3–7 раз превышали фоновое содержание. Концентрации Co были в 4–10 раз больше фонового содержания в пределах 15 км от источника загрязнения и до 3 раз больше в других озерах на бóльшем расстоянии, что указывает на загрязнение атмосферных выбросов плавильными цехами комбината «Печенганикель». Озера Куэтсъярви, LN-2, LN-3, LN-4 получают основную часть выбросов комбината «Печенганикель», в поверхностных слоях ДО этих озер отмечены максимальные концентрации Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Hg и As. Высокие концентрации Cd, Pb, Hg и As найдены также в ДО некоторых озер, удаленных от комбината «Печенганикель», что связано с глобальным загрязнением этими элементами в последние 20–30 лет.

В результате исследований химического состава ДО озер северо-запада Мурманской обл. и приграничных районов Норвегии и Финляндии выявлена тенденция усиления антропогенной

нагрузки на водосборы озер и на сами озера, несмотря на снижение выбросов и стоков загрязняющих веществ комбинатом «Печенганикель» в последние 20 лет. Средние выбросы Ni и Cu комбинатом составляли 300 и 200 т/год соответственно, а стоки – 5 и 0.2 т/год. За 70-летний период деятельности комбината «Печенганикель» в компонентах окружающей среды (главным образом в наземных экосистемах – в почвах и растениях) накопилось огромное количество ТМ, которые после отмирания растений и разложения органических остатков со склоновым стоком, почвенными и подземными водами в виде органических и неорганических соединений постепенно поступают в водотоки и водоемы. С учетом накопленных ТМ в наземных экосистемах и многолетнего периода их самоочищения, интенсивное поступление ТМ в водоемы будет продолжаться еще не один десяток лет, даже если резко снизятся их выбросы в окружающую среду.

Значительная часть ТМ, попадающих в озера в составе сточных вод и выпадающих на территории водозабора из атмосферы, сорбируется на взвешенных частицах, затем оседает на дно озер и накапливается в ДО. Поэтому их содержание в ДО характеризует полную антропогенную погрузку на водосбор и само озеро, позволяет определять источники загрязнения и установить исторические тренды в нагрузке и изменении содержания загрязняющих элементов в воде и ДО. В большинстве водных систем концентрации элементов в верхних нескольких сантиметрах ДО намного выше, чем их концентрации в водной толще. Тесная связь микроэлементов (например, ТМ) во взвешенном материале и в ДО означает, что распределение, транспорт и доступность этих элементов водным организмам нельзя правильно оценить только посредством отбора образцов воды и анализа растворимой фазы, при оценке экологического состояния озер и интенсивности их загрязнения необходимо осуществлять отбор проб ДО и исследование их химического состава, особенно содержания основных загрязняющих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Морецкий В.Н.* О некоторых характеристиках долгопериодного крупномасштабного взаимодействия океана с атмосферой Северного полушария // Тр. ААНИИ. Л., 1976. Т. 319. С. 4–23. **2.** *Моисеенко Т.И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с. **3.** *Кашулин Н.А.* Рыбы малых озер Северной Фенноскандии в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 2004. 130 с. **4.** Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area / *N.A. Kashulin, V.A. Dauvalter, S.S. Sandimirov, I.M. Koroleva* // Finland. Kuopio: Kopijyva Oy, 2008. 141 p. **5.** *Мур Дж.В., Рамамурти С.* Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 285 с. **6.** *Зейлер Г.* Некоторые проблемы анализа биологических материалов на содержание токсичных элементов в следах // Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. М.: Мир, 1993. С. 246–269. **7.** *Blevins R.D., Pancorbo O.C.* Metal concentrations in muscle of fish from aquatic systems in east Tennessee, U.S.A. // Water, Air and Soil Pollution. 1985. No. 29. P. 361–371. **8.** *Nriagu J.O.* Global metal pollution // Environment. 1990. Vol. 32. P. 6–21. **9.** *Sorensen E.M.* Metal poisoning in fish, U.S.A. Texas: CRC Press, 1992. 362 p. **10.** *Моисеенко Т.И.* Закисление и загрязнение тяжелыми металлами поверхностных вод Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1991. 48 с. **11.** Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера) / *Т.И. Моисеенко, И.В. Родюшкин, В.А. Даувальтер, Л.П. Кудрявцева.* Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 263 с. **12.** *Моисеенко Т.И.* Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. М: Наука, 2003. 276 с. **13.** *Horowitz A.J.* A primer on trace metal-sediment chemistry. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 2nd rew. ed. 1991. 136 p. **14.** Экологический каталог озер Мурманской области. Северо-западная часть Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран: в 2 ч. / Н.А. Кашулин, С.С. Сандимиров, В.А. Даувальтер, П.М. Терентьев, Д.Б. Денисов. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. Ч. 1. 226 с.; Ч. 2. 262 с. **15.** *Даувальтер В.А.* Закономерности осадконакопления в водных объектах Европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): дис. … докт. геогр. наук. Апатиты, 1999. 399 с. **16.** *Dauvalter V.* Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61. **17.** *Даувальтер В.А.* Концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер Кольского полуострова как индикатор загрязнения водных экосистем // Проблемы химического и биологического мониторинга экологического состояния водных объектов Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 24–35. **18.** *Даувальтер В.А.* Загрязнение донных отложений водосбора реки Пасвик тяжелыми металлами // Геоэкология. 1997. № 6. С. 43–53. **19.** *Даувальтер В.А.* Тяжелые металлы в донных отложениях озерно-речной системы озеро Инари – река Пасвик // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 494–500. **20.** *Даувальтер В.А.* Химический состав донных отложений субарктического озера под влиянием горной металлургии // Известия АН. Серия географическая. 2002. № 4. С. 65–73. **21.** *Dauvalter V., Rognerud S.* Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18. **22.** *Dauvalter V.* Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in

sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monitor. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215. **23.** Airborne contamination by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia) / *T.I. Moiseenko, L.P. Kudryavtseva, I.V. Rodyushkin [et al.]* // Sci. Tot. Environ. 1995. Vol. 160/161. P. 715–727. **24.** *Даувальтер В.А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с. **25.** *Даувальтер В.А., Кашулин Н.А.* Химический состав донных отложений системы реки Пасвик в условиях глобального и локального загрязнения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 106–121. **26.** *Rognerud S., Norton S.A., Dauvalter V.* Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/93, 1993. 18 p. **27.** Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н.А. Кашулин и др. // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, №1. С. 98–107. **28.** *Appleby P.G., Oldfield F.* The calculation of the ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to sediments // Catena. 1978. Vol. 5. P. 1–8. **29.** *Håkanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

Сведения об авторах

Даувальтер Владимир Андреевич – д.г.н., профессор, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

Кашулин Николай Александрович – д.б.н., профессор, зав. лабораторией водных экосистем, зам. директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

УДК 551.582, 551.583

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В МУРМАНСКЕ С НАЧАЛА XIX ВЕКА

В.И. Демин[1], А.Р. Анциферова[2], О.И. Мокротоварова[2]
[1]Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты
[2]Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Аннотация

С помощью процедуры приведения коротких рядов к длинным по станциям-аналогам восстановлены сезонные и среднегодовые температуры в городе Мурманске в период 1802–1934 гг. Это позволило значительно удлинить существующий с 1935 г. ряд измерений в Мурманске и провести анализ климатических изменений за 211 лет.

Долговременная тенденция к потеплению проявляется во все сезоны. Численное значение скорости этого потепления сильно зависит от выбранного для анализа временного интервала, так как изменение макроциркуляционных процессов и смена циркуляционных эпох сильно искажают имеющийся тренд в масштабах десятилетий. Зимние температуры достигли своих наибольших значений в 1930-е гг., в последующие десятилетия они снижались. Новый подъем температуры начался с 1980-х гг., но ее современные значения все равно не превышают уровня предыдущего потепления. Средние за последние 10–30 лет весенние, летние и осенние температуры в Мурманске – наиболее высокие за весь рассматриваемый период.

Ключевые слова:

Мурманская обл., климат, изменение климата, статистическая климатология.

Введение

Последние десятилетия XX в. и начало XXI в. на территории Мурманской обл. характеризуются значительными изменениями климатических параметров относительно их значений, рассчитанных по периоду 1961–1990 гг. (базовый период при описании современного климата или климатическая норма «1961–1990»). Например, за прошедшие с 1991 г. 23 года превышение среднегодовой температуры в Мурманске отмечено в 21 случае. Это, безусловно, можно было бы рассматривать как беспрецедентное по скорости потепление, если бы результаты оценок не зависели в значительной степени от длины выбранного для анализа временного интервала. Например, современные температуры в регионе явно выше климатических норм «1961–1990 гг.», в то же время они не являются исключительно высокими по сравнению с температурами, имевшими место в период предыдущего потепления, достигшего пика в 1930-е гг. [1]. Кроме того, в температурных рядах заметно присутствие циклических колебаний, выражающихся в чередовании периодов потепления и похолодания, происхождение которых – предмет острой дискуссии. Существенную трудность создает и непродолжительность метеорологических наблюдений как в Арктике, так и в глобальном масштабе. Например, инструментальные измерения температуры воздуха в регионе начинаются только с конца XIX века, а продолжительность климатически однородных рядов еще много меньше. Тем не менее, в ряде случаев удается оценить климатические ресурсы прошлого методом приведения коротких рядов к длительным сериям.

Материал и методика исследований

Первые метеорологические наблюдения на Кольском п-ове начались в 1843 г. на побережье Белого моря на Терско-Орловском маяке. Наблюдения проводились с перерывами по 1865 г. Однако данные за указанный период считаются малонадежными [2] и не представлены в климатических архивах. В 1863–1865 гг. наблюдения проводились на Святоносском маяке.

Непродолжительность измерений и отсутствие информации о приборах и их установке сводит ценность наблюдений практически к нулю (возобновлены на маяке Святой Нос в 1895 г.).

Самая ранняя и длительная серия измерений области имеется в г. Кола – с 1878 г. С 1896 г. начаты измерения температуры на Терско-Орловском маяке, с 1894 г. – на маяке в Вайда-Губе, с 1896 г – в Ковде, с 1899 г. – в Печенге, в п. Ловозеро и г. Полярный (Александровск).

К сожалению, все указанные гидрометеорологические станции (ГМС) в последующие годы были или закрыты, или перенесены в другое место (часто под старым названием), что, как правило, вело к нарушению климатологической однородности. Метеорологические наблюдения в Мурманске начались в 1918 г. на территории торгового порта (64 м н.у.м.). В 1924 г. станция перенесена на 1.5 км к юго-востоку от прежнего положения с изменением высоты (21 м н.у.м.). В 1935 г. – на мыс Халдеев (51 м н.у.м.) [3]. Таким образом, за период метеорологических наблюдений в Мурманске изменилась не только высота метеорологической площадки, но, самое главное, ее положение относительно Кольского залива, заметное влияющего на температурный режим прибрежных территории. В зимнее время залив – огромный резервуар тепла, оказывающий отепляющее воздействие на прибрежные территории, а летом он же выступает в роли охладителя.

С 1935 г. метеорологическая площадка сохраняет свое положение и, несмотря на последующую застройку окружающих территорий, ее температурный ряд с этого момента считается климатически однородным* [3]. ГМС «Мурманск» включена в Глобальную систему наблюдений за климатом (ГСНК).

Температурный ряд по городу Мурманску доступен для климатической обработки с 1935 г., однако существует возможность оценить климатические условия города и в более ранний период. Так, например, в «Справочнике по климату СССР» [4] представлены среднемесячные температуры Кольского п-ова периода 1881–1960 гг., который считался базовым для климатического описания территории СССР до 1990 г. Для станций с наблюдениями, начавшимися позднее 1881 г. (в т.ч. и на ГМС «Мурманск», Халдеев мыс), при составлении «Справочника по климату» методом разностей было выполнено приведение к единому периоду (1881–1960 гг.). Среднемесячные температуры T' этого периода для пунктов с неполным рядом наблюдений рассчитывались по формуле

$$T' = T_{ан} + \Delta T,$$

где $T_{ан}$ – среднемесячные значения на станции-аналоге (ближайшая станция с полным рядом наблюдений), ΔT – средняя разность среднемесячных температур на приводимой станции и станции-аналоге за период их параллельных наблюдений [5, 6].

В основе такого приведения лежит значительная синхронность колебаний среднемесячной (и тем более сезонной) температуры, обусловленная связанностью крупномасштабных атмосферных процессов на расстояниях, часто достигающих сотен километров. Эта связь процессов определяет большую устойчивость разностей или отношений соответствующих метеорологических элементов на соседних станциях. Вариации среднегодовой температуры в городах Мурманск и Хапаранда (Швеция), удаленных друг от друга почти на 500 км, показаны на рис. 1.

Другой метод приведения – построение уравнения регрессии между исследуемой метеорологической станцией и станцией-аналогом (обладающей большей длиной ряда) по данным, полученным за период их совместной работы, и последующий расчет по найденному выражению значений на искомой станции в отсутствующие годы по их значениям на станции-аналоге.

---

* Климатически однородным считается ряд, характеристики которого меняются только в соответствии с естественной изменчивостью макропроцессов, оказывающих влияние на погоду и климат данного региона, не содержат эффектов, вызванных сменой методики производства измерения, типа измерительного прибора, а также переносом измерительной площадки или неестественным изменением окружающей местности (*прим. авт*).

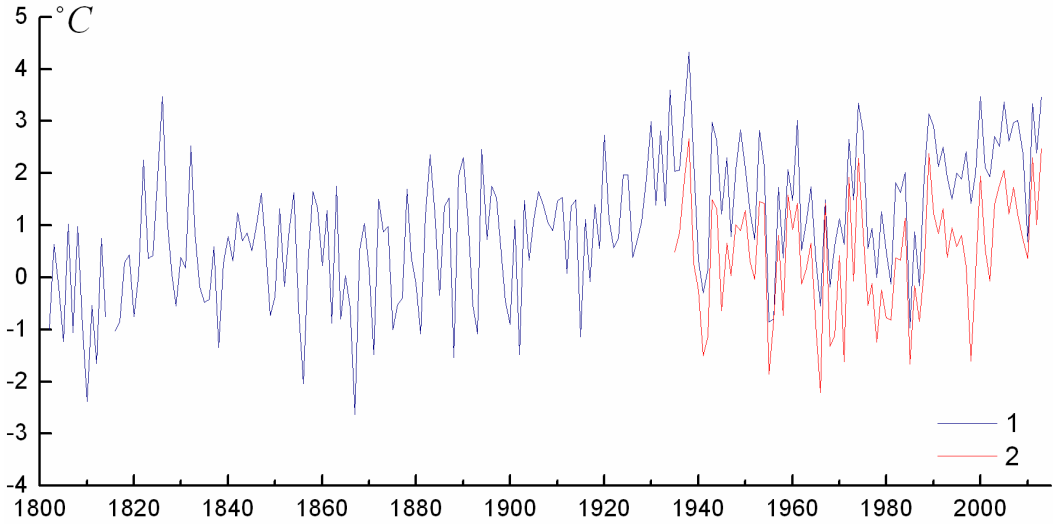


Рис. 1. Вариации среднегодовых температур: 1 – Хапаранда (Швеция), 2 – Мурманск

Связь сезонных температур в Мурманске и Коле представлена на рис. 2. Выделение сезонов на Кольском п-ове проведено по классификации, предложенной Б.А. Яковлевым [3]: зима – ноябрь–март, весна – апрель–май, лето – июнь–август, осень – сентябрь–октябрь.

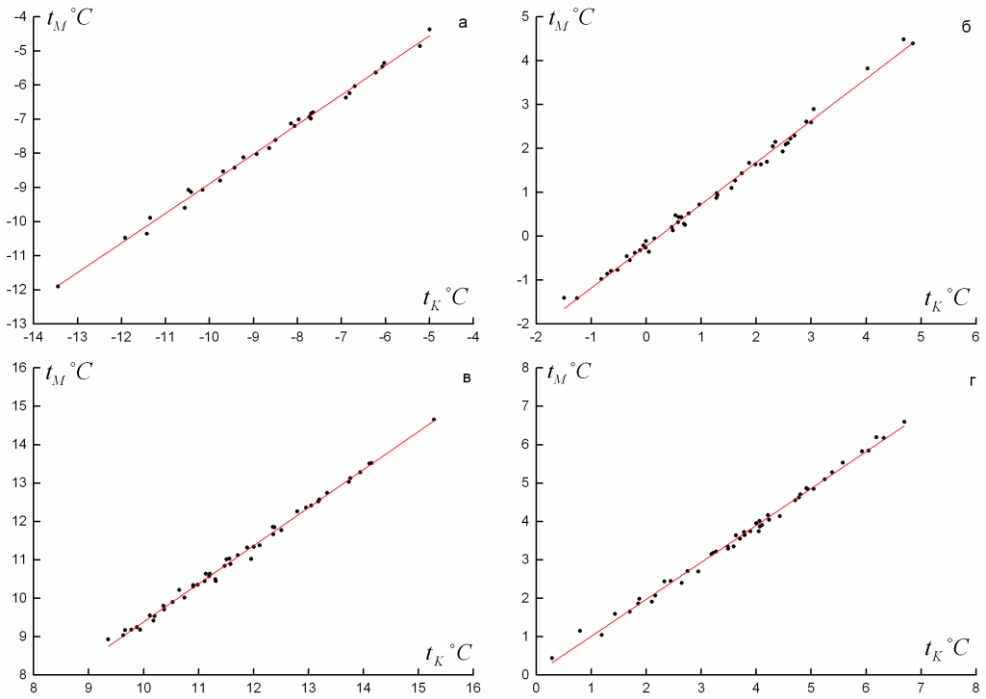


Рис. 2. Связь средних зимних (а), весенних (б), летних (в), осенних (г) температур в Коле (t_K) и Мурманске (t_M). Зимние температуры взяты до 1965 г. (перенос метеорологической площадки в Коле)

Коэффициенты корреляции сезонных температур между Колой и Мурманском очень высоки – от 0.996 до 0.998, а среднеквадратичная ошибка (СКО) не превышает 0.1 °С. Таким

образом, температурный ряд по Мурманску можно весьма надежно восстановить до 1878 г. по данным измерений в Коле.

При любом приведении ряды по станции-аналогу и по приводимой станции должны быть климатически однородными. В этой связи не представляется возможным использовать для реконструкции климатических условий Мурманска температурный ряд по Архангельску, где наблюдения начались в 1813 г., так как этот «единый» (под одним именем) ряд в действительности составлен из серий измерений, проводимых в разных местах города и по разным методикам. Несмотря на то, что температурные данные по Архангельску можно обнаружить в открытых базах климатических центров, их гомогенизацией (устранением климатической неоднородности) никто не занимался, и, учитывая, что часть данных получена по термометрам, размещенным на окнах или стенах домов [7], такая процедура представляется практически невозможной.

Ряд в городе Коле, как уже было сказано выше, – самый ранний из всех имеющихся на Кольском п-ове. Однако в последние десятилетия в связи с актуальностью проблемы климатических изменений выполнена гомогенизация длинных температурных рядов на севере Скандинавии. Например, в Вардё (Норвегия), расположенном примерно в 160 км к северо-западу от Мурманска, метеорологические наблюдения начались еще в 1829 г., а непрерывный ряд имеется с 1840 г. История метеорологических наблюдений в Вардё и процедура гомогенизации приведены в работе [8]. Однородный ряд данных предоставлен Норвежским метеорологическим институтом (Norwegian Meteorological Instutute).

Корреляция зимних, весенних, летних, осенних и среднегодовых температур между Мурманском и Вардё составляет 0.93, 0.94, 0.93, 0.95 и 0.94 соответственно.

Более длительный температурный ряд получен для Торнедалена, расположенного на границе Финляндии и Швеции и удаленного от Мурманска на 500 км. Он составлен из наблюдений в г. Хапаранда (с августа 1859 г.), а к 1802 г. продлен по сериям параллельных наблюдений 1802–1862 гг. в Хапаранде, Övertorneå и Kalix. Данные и описание процедуры их получения приведены в статье [9]. Корреляция зимних, весенних, летних, осенних и среднегодовых температур в городах Торнедалене и Мурманске за период параллельных измерений составляет 0.91, 0.84, 0.68, 0.91 и 0.90 соответственно.

Таким образом, существует возможность продления температурного ряда в Мурманске к 1878 г. по наблюдениям в Коле, до 1840 г. по рядам в Вардё и Торнедалене (мультирегрессией), а к 1802 г. (1802–1839 гг.) по наблюдениям в Торнедалене.

Возможность использования данных рядов Вардё и Торнедалена проверена с помощью критериев для выбора станций-аналогов [10, 11]:

$n \geq 6–10$, $r \geq A_{кр}$, $k/\sigma_k \geq B_{кр}$,

где n – число лет с параллельными наблюдениями, r – коэффициент парной или множественной корреляции между значениями метеорологической величины в приводимом пункте и их значениями в пункте-аналоге; $A_{кр}$ – критическое значение коэффициента корреляции (обычно задается ≥ 0.7); k – коэффициент уравнения регрессии, σ_k – его средняя квадратичная погрешность; $B_{кр}$ – критическое значение отношения k/σ_k (обычно задается ≥ 2).

Все перечисленные условия в построении регрессий «Мурманск – Кола» и «Мурманск – Вардё + Торнедаллен» выполнены. Несколько хуже обстоит дело с корреляцией летних температур в городах Мурманск и Торнедален. Но приведение становится возможным и в этом случае, так как коэффициент корреляции летних температур в Торнедалене и Мурманске после продления к 1878 г. по Коле уже более 0.71 (многоступенчатое приведение [6]).

Использование регрессионных связей предполагает, что температурный режим конкретного года в Мурманске будет восстановлен с некоторой ошибкой. В случае приведения по близко расположенной метеостанции «Кола» СКО всего около 0.1 °С. Однако при восстановлении ряда в Мурманске мультирегрессией по Вардо и Торнедалену СКО для зимних, весенних, летних и осенних температур достигает 0.90, 0.48, 0.47, 0.34 °С

соответственно, а только по Торнедалену – 0.78, 0.85, 0.94 и 0.62 °С. Но, во-первых, эта ошибка не скажется на долговременном тренде, а, во-вторых, климат описывается как среднее значение некоторых параметров за многолетний период (как правило, от 30 лет и более). Так как СКО арифметического среднего за *n* лет в $\sqrt{n}$ раз меньше ошибки одного восстановления, точность оценки климатических ресурсов в виде среднего значения за многолетний период существенно возрастает.

Безусловно, все последние рассуждения подходят только для случая, когда измерения на станциях-аналогах полностью корректны. А уверенности в этом, к сожалению, нет. Так, например, ряд по Торнедалену считается довольно качественным до 1832 г. [9]. Более ранние данные (в первую очередь летние температуры) менее надежны, что вызвано, как предполагается, недостатками радиационной защиты термометра и малыми перекрытиями рядов со станций, использованных при восстановлении ряда по Торнедалену. Тем не менее, других таких же длинных рядов в регионе нет, следовательно, нет возможности более качественно оценить климатические условия региона начала XIX в., кроме как воспользоваться существующими рядами инструментальных измерений.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены изменения среднесезонных и среднегодовых температур в Мурманске в период с 1802 г.; проведено 10-летнее сглаживание, отмечены СКО восстановленных данных. Горизонтальные линии соответствуют средним значениям температур за период 1802–1880 гг., климатическим нормам «1881–1960 гг.» и «1961–1990 гг.», а также средним многолетним значениям за период 1980–2010 гг. Отметим, что значения, рассчитанные за период 1981–2010 гг., в настоящее время широко используются рядом климатических центров вместо норм «1961–1990 гг.», которые признаются устаревшими. Численные значения среднесезонных и среднегодовых температур в Мурманске, рассчитанных для периодов 1802–1880 гг. и 1981–2010 гг., климатические нормы 1881–1960 гг. [4] и 1961–1990 гг. представлены также в таблице.

Средние сезонные и годовые температуры в Мурманске для различных периодов

Период	Средняя температура, °С				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1802–1880	-9.7	-0.2	10.6	3.1	-0.9
1881–1960	**-8.0**	**0.7**	**10.6**	**3.2**	**0.0**
1961–1990	**-8.5**	**1.1**	**10.9**	**3.8**	**0.1**
1981–2010	-7.6	1.7	11.1	4.2	0.6
1984–2013	-7.5	1.9	11.3	4.4	0.8
1994–2013	-7.3	2.0	11.4	4.7	1.0
2004–2013	-6.8	2.9	11.8	5.2	1.5

Примечание. Для периодов 1881–1960 и 1961–1990 гг. приведены официальные климатические нормы (выделено жирным шрифтом).

Долговременная тенденция к повышению температуры проявляется во все сезоны: XX век заметно теплее XIX века (рис. 3).

Вместе с тем, это потепление не монотонно: периоды потепления неоднократно сменялись периодами похолодания. В температурном ряду прослеживаются признаки присутствия квазициклических колебаний, природа которых остается неустановленной. Из-за наличия циклов потепления и похолодания представить долговременный тренд в виде численного значения довольно сложно, так как результат в значительной степени зависит от выбранного для анализа временного интервала (а именно от того, на какой участок цикла попадает начало ряда). Если,

например, ограничиться при анализе последним 50-летним периодом (сравнивая современные значения температур с нормами «1961–1990 гг.), то начало такого ряда придется на период относительного похолодания (рис. 3), а его окончание – на период последнего потепления, начавшийся со второй половины 1980-х гг. В результате скорость потепления окажется сильно увеличенной. Скорости изменения температур для данного периода составляют 0.39, 0.44, 0.18 и 0.30 °С/10 лет для зимы, весны, лета и осени соответственно. Для сравнения: скорости изменения сезонных температур на территории Мурманской обл. в период 1961–2007 гг. равны 0.4, 0.3, 0.2, 0.2 °С/10 лет [12]). Очевидно, что все эти значения чрезвычайно высоки, так как в переводе на 100 лет речь пойдет уже о градусах, а не их десятых.

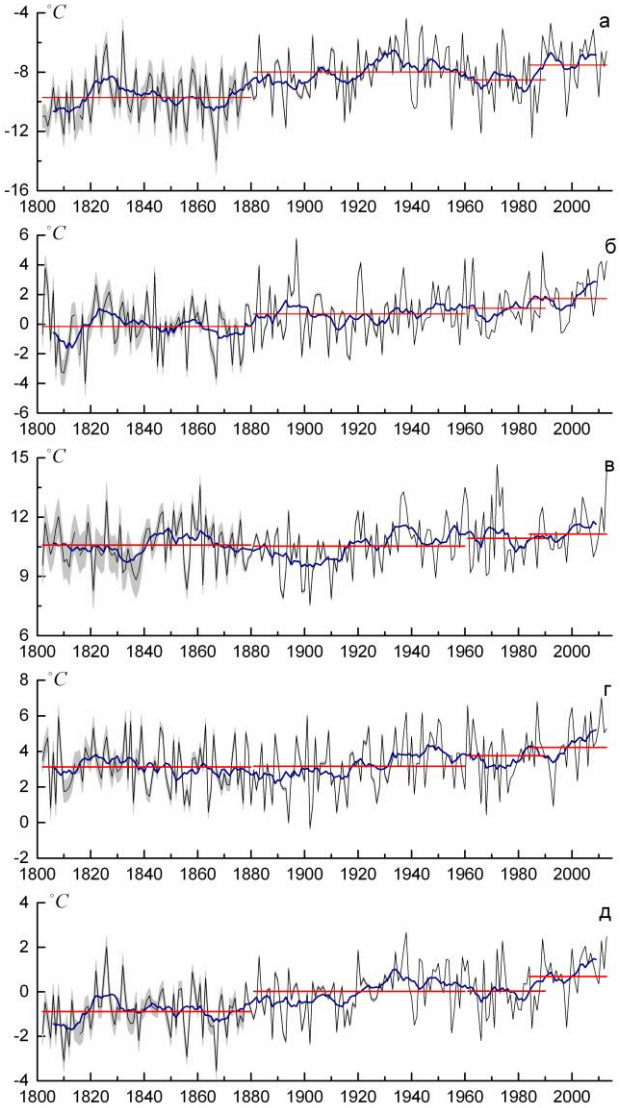


Рис. 3. Вариации средних сезонных и среднегодовой температуры в Мурманске с 1802 г. по 2013 г. и их сглаживание 10-летним фильтром:
а – зима, б – весна, в – лето, г – осень, д – год. Серой заливкой отмечена СКО приведенных данных. Горизонтальные красные соответствуют средним многолетним температурам для периодов 1802–1880, 1881–1960, 1961–1990 и 1981–2010 гг.

Если воспользоваться рядом с 1935 г. – начало наблюдений в Мурманске на Халдеевом мысе, то значения сезонных трендов составят 0.05, 0.21, 0.03, 0.13 °С/10 лет. Для ряда 1878–2013 гг. (а до 1878 г. значения температуры в Мурманске восстанавливаются весьма надежно по Коле) – 0.07, 0.12, и 0.14 °С/10 лет. Наконец, по всему ряду 1802–2013 гг. тренд у зимних, весенних, летних и осенних температур – 0.14, 0.11, 0.04 и 0.06 °С/10 лет. В зависимости от выбранного интервала численные значения трендов могут отличаться многократно.

Сравнивая обнаруженные тренды с изменениями глобальной температуры [13], можно предположить, что полученное по 200-летнему ряду потепление с характерной скоростью порядка 0.5–1.5 °С/100 лет, по всей видимости, отражает общую тенденцию к потеплению глобального климата (ее скорость несколько увеличена в полярных широтах). Однако при таких скоростях вклад глобального потепления в изменения региональной температуры в масштабах нескольких десятилетий очень мал. На коротких временных интервалах данный тренд сильно маскируется другими факторами, вызывающими вариации температуры.

Известно, например, что в общей циркуляции атмосферы существуют периоды, когда повторяемость одного из макропроцессов или группы макропроцессов заметно превышает свои многолетние значения – так называемые циркуляционных эпохи. Их продолжительность составляет от 10 до 30 лет (по Г.Я. Вангейнгейму) и 25–30 лет по Б.Л. Дзердзеевскому [14]. Каждой такой эпохе соответствует определенный фон циркуляции и определенный режим погоды в различных районах [15]. И каждая такая эпоха создает длительную тенденцию одного знака в многолетних изменениях характеристик атмосферы.

В работах [3, 16] показано, что в Мурманске во все сезоны разность средних температур, наблюдаемых при той или иной форме циркуляции, может достигать нескольких градусов. Установление в циркуляционном режиме долговременного периода с аномальным (по сравнению с многолетней нормой) развитием той или иной формы циркуляции (так называемых циркуляционных эпох) может привести к появлению и соответствующих аномалий в поле температуры. Так, в результате вмешательства циркуляционных факторов вместо более или менее монотонного изменения температуры получаются волны потепления и похолодания. В этой связи становится очевидной опасность заключений о климатических изменениях по коротким рядам данных (не содержащим в себе несколько циркуляционных эпох).

Представлены аномалии среднесезонных температур в период 1802–2013 гг.: от средних значений за 100-летний период 1881–1980 гг. (рис. 4). Изменения температуры в разных сезонах не всегда идут с одинаковым знаком: потепление одного сезона не обязательно сопровождается потеплением других (рис. 5). Это затрудняет выделение единых периодов потепления и похолодания. Такое несовпадение знаков сезонных тенденций может указывать на их циркуляционную обусловленность, так как даже один и тот же макроциркуляционный процесс в разные сезоны года может вызывать разные по знаку аномалии температуры. Так, например, при зональном переносе на Кольский п-ов поступает морской воздух, который зимой из-за предварительного прогрева над незамерзающей акваторией будет вызывать потепление, а летом и осенью – относительно прохладную погоду. Усиление такого макропроцесса в одну из циркуляционных эпох, очевидно, по-разному отразится и на температурных тенденциях отдельных сезонов. Вместе с тем, объяснить все изменения температуры в регионе только сменой макроциркуляционных процессов не удается – современное потепление наблюдается при всех формах макропроцессов [16].

Характер потепления в период с 1802 г. различается для верхних и нижних квартилей температуры (рис. 4). В зимнее время более заметен рост верхних квантилей, весной – нижних. Потепление летом более выражено за счет положительных трендов экстремально теплых случаев. Потепление осенью для разных квантилей примерно одинаковое. Если считать, что увеличение разности верхних и нижних квантилей служит мерой вариабельности климата, то можно говорить о некотором росте его экстремальности за рассматриваемый период.

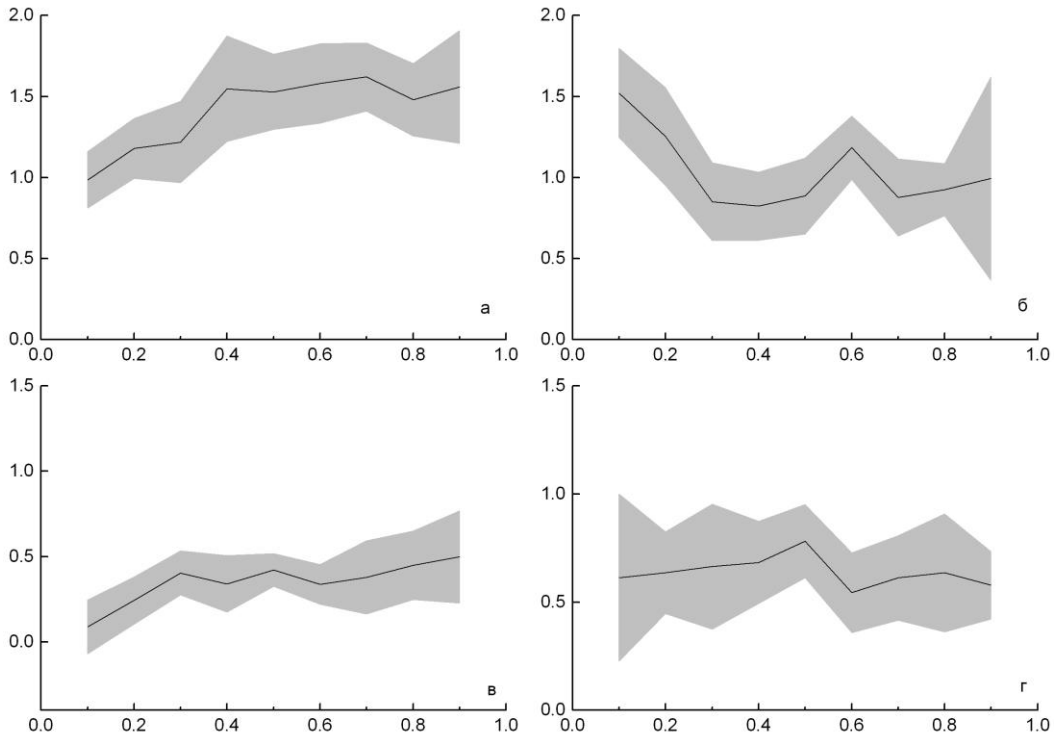


Рис. 4. Процесс-диаграммы для трендов сезонных температур в Мурманске (заливкой отмечена область СКО)

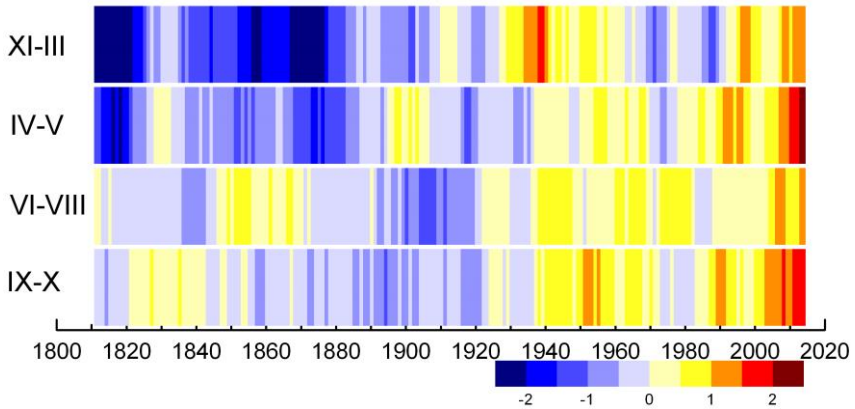


Рис. 5. Аномалии сезонных температур в Мурманске (от средних значений 1881–1980 гг.) после 10-летнего сглаживания: 1 – зима, 2 – весна, 3 – лето, 4 – осень

Сезонные температуры в городе Мурманске представлены после 10, 20 и 30-летнего сглаживания (рис. 6) по схеме:

$t'_n=(t_n+t_{n-1}+\ldots+t_{n-m+1})/m$, m=10.

Проведены линии, соответствующие средней сезонной (годовой) температуре за последние 10, 20 и 30 лет для периодов 2004–2013, 1994–2013, 1984–2013 гг. соответственно. Данный прием позволяет сравнить температуру последних 10, 20, 30 лет с температурой за аналогичные по длине периоды времени в прошлом.

Зимние температуры достигли своих максимальных значений в 1930-е гг., а в последующий период они даже несколько снизились (рис. 3, 6). Их новое повышение

началось с 1980-х гг., но они все равно еще не превысили уровня предыдущего потепления. По этой причине наблюдаемое с 1980-х гг. потепление зимних сезонов выглядит впечатляющим, только если ограничиваться последним 40–50-летним интервалом. Вместе с тем, зимние температуры XX в. заметно выше значений, характерных для XIX столетия.

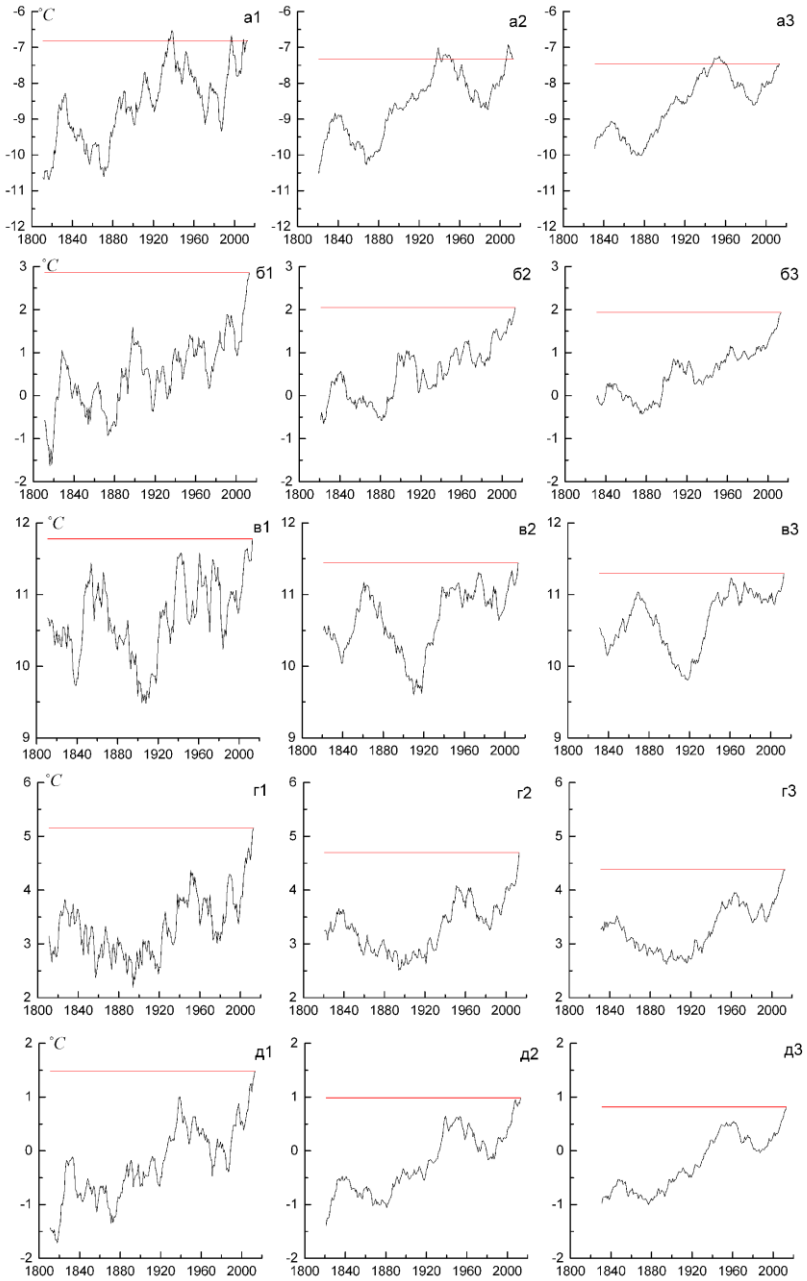


Рис. 6. Вариации средних сезонных (а – зима, б – весна, в – лето, г – осень) и годовых (д) температур в Мурманске после 10-летнего (а1, б1, в1, г1, д1), 20-летнего (а2, б2, в2, г2, д2) и 30-летнего (а3, б3, в3, г3, д3) сглаживания. Горизонтальной красной чертой отмечена средняя температура сезона или года последнего 10, 20, 30-летия (буквенный индекс 1, 2 и 3 соответственно)

Современные летние температуры также не являются исключительными (рекордными) в абсолютном значении (рис. 3в), такие температуры отмечались и в прошлом. Однако теплые

сезоны стали наблюдаться более часто. За счет этого летняя температура, рассчитанная как среднее значение за последние 10, 20 и 30 лет, оказывается наибольшей среди всех возможных 10-, 20- и 30-летних интервалов рассмотренного периода (рис. 6в). Довольно впечатляющим выглядит повышение весенних и осенних температур: последние 10-летия описанных сезонов также оказались самыми теплыми (рис. 6б, г).

Вследствие роста сезонных температур среднегодовая температура также заметно выросла и достигла наиболее высоких значений за прошедшие два столетия (рис. 6д).

Потепление весенних и осенних температур привело к заметному сдвигу климатических сезонов. Переход среднесуточной температуры через 0 °С весной в последние 30 лет происходит на 11 дней раньше, чем это имело место в период 1802–1880 гг., а обратный переход к отрицательным значениям осенью задерживается на неделю (рис. 7). На 2 недели удлинился и период со среднесуточной температурой выше 5 °С. Продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 10 °С, с которым, в частности, ассоциируется летний сезон, практически не изменилась.

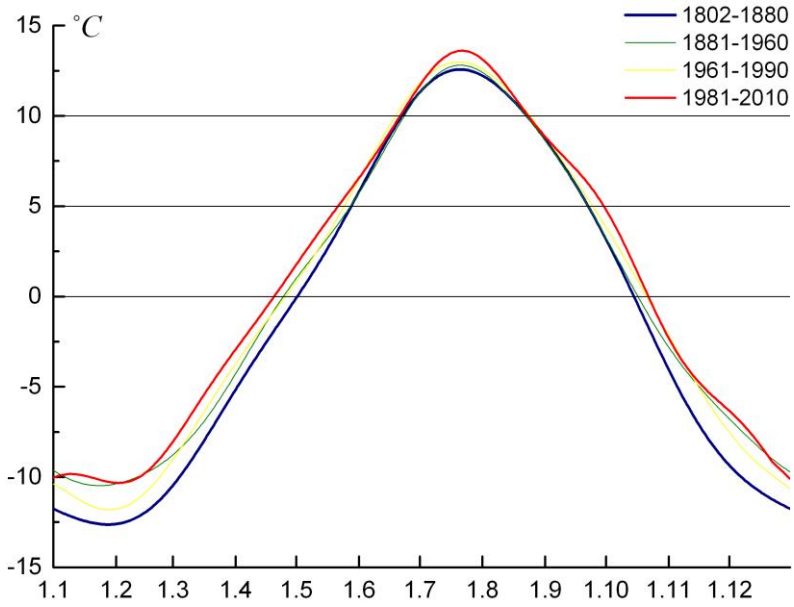


Рис. 7. Годовой ход температуры в Мурманске для разных периодов

В данной работе для реконструкции температуры использованы измерения, выполненные на расположенной в черте города ГМС «Мурманск». В этой связи возникает вопрос о том, насколько ее показания корректно отражают тенденции прилегающих территорий. Известно, что воздух в городской застройке (называемой городским «островом тепла») обычно теплее, чем в окружающей сельской (фоновой) местности. В общем виде городской «остров тепла» представляет собой сильный температурный градиент на границе города и более слабое повышение температуры к его центральной части [17]. Интенсивность и размеры данного явления изменяются во времени и пространстве под влиянием метеорологических условий, местных особенностей и характеристик города.

Чтобы ответить на вопрос о том, насколько температурное поле в районе ГМС «Мурманск» искажено городским «островом тепла», сравним долговременные изменения сезонных температур в Мурманске с изменениями температуры на ГМС «Полярное», расположенной в схожих климатических условиях (один и тот же климатический район [3]) в 30 км от Мурманска, на берегу Кольского залива. ГМС «Полярное» с 1913 г. находится на пустынном Екатерининском острове вне городской застройки, к северу от г. Полярный, и отделена

от города проливом. Главное, что за период с 1915 г. – начала строительства Мурманска – численность населения в Мурманске и Полярном менялась с совершенно разной скоростью (рис. 8а). Это важно, так как интенсивность городского «острова тепла» прямо пропорциональна числу городских жителей [17]. Появление «острова тепла» диагностируется по увеличению разности показаний между ГМС, расположенной в черте города, и ГМС, находящейся в фоновых условиях (так называемый «ползучий» тренд).

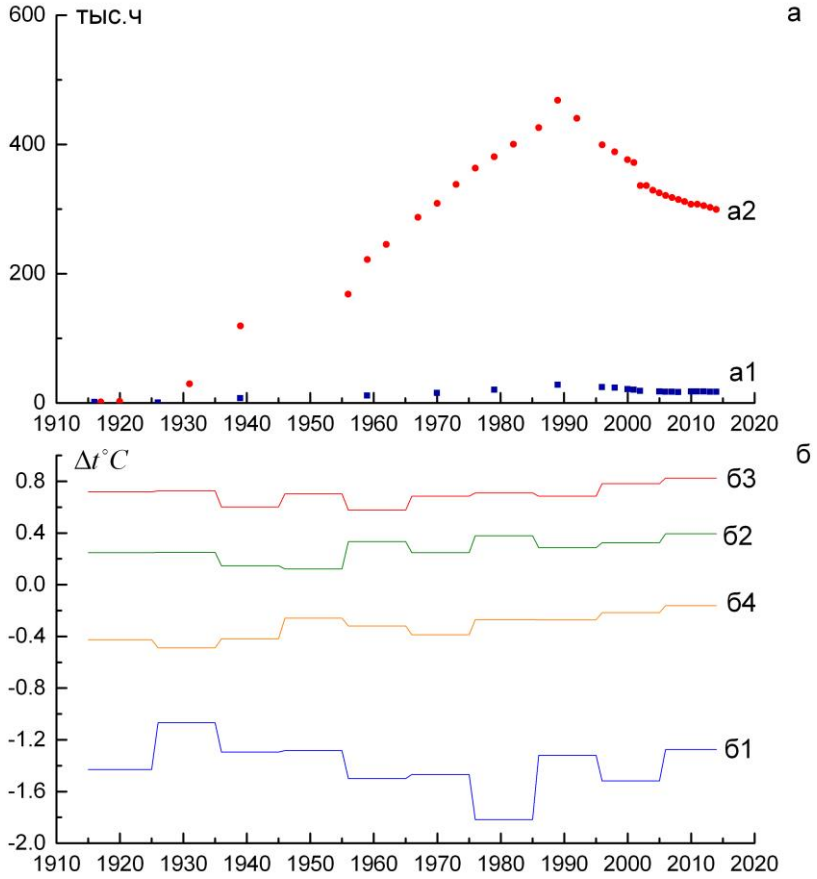


Рис. 8. Изменение населения в городах Полярный (а1) и Мурманск (а2) и разность среднесезонных температур на ГМС «Мурманск» и «Полярное» (б), осредненная по десятилетиям: б1 – зима, б2 – весна, б3 – лето, б4 – осень

Несмотря на значительный рост городов, разность сезонных температур на указанных ГМС увеличилась только весной и осенью и на величину не более чем 0.1 °С (рис 8б). При этом увеличение разности плохо согласуется с ростом населения. Обращает внимание отсутствие потепления на ГМС «Мурманск» по сравнению с ГМС «Полярное» в зимний период. Известно, что загрязнение воздуха в городе (малые газовые компоненты, водяной пар, аэрозоли) задерживают уходящее длинноволновое излучение. При отрицательном радиационном балансе подстилающей поверхности и более интенсивных потоках антропогенного тепла в зимний период разность температур между городской станцией и фоновой в этом случае должна была увеличиться. Не прослеживается четко и увеличение разности летом, когда в период полярного дня, при продолжительной инсоляции, тепло должно более интенсивно накапливаться внутри городской застройки из-за большей площади поглощающей поверхности.

Повышение разности температур только в весенние и осенние сезоны и на довольно незначительную величину (не более 0.1 °С) за 100-летний период (1915–2014 гг.) довольно плохо

вписывается в известную картину городского «острова тепла». Это позволяет говорить об отсутствии убедительных признаков искажения сезонных температур на ГМС «Мурманск» городским «островом тепла».

Такое утверждение, безусловно, нельзя рассматривать как отрицание существования в Мурманске «острова тепла», который, например, может быть более выражен в других районах города. Отсутствие эффекта в районе положения ГМС «Мурманск» может быть вызвано как особенностями положения ГМС «Мурманск» (на окраине сильно вытянутого города с его наветренной стороны, в то время как сам «остров» преимущественно сдвигается по направлению ветра), так и небольшой повторяемостью сочетания метеорологических условий, способствующих проявлению «острова тепла» в районе ГМС (значительная облачность, низкая повторяемость штилей, сильный ветровой режим, уменьшающий разность между районами города и пригородами). Таким образом, измерения на ГМС «Мурманск» достаточно репрезентативны для климатологических задач.

Следует отметить, что «остров тепла» более отчетливо проявляется при слабом ветре и безоблачном небе, когда загрязненный воздух сильнее задерживает уходящее длинноволновое излучение и различие в выхолаживании города и сельской местности проявляется наиболее отчетливо. Однако точно такие же условия способствуют и проявлению микроклиматических особенностей, обусловленных неоднородностью подстилающей поверхности, величина которых измеряется многими градусами [18, 19]. По этой причине задача отделения «острова тепла» в Мурманске от эффектов, вызванных сложным рельефом города и тепловым воздействием на прилегающие территории Кольского залива в разных частях города, представляется довольно трудной и пока не решенной.

Выводы

С помощью процедуры приведения коротких рядов к длинным по станциям-аналогам восстановлены сезонные и среднегодовые температуры в городе Мурманске в период 1802–1934 гг. Это позволило значительно удлинить существующий с 1935 г. ряд измерений в Мурманске и провести анализ климатических изменений за 211 лет.

По реконструированному ряду долговременная тенденция к потеплению проявляется во все сезоны. Численное значение скорости этого потепления сильно зависит от выбранного для анализа временного интервала, так как изменения макроциркуляционных процессов и смена циркуляционных эпох сильно искажают имеющийся тренд в масштабах десятилетий вплоть до появления циклов потепления и похолодания.

Изменения температуры в разных сезонах не всегда идут в одной фазе. Наибольшие вариации за рассмотренный период у зимних и весенних температур, наименьшие – у летних. Зимние температуры достигли своих наибольших значений в 1930-е гг., а в последующие десятилетия они снижались. Новый подъем температуры начался с 1980-х гг., но ее современные значения все равно не превзошли уровня предыдущего потепления. Средние за последние 10–30 лет весенние, летние и осенние температуры в Мурманске наиболее высокие за весь рассматриваемый период.

За счет роста весенних и осенних температур произошло сокращение зимнего сезона. Продолжительность летнего сезона практически не изменилась.

При сравнении долговременных изменений температуры на ГМС «Мурманск» с ее вариациями на ГМС «Полярное», расположенной в схожих климатических условиях в 30 км от Мурманска, четко выраженных признаков городского «острова тепла» в Мурманске не обнаруживается. По крайней мере, «остров тепла» не прослеживается в поле сезонных температур в окрестностях расположения ГМС «Мурманск». Это позволяет предположить, что выявленные долговременные тенденции температуры характерны и для ближайших фоновых районов.

ЛИТЕРАТУРА
1. *Демин В.И.* Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических наблюдений // Труды Кольского науч. центра РАН. "Прикладная экология Севера". 2012. 2 (9). Апатиты, 2012. С. 98–110. **2.** *Рубинштейн Е.С.* Климат СССР. Ч. 1: Температура воздуха. Вып. 2*:* Средние месячные температуры воздуха в европейской части СССР за отдельные годы с севера до 55 с.ш. Л.: ГГО, 1929. 180 с. **3.** *Яковлев Б.А.* Климат Мурманска. Л.: Гидрометеоиздат, 1972, 108 с. **4**. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. Вып. 2, ч. 1. 144 с. **5**. *Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я*. Климатологическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 296 с. **6**. Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений / под ред. *О.А. Дроздова*. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 492 с. **7**. *Демин В.И.* Неклиматические климатические изменения // Материалы гляциологических исследований. 2012. № 1. С. 110–114. **8.** *Andresen L.* Homogenization of monthly long-term temperature series of mainland Norway // Met. no. Note 2 / Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway. 2011. URL: http: //met.no/filestore/Homog_Norway.pdf **9.** *Klingbjer P., Moberg A.* A composite monthly temperature record from Tornedalen in northern Sweden, 1802–2002 // J. Climatology. 2003. 23. P. 1465–1494. **10**. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2011. Ч. 1. 145 с. **11**. Свод правил по проектированию и строительству: СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.,: 2004. **12**. *Семенов А.В*. Инструментальные климатические наблюдения на Кольском полуострове и особенности обслуживания региональных потребителей климатической информацией: докл. // Адаптация к изменению климата и ее роль в обеспечении устойчивого развития регионов: материалы междунар. конф. (Мурманск, 13 мая 2008 г.). URL: http://www.myshared.ru/slide/378692. **13**. Climate changes 2014: Physical bases. Fifth Assessment Report. URL: http://www.ipcc.ch/report/ar5. **14.** *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с. **15**. *Гирс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 488 с. **16.** *Демин В.И., Священников П.Н., Иванов Б.В.* Изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и современное потепление климата на Кольском полуострове // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 2. С. 101-105. **17.** *Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 360 с. **18.** Микроклимат СССР / под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 286 с. **19.** *Мищенко З.А.* Биоклимат дня и ночи. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 280 с.

Сведения об авторах

Демин Валерий Иванович – научный сотрудник Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: demin@pgia.ru

Анциферова Александра Робертовна – метеоролог Мурманского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «Мурманское УГМС»); e-mail: klimat@kolgimet.ru

Мокротоварова Ольга Ивановна – начальник ФГБУ "Мурманское УГМС"; e-mail: leader@kolgimet.ru

УДК 631.421.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ОКУЛЬТУРЕННЫХ ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В ЕВРО-АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

В.А. Мязин
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Аннотация

Рассматривается вопрос оценки степени загрязнения почвы углеводородами и продуктами их трансформации. Проведен сравнительный анализ загрязненной почвы двумя методами – ИК-спектроскопии и определения содержания хлороформенного битумоида. Показано, что с увеличением срока загрязнения, а также при проведении восстановительных работ (внесение минеральных и органических удобрений или бактериальных препаратов) происходит перераспределение компонентов почвенного битумоида: количество нефтяных углеводородов, определяемых методом ИК-спектроскопии, уменьшается, а количество продуктов их трансформации растет.

Ключевые слова:

нефтепродукты, почвенный битумоид, биоремедиация, окультуренный подзол.

Введение

При оценке степени воздействия нефти и продуктов ее переработки на почву и экологического состояния территории в целом принято учитывать концентрацию нефтяных углеводородов в почве, выражаемую как содержание нефтепродуктов (НП). В то же время, нефть представляет собой сложную композицию не только углеводородов, но и кислородных, сернистых и азотистых соединений. Кроме того, в условиях гипергенеза начальная углеводородная матрица нефти претерпевает значительную трансформацию.

В связи с этим в последнее время подход к определению НП в почве испытывает определенную критику [1–3]. Под «нефтепродуктами» в аналитическом смысле понимают сумму неполярных и малополярных углеводородов (алифатических, ароматических, алициклических), экстрагируемых органическими растворителями и не сорбирующихся оксидом алюминия, которые составляют главную и наиболее характерную часть нефти и продуктов ее переработки [4]. Однако такая трактовка термина некорректна в силу различного содержания углеводородов, подпадающих под определение НП, и других веществ в составе нефти и продуктов ее переработки. Например, при одинаковом количестве дизельного топлива и мазута в почве содержание НП в первом случае будет выше, чем во втором. Это можно объяснить наличием в составе мазута, кроме углеводородов, нефтяных смол, асфальтенов, карбенов, карбоидов и органических веществ, содержащих тяжелые металлы, которые не определяются как НП. Образующиеся при трансформации нефти соединения различного химического строения также могут не подпадать под определение НП и не учитываться при валовом определении. Исходя из этого, при мониторинге нефтяного загрязнения необходимо отслеживать не только изменение концентрации загрязняющего вещества, но и изменение его состава.

В данной работе уровень загрязнения почвы оценивался не только по содержанию НП, определяемых методом ИК-спектроскопии, но и с учетом продуктов трансформации нефтяных углеводородов, для чего использовали приемы люминисцентно-битуминологического анализа, а именно прием выделения почвенного битумоида. В геохимии термином «битумоид»

объединяют органическое вещество почвы, в том числе углеводородного и неуглеводородного состава, извлекаемое растворителями. Универсальным экстрагентом битумоидов из почв является хлороформ. Битумоиды, извлекаемые этим растворителем, получили название хлороформенный битумоид, или битумоид А (ХБА).

Объекты и методы

Работа выполнена в условиях полевого модельного опыта при искусственном загрязнении окультуренной подзолистой почвы. Для анализа были взяты образцы из слоя 0–10 см пахотного горизонта (табл.).

Краткая характеристика образцов почвы

Тип и количество нефтепродукта	Время с момента загрязнения	Способ ремедиации
Дизельное топливо, 10 л/м^2	1 год	Без ремедиации
		Органическое удобрение «Бамил»
		Органическое удобрение «Омуг»
Дизельное топливо, 14 л/м^2	2 года	Без ремедиации
		Минеральное и органическое удобрение
		Бактериальный препарат «Микрозим»
		Минеральное удобрение и бактериальный препарат ИППЭС
		Сорбент на основе вермикулита
Смесь дизельного топлива и мазута (1.5:1), 10 л/м^2	3 года	Без ремедиации
		Минеральное и органическое удобрение
		Минеральное удобрение и бактериальный препарат ИППЭС

Анализ почвенных образцов выполнялся с использованием метода ИК-спектроскопии и битуминологического анализа. Метод ИК-спектроскопии основан на хроматографическом отделении НП от полярных углеводородов и примесей ненефтяного происхождения в колонке с активным оксидом алюминия при использовании в качестве экстрагента четыреххлористого углерода и дальнейшем измерении оптической плотности полос поглощения колебаний С-Н-связи в CH_3-, CH_2 и СН-группах в ИК-области спектра. Измерения проводили на анализаторе нефтепродуктов АН-2 согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22–98 [5].

Второй метод анализа обеспечивает экстракцию из почвы не только углеводородов, но и продуктов их трансформации углеводородного и неуглеводородного состава – почвенного битумоида. Используемый в настоящей работе метод выделения ХБА из почв предложен сотрудниками лаборатории геоэкологии Горного института УрО РАН как один из начальных этапов в технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений [2, 6]. Он базируется на методе люминисцентно-битуминологического анализа пород и нефтей [7]. Анализ основан на экстракции битумоидов из почвы хлороформом с последующей его отгонкой и определением массовой концентрации ХБА весовым методом.

Результаты

Фоновое содержание НП и ХБА, определенное в исследуемой почве, составляет 0.05 и 0.53 г/кг соответственно. По данным Ю.И. Пиковского с соавторами [8], битумоид незагрязненной почвы представлен преимущественно липидной фракцией органического вещества почвы.

Рассмотрим соотношение НП и ХБА в образцах почвы, с момента загрязнения которой дизельным топливом в количестве 10 л/м^2 прошел 1 год. На долю НП, определенных методом ИК-спектроскопии, приходится 75–99 % битумоида, липидная фракция органического вещества почвы не превышает 5 %. Оставшаяся незначительная часть органического вещества почвенного битумоида состоит из соединений, образовавшихся в результате трансформации углеводородов дизельного топлива (рис. 1).

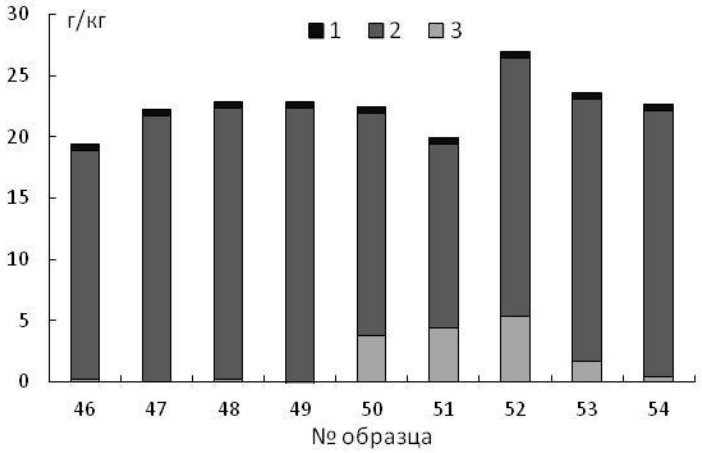


Рис. 1. Содержание в почве (г/кг) липидной фракции органического вещества (1), нефтяных углеводородов (2) и продуктов их трансформации (3) через 1 год после загрязнения

В почве, с момента загрязнения которой дизельным топливом прошло 2 года, соотношение нефтяных углеводородов и продуктов их трансформации меняется. Содержание НП снижается до 12–58 % почвенного битумоида, в то время как доля продуктов трансформации углеводородов увеличивается до 28–69 % (рис. 2).

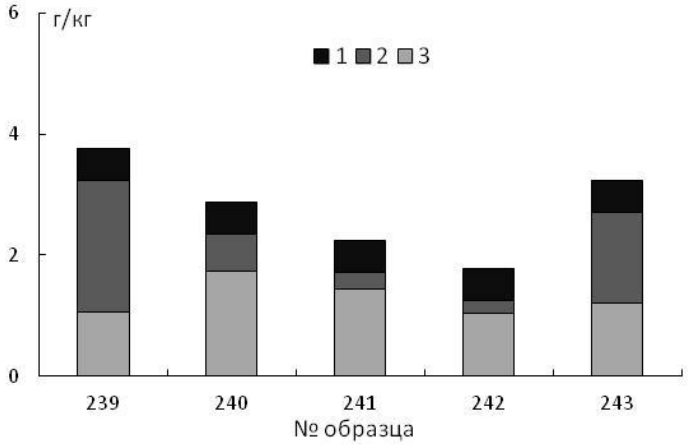


Рис. 2. Содержание в почве (г/кг) липидной фракции органического вещества (1), нефтяных углеводородов (2) и продуктов их трансформации (3) через 2 года после загрязнения

Теперь рассмотрим отношение НП и ХБА в образцах почвы, которая была загрязнена смесью дизельного топлива и топочного мазута 3 года назад (рис. 3). На долю НП, определенных методом ИК-спектроскопии, приходится не более 20 %. Бóльшая часть органического вещества

почвенного битумоида (75–89 %) – являются соединениями углеводородной и неуглеводородной природы, образовавшимися в процессе трансформации исходного нефтепродукта.

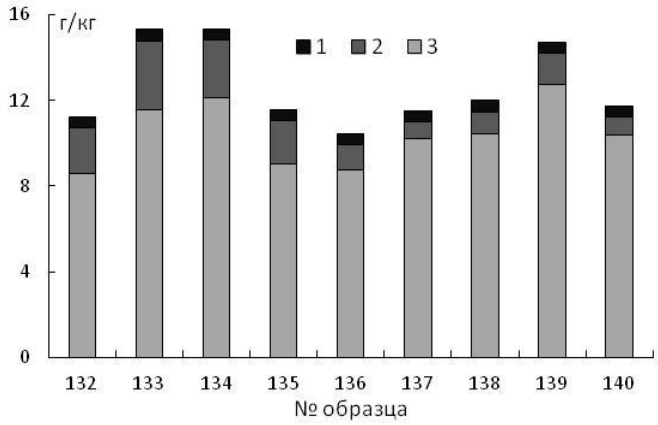


Рис. 3. Содержание в почве (г/кг) липидной фракции органического вещества (1), нефтяных углеводородов (2) и продуктов их трансформации (3) через 3 года после загрязнения

Из приведенных графиков видно, что с увеличением срока загрязнения происходит перераспределение компонентов почвенного битумоида: количество нефтяных углеводородов, полученное методом ИК-спектроскопии, уменьшается, в то время как количество продуктов их трансформации, определяемых как часть ХБА, увеличивается.

Анализ образцов загрязненной почвы вышеуказанными методами подтвердил положительный эффект ранее разработанных в ИППЭС мероприятий по рекультивации почв [9–15]. Так, в результате внесения в почву минеральных и органических удобрений, а также применения бактериальных препаратов нефтеокисляющего действия наблюдалась более интенсивная трансформация нефтяных углеводородов.

В результате использования органических добавок содержание нелетучих углеводородов дизельного топлива за 1 год снизилось до 85–88 % от общего количества битумоида. В то время как на участке без обработки содержание НП составляло 97 %, что говорит о низкой скорости самоочищения почвы (рис. 4).

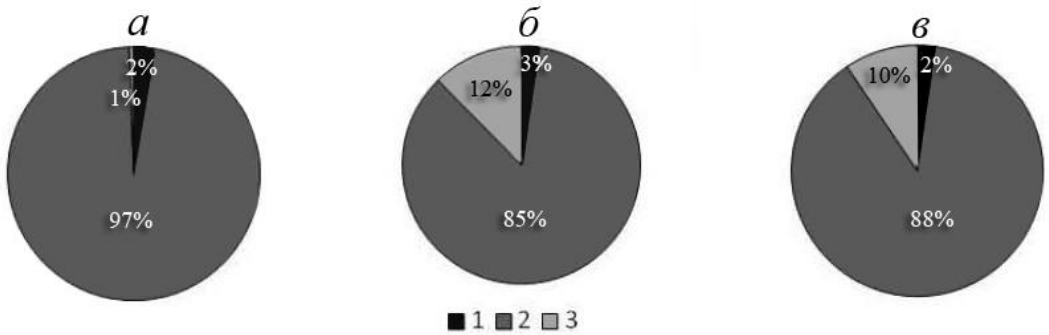


Рис. 4. Соотношение липидной фракции органического вещества (1), нефтяных углеводородов (2) и продуктов их трансформации (3) через 1 год после загрязнения: без проведения восстановительных работ (а), с внесением органических удобрений «Бамил» (б) и «Омуг» (в)

Через 2 года после загрязнения почвы дизельным топливом в количестве 14 л/м^2 в результате самовосстановления количество НП в почве снизилось до 58 %. Использование приемов биоремедиации (внесение минеральных и органических удобрений, бактериальных препаратов) позволило уменьшить содержание углеводородов до 23 % от почвенного битумоида. При этом количество продуктов трансформации углеводородов составило 55 % (рис. 5). Те же приемы биологического восстановления загрязненных почв через 3 года после загрязнения привели к снижению количества углеводородов до 9–12 %. На участке, где восстановительные работы не проводили, количество НП составляло 19 % (рис. 6).

Таким образом, использование только метода ИК-спектроскопии для анализа почвы, загрязненной нефтью или продуктами ее переработки, без проведения дополнительных исследований, особенно на поздних этапах восстановления, не позволяет полностью оценить степень остаточного загрязнения почвы, так как не учитывает продукты трансформации углеводородов, составляющие до 90 % почвенного битумоида. При этом среди них не исключено наличие веществ, отрицательно влияющих на свойства почвы и ее биоту.

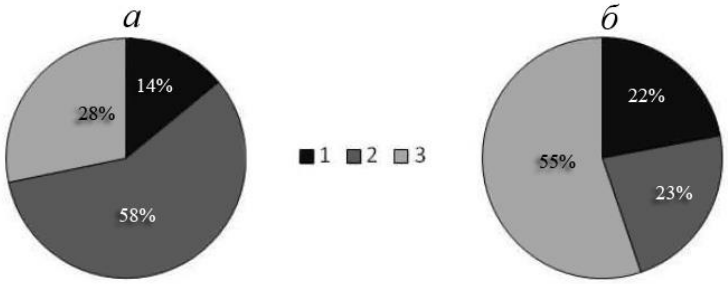


Рис. 5. Соотношение липидной фракции органического вещества (1), нефтяных углеводородов (2) и продуктов их трансформации (3) через 2 года после загрязнения: без проведения восстановительных работ (а) и с внесением бактериального препарата и минеральных удобрений (б)

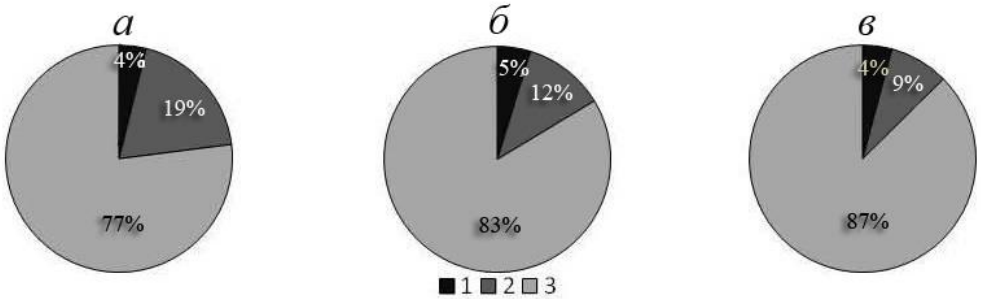


Рис. 6. Соотношение липидной фракции органического вещества (1), нефтяных углеводородов (2) и продуктов их трансформации (3) через 3 года после загрязнения: без проведения восстановительных работ (а), с внесением минеральных и органических удобрений (б), минеральных удобрений и бактериального препарата (в)

Показано, что мероприятия по рекультивации загрязненных почв, такие как внесение минеральных и органических удобрений или бактериальных препаратов, оказывают положительный эффект на скорость трансформации углеводородов, который наблюдался на всех участках с различными сроками загрязнения.

В дальнейших исследованиях мы планируем провести идентификацию соединений, образующихся в процессе трансформации углеводородов, используя методы люминисцентно-битуминологического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рогозина Е.А.* Актуальные вопросы проблемы очистки нефтезагрязненных почв // Актуальные проблемы прогнозирования, поисков, разведки и добычи нефти и газа в России и странах СНГ // Геология, экология, экономика. СПб.: Недра, 2006. С. 522–528. **2.** *Одинцова Т.А.* Разработка технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений: дис. … канд. техн. наук: 25.00.36. Пермь, 2010. 214 с. **3.** *Зубайдулин А.А.* Оценка экологических рисков при нефтяном загрязнении болот в Ханты-мансийском автономном округе – Югре // Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред: тез. докл. междунар. конф. М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2013. С. 83. **4.** ГОСТ 17.1.4.01-80. Общие требования к методам определения нефтепродуктов в природных и сточных водах. Охрана природы // Гидросфера. 1980. 13 с. **5.** ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. М. 1998. 15 с. **6.** *Бачурин Б.А., Одинцова Т.А.* Проблемы диагностики и контроля нефтяных загрязнений природных геосистем // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 9–10. С. 79–82. **7.** Методическое руководство по люминисцентно-битуминологическим и спектральным методам исследования органического вещества пород и нефтей. М.: Недра, 1979. 204 с. **8.** Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами / *Ю.И. Пиковский, А.Н. Геннадиев, С.С. Чернянский, Г.Н. Сахаров* // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140. **9.** *Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П., Михайлова И.В.* Способы биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении дизельным топливом // Агрохимия. 2009. № 6. С. 61–66. **10.** Очищение почв и сточных вод от нефтепродуктов комбинированными методами в условиях Севера / *Г.А. Евдокимова и др.* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 3. С. 34–39. **11.** Динамика убыли нефтепродуктов из агроземов и их микробиологическая активность / *Н.В. Фокина, В.А. Мязин, Н.П. Мозгова, Г.А. Евдокимова* // Антропогенная трансформация природной среды: материалы междунар. конф. 2010. Т. III. С. 452–458. **12.** *Евдокимова Г.А., Маслобоев В.А.* Биоремедиация загрязненных нефтепродуктами почв в условиях Кольского Севера // МурманшельфИнфо. 2011. № 2 (15). С. 34–38. **13.** Bioremediation of Oil-Polluted Cultivated Soils in the Euro-Arctic Region / *G. Evdokimova, V. Masloboev, N. Mozgova, V. Myazin, N. Fokina* // J. Environmental Engineering A. 2012. Vol. 1, № 9. P. 1130–1136. **14.** *Masloboev V.A., Evdokimova G.A.* Bioremediation of oil product contaminated soils in conditions of North Near-Polar Area // Proc. of the Murmansk state technical university. 2012. Vol. 15, № 2. P. 357–360. **15.** *Мязин В.А.* Разработка способов повышения эффективности биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении нефтепродуктами (в условиях модельного опыта): дис. … канд. биол. наук: 03.02.08. Апатиты, 2014. 168 с.

Сведения об авторе

Мязин Владимир Александрович – к.б.н., и.о. научного сотрудника Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; e-mail: myazin@inep.ksc.ru

УДК 33.001.89 (470.21)

ОПЫТ ИНТЕГРАЦИИ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ В XI ПЯТИЛЕТКЕ (1981–1985)

М.А.Тараканов
Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина КНЦ РАН

Аннотация

Освещена работа Совета содействия ускорению научно-технического прогресса предприятий при Мурманском обкоме КПСС в XI пятилетке. Как дань доброй памяти об ушедшем от нас в январе 2015 г. академике РАН Владимире Трофимовиче Калинникове приведены его выступления на пленарных заседаниях Совета, сохранившиеся у автора статьи – ученого секретаря этого органа в 1983–1985 гг.

Ключевые слова:

Мурманская обл., научно-технический прогресс, Кольский филиал АН СССР, академик В.Т. Калинников.

> Программа послужила основой для резкой оптимизации и развития деловых творческих контактов с промышленными предприятиями нашей области, позволила показать наши потенциальные возможности, возможности академических институтов и критически их оценить. Наши партнеры воочию убедились, что есть вопросы, в которых академическая наука очень сильна и не имеет себе конкурентов.
>
> *В.Т. Калинников*

Мотивами к написанию данной статьи послужили два события: формирование объединенного Кольского научного центра, призванного как региональный научный центр координировать научную политику институтов, каждый их которых сегодня определяет ее по своему усмотрению [1], и уход из жизни 11 января 2015 г. председателя Кольского научного центра РАН акад. В.Т. Калинникова.

В статье использован материал, сохранившийся у автора как ученого секретаря Совета содействия ускорению научно-технического прогресса предприятий при Мурманском обкоме КПСС в XI пятилетке. В тот период работа по целевым программам позволила поднять на должный уровень координацию интересов исследований ученых Кольского филиала АН СССР и потребностей предприятий региона. Автор постарался через отдельные выступления на Совете передать атмосферу живого обсуждения поиска подходов к решению поставленных задач. Помещенные в статье фотографии заседаний Совета запечатлели дух творческого заинтересованного единения руководителей институтов и заведующих лабораториями Кольского филиала с руководством предприятий Мурманской обл. по вопросам интеграции науки и производства.

Как дань доброй памяти об акад. В.Т. Калинникове* в отдельном разделе статьи приведены его выступления на заседаниях Совета, в которых живой речью отражены формы и методы

* Во время работы автора статьи в Совете В.Т. Калинников предложил ему заходить в кабинет в любое время, чтобы оперативно решать возникающие в ходе этой работы вопросы, в том числе по объяснению химических тонкостей.

становления и развития деловых творческих контактов Института химии с предприятиями области.

Региональные программы предприятий на пятилетку и роль Совета в их реализации

По инициативе Мурманского обкома КПСС на предприятиях горнопромышленного комплекса области – ПО «Апатит», ГМК «Печенганикель», комбинате «Североникель», Оленегорском, Ковдорском, Ловозерском ГОКах и ГОКе «Ковдорслюда» – на XI пятилетку были разработаны программы по ускорению научно-технического прогресса на 1981–1985 гг., а также утверждены целевая программа по комплексному геофизическому изучению территории Мурманской обл. для определения перспектив расширения минерально-сырьевых ресурсов региона, перспективный план совместных разработок и предложений по организации выпуска прогрессивных строительных материалов и изделий из местного сырья и отходов промышленности, мероприятия по повышению эффективности растениеводства для решения Продовольственной программы Мурманской обл. В реализации этих программных документов, кроме научно-исследовательских учреждений региона, принимали участие около 30 научно-исследовательских и проектных организаций, включая ведущие отраслевые институты, такие как Механобр, Гипроникель, Гиредмет, ГипроНИИнеметаллоруд, Гипроруда, Институт горного дела и др.

Координацию и контроль выполнения региональных программ осуществлял Совет содействия ускорению научно-технического прогресса предприятий при Мурманском обкоме КПСС, председателем которого был чл.-корр. АН СССР Г.И. Горбунов, председатель Президиума Кольского филиала АН СССР, а заместителем председателя Совета – секретарь Мурманского обкома КПСС В.Ф. Романенко.

Каждую программу совместно утверждали председатель Совета Г.И. Горбунов и руководитель соответствующего предприятия: директор ПО «Апатит» д.т.н. Г.А. Голованов, директор ГМК «Печенганикель» Э.Н. Климов, директор Ковдорского ГОКа А.И. Сухачев, директор Ловозерского ГОКа Г.В. Вебер, директор Оленегорского ГОКа к.т.н. П.И. Зеленов, директор ГОКа «Ковдорслюда» М.В. Ильютович, директор объединения «Североникель» А.С. Крылов.

По всем направлениям программ были названы головные организации и основные исполнители, сроки выполнения, определены руководители-кураторы (подписи которых стояли под текстом соответствующих программ).

ПО «Апатит»:

от Кольского филиала АН СССР – директор Горного института, д.т.н., проф. Н.Н. Мельников, и.о. руководителя отдела экономических исследований к.т.н. Н.Г. Пешев;

от ПО «Апатит» – главный инженер В.А. Кайтмазов.

ГМК «Печенганикель»:

от Кольского филиала АН СССР – директор Геологического института д.г.-м.н. И.В. Бельков, директор Горного института д.т.н. Н.Н. Мельников, директор Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья д.х.н. В.Т. Калинников;

от ГМК «Печенганикель» – главный инженер О.Я. Галушко.

Ковдорский ГОК:

от Кольского филиала АН СССР – зам. директора по научной работе Горного института П.А. Усачев;

от Ковдорского ГОКа – главный инженер А.А. Новиков.

Ловозерский ГОК:

от Кольского филиала АН СССР – зам. директора Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья к.т.н. А.Г. Бабкин;

от Мурманской геолого-разведочной экспедиции – главный геолог экспедиции В.А. Горелов;

от Ловозерского ГОКа – главный инженер А.И. Половников.

Оленегорский ГОК:

от Кольского филиала АН СССР – директор Геологического института, д.г.-м.н. И.В. Бельков, директор Горного института д.т.н. Н.Н. Мельников;

от Оленегорского ГОКа – главный инженер к.т.н. И.Н. Гринберг.

ГОК «Ковдорслюда»:

от Кольского филиала АН СССР – и.о. руководителя отдела экономических исследований к.т.н. Н.Г. Пешев;

от ГОКа «Ковдорслюда» – главный инженер Ю.Т. Комаров.

Комбинат «Североникель»:

от Кольского филиала АН СССР – директор Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья д.х.н. В.Т. Калинников;

от института Гипроникель – директор Мончегорского филиала С.В. Коротков;

от комбината «Североникель» – главный инженер Л.В. Родин.

7 мая 1982 г. состоялось первое заседание Совета, которое было посвящено рассмотрению проекта целевых программ по ускорению научно-технического прогресса предприятий и отраслей народного хозяйства Мурманской обл. С докладом выступил председатель Совета, чл.-корр. АН СССР Г.И. Горбунов.

В выступлении зав. отделом науки и учебных заведений обкома КПСС А.А. Панченко было сказано, что созданный при обкоме КПСС Совет вобрал опыт многих организаций (Львов, Новосибирск и др.) по вопросам внедрения достижений научно-технического прогресса, который применяется применительно к нашим условиям.

Директор Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья КФАН СССР д.т.н. В.Т. Калинников в своем выступлении особо отметил, что совместная работа ученых и практиков сплотила усилия коллектива, позволила институту рассмотреть многие перспективные вопросы и сформулировать комплексный подход к решению ряда научно-технических проблем, стоящих перед предприятиями. В ходе разработки программ были уточнены планы научно-исследовательских институтов и проведена определенная организационная работа, в частности, созданы две лаборатории – порошковой металлургии и алюмосиликатов.

Совет принял решение одобрить программы по ускорению научно-технического прогресса в 1981–1985 гг. на ведущих предприятиях Мурманской обл. (ПО «Апатит», комбинате «Печенганикель», Ковдорском, Ловозерском и Оленегорском ГОКах, ГОКе «Ковдорслюда», комбинате «Североникель»), мероприятия по повышению эффективности растениеводства для решения Продовольственной программы в Мурманской обл., целевую программу «Комплексное геолого-геофизическое изучение территории Мурманской области для определения перспектив расширения минерально-сырьевых ресурсов региона». Было предложено рассмотреть программы на соответствующих секциях Совета с учетом дополнений и замечаний, высказанных при их обсуждении на Совете.

Вопросы реализации региональных программ на предприятиях горнопромышленного комплекса определялись как особые приоритеты при планировании заседаний Совета[*].

[*] В Совете было создано семь секций: по горнопромышленному комплексу (председатель – зав. отделом тяжелой промышленности обкома: Г.Е. Иванов, И.А. Вишняков), по рыбной промышленности (председатель – зав. отделом рыбной промышленности обкома В.М. Смуров), по энергетике (председатель – зав. отделом энергетики КФАН СССР д.т.н. И.Р. Степанов), по строительству и стройматериалам (председатель – зав. отделом строительства обкома: В.И. Горячкин, Ю.А. Евдокимов), по транспорту и связи (председатель – зав. отделом транспорта и связи обкома С.В. Стрельников), по сельскому хозяйству (председатель – зав. сельскохозяйственным отделом обкома Б.С. Беспалов), по легкой, пищевой промышленности и торговли – зав. отделом легкой, пищевой промышленности и торговли В.В. Проценко. Заседания секций проводились ежеквартально.

На заседании Совета 11 февраля 1983 г. рассмотрели два вопроса:

1. О ходе выполнения отраслевых программ научно-технического прогресса на горных предприятиях области.

Докладчики:

директор Горного института КФАН СССР д.т.н. Н.Н. Мельников,

директор Института химии КФАН СССР д.х.н. В.Т. Калинников,

директор Геологического института КФАН СССР д.г.-м.н. И.В. Бельков.

2. О внедрении технологии порошковой металлургии на машиностроительных и ремонтных предприятиях области.

Докладчик – зав. лабораторией проблем порошковой металлургии ИХТРЭМС КФАН СССР д.т.н. А.Н. Штейнберг.

Председательствовал – Г.И. Горбунов.

Н.Н. Мельников обстоятельным докладом представил работу, которая проводится с объединениями и ГОКами, в том числе и выездные заседания Президиума КФАН СССР на двух ГОКах – «Ковдорслюда» и железорудном. Эта работа показала, что в подавляющем количестве тем программа выполняется. Необходимо продолжить работу по совершенствованию организации выполнения этих программ, решению текущих задач. В частности, возникают новые вопросы, которые необходимо корректировать и вносить, например, вопросы вентиляции глубоких горизонтов для ПО «Апатит». С 1984 г. объединение просит поставить этот вопрос. Это текущая работа Института, она будет продолжаться по секциям, и при ежегодном утверждении планов работ необходимо все эти моменты учитывать.

«Цель этого сегодняшнего обсуждения – отметил в своем докладе В.Т. Калинников, – состоит с том, чтобы показать по программам, что имеется в положительном балансе и какие недостатки, недоработки вскрылись» (полностью текст выступления В.Т. Калинникова приведен далее в этой статье).

В докладе И.В. Белькова были рассмотрены научно-исследовательские работы по изучению и развитию минерально-сырьевых ресурсов, в которых принимают участие свыше десятка организаций, в первую очередь ПО «Севзапгеология», Кольский филиал АН СССР и целый ряд головных и отраслевых институтов различных министерств и производственных организаций. Объединенными усилиями всех этих организаций в программе «Комплексное геолого-геофизическое изучение территории Мурманской области» сформулированы задачи по развитию минерально-сырьевой базы на текущее пятилетие и определены перспективы расширения минерально-сырьевых ресурсов региона.

После докладов директоров институтов КФАН СССР выступили руководители предприятий горнопромышленного комплекса Мурманской обл.

Заместитель главного инженера ПО «Апатит» Ю.Л. Одров определил то, какую помощь объединение надеется получить от КФАН СССР, и что предприятие будет иметь от совместного потенциала, отметив, что в процессе работы возникли новые вопросы, которые уже согласованы, однако по мере дальнейшей работы такие вопросы будут встречаться.

Директор Ковдорского ГОКа А.И. Сухачев рассказал о том, что на выездном заседании Президиума КФАН СССР подробно рассмотрена программа, которая в целом выполняется довольно удовлетворительно. Он поблагодарил Горный институт за большую работу, которую научное учреждение выполнило для комбината по реагентам. Промышленность просто не дала их комбинату, и группа И.А. Олейникова эту проблему очень хорошо решила. В 1982 г. комбинат проводил испытания шведского реагента, по итогам которых было отмечено, что отечественный реагент не только не уступает, а даже лучше шведского, эффективность которого ниже. Реагент, предложенный КФАН СССР, к тому же оказался еще и в 6 раз дешевле.

Директор ГМК «Печенганикель» Э.Н. Климов начал свое выступление с критических замечаний: «Не могу похвастаться, как выступавший здесь т. Сухачев, который сказал,

что неделю назад они рассмотрели выполнение программы. К большому сожалению, мы получили эту программу в мае 1982 г. из рук Г.И. Горбунова и больше к ней не возвращались, не обсуждали и не пытались откорректировать, хотя время идет, появляются новые проблемы. Это большой недостаток работы нашего координационного Совета, поэтому что мы здесь собрались для того, чтобы помогать предприятиям, координировать планы, направлять работу и чувствовать сегодняшний ритм того или иного предприятия. По горному направлению работы ведутся удовлетворительно, совместно с Минцветметом составлена программа. Но нужно избегать того, чтобы в Минцветмете обсуждалась программа по предприятию без участия самого предприятия и даже Главка. Будет ли смысл и полезность от такой работы Филиала и Министерства? Если уж выходить на министерство, то и обсуждать надо так, как полагается. Прошел год, он внес много необходимых поправок в работу Кольского филиала, а ведь это академический институт, а есть еще и отраслевые институты. Появились задачи, которые должны быть интересны не только печенегам и не только цветникам». В заключение Э.Н. Климов отметил, что ежегодно во всех министерствах и ведомствах проходят координационные советы по разработке программы научно-технического прогресса на год, пятилетку и т.д. Это стало уже традицией. В связи с этим он высказал пожелание, чтобы в дальнейшей работе Совета планировалось также участие в этом представителей Горного, Геологического институтов, ИХТРЭМС, так как деньги, о которых говорил Николай Николаевич, планируют там, вопросы финансирования должны решаться в координационных советах.

Главный инженер Оленегорского ГОКа Е.А. Деев отметил, что из 18 пунктов программы к настоящему времени в полном объеме выполнен только один пункт. Это освоение циклично-поточной технологии выемки и транспортировки руды Оленегорского карьера. Все остальное находится в стадии выполнения или пока только просматривается, каким образом их претворить в жизнь практически. Подробно рассмотрев намеченные в программе работы, Е.А. Деев в заключение сказал: «В выполнении этой программы принимают участие 18 институтов, производственных объединений, научно-исследовательских организаций и естественно, что очень важно координировать работу всех этих разных и разбросанных исполнителей, и думаю, что в этом отношении функции координатора мог бы взять Кольский филиал АН СССР. Он расположен рядом и заинтересован в выполнении всех этих работ. Сейчас мы считаем, что Кольский филиал проявляет определенную заинтересованность во внедрении своих ранее выполненных работ, и хотелось бы, чтобы эти первые шаги, которые мы начинаем ощущать, нашли бы большее развитие, и мы в тесном контакте решили бы все вопросы, которые записаны в программе».

Главный инженер комбината «Североникель» О.А. Попов, отметив, что программа совместных работ комбината с Кольским филиалом выполняется, имеются соответствующие протоколы и акты о завершении планов работ, а также есть неплохие заделы по работам, еще не вошедшим в обсуждаемый план, высказал замечание, что Академия наук в целом мало занимается пирометаллургическими процессами, поэтому на будущее нужно несколько переориентироваться и укрепить это направление.

В решении заседания Совета от 11 февраля 1983 г. записано, что первый год реализации мероприятий по научно-техническому прогрессу дал предприятиям и научным учреждениям в лице разработанных программ действенный инструмент целенаправленной и скоординированной работы по претворению в жизнь решений партии и правительства по повышению эффективности производства. Важной формой обстоятельного обсуждения хода реализации программ стали выездные заседания Президиума Кольского филиала АН СССР, проводимые непосредственно на предприятиях с привлечением заинтересованных организаций, с участием местных партийных и советских органов. Вместе с тем, в ходе работы по программам возникли новые задачи, не учтенные ранее, но являющиеся необходимым звеном научно-технического прогресса. Совет рекомендовал руководителям секций Совета, предприятий

и научно-исследовательских институтов продолжить работу по совершенствованию программ, внести необходимые дополнения с учетом возникших новых задач.

На заседании Совета 9 апреля 1984 г. (рис. 1 и 2) рассмотрены два вопроса:

1. О ходе реализации региональных программ научно-технического прогресса на горнодобывающих и металлургических предприятиях Мурманской обл.

Докладчики:

зам. главного инженера ПО «Апатит» Ю.Л. Одров,

главный инженер Оленегорского ГОКа Е.А. Деев,

главный инженер Ковдорского ГОКа А.А. Новиков,

главный инженер Ловозерского ГОКа О.Б. Попов,

главный инженер ГОКа «Ковдорслюда» Г.К. Горюнов,

главный инженер комбината «Североникель» В.М. Худяков,

главный инженер ГМК «Печенганикель» О.Я. Галушко;

2. О практике и перспективах применения методов порошковой металлургии на предприятиях Мурманской обл.

Докладчик – зав. лабораторией проблем порошковой металлургии ИХТРЭМС КФАН СССР д.т.н. А.Н. Штейнберг.

Председательствовал – Г.И. Горбунов.

Докладчики от предприятий представили детальный анализ хода реализации программ.

В докладе Ю.А. Одрова отмечалось, что работа по программе определена 29 темами по 6 направлениям. Проведена большая работа по ревизии всех этих тем как работниками Горного института, так и главными специалистами объединения «Апатит». В результате сделан вывод, что большинство вопросов решаются совместно, в содружестве. Общие задачи понятны и той, и другой стороне, в целом можно сказать, что программа выполняется удовлетворительно, хотя по некоторым вопросам (иногда по существу, а иногда и не по существу) даются прямо противоположные оценки, но если внимательно рассмотреть, то, как это ни парадоксально, обе стороны бывают правы. Ю.А. Одров подробно рассмотрел ход реализации и особо сделал акцент на трудностях реализации программы.

Аналогичное содержание имели доклады главных инженеров других предприятий: Е.А. Деева, А.А. Новикова, О.Б. Попова, Г.К. Горюнова, В.М. Худякова.

В отличие от предыдущего выступления на Совете, доклад О.Я. Галушко на этом заседании носил позитивный характер. Он отметил, что для решения задач научно-технического прогресса на комбинате работает ежегодно 15 научно-исследовательских и проектных организаций по 30 хоздоговорным темам. Основным, определяющим документом научно-технического прогресса на комбинате является программа, разработанная Кольским филиалом АН СССР совместно с комбинатом. Проведенное в декабре 1983 г. выездное заседание Президиума КФАН СССР и партийно-хозяйственного актива комбината позволило конкретизировать направление совместных работ как в XI пятилетке, так и на перспективу. В настоящее время в основном уточняются календарные планы работ по всей тематике программы. О.Я. Галушко подробно рассмотрел проводимую совместно с Кольским филиалом работу по программе и сформулировал те задачи, которые стоят перед комбинатом. Это оценка перспектив развития рудной минерально-сырьевой базы на основе эксплуатируемых и новых месторождений, разработка технологии добычи руды подземным способом, проведение исследований по технико-экономическому обоснованию перевода карьеров на работу с техникой большой мощности, геологическое картирование открытых и подземных рудников, использование в народном хозяйстве отходов обогатительного металлургического производства, решение вопросов охраны труда. Докладчик выразил надежду, что все эти вопросы будут решаться совместно с учреждениями Кольского филиала.

Рис. 1. Заседание Совета содействия ускорению научно-технического прогресса предприятий при Мурманском обкоме КПСС под председательством Г.И. Горбунова – председателя Президиума КФАН СССР (г. Апатиты, актовый зал Горного института КФАН СССР, 9 апреля 1984 г.):
справа от Г.И. Горбунова (верхнее фото слева – в центре) сидят Г.А. Марков, зам. председателя Президиума КФАН СССР, М.А. Тараканов, ученый секретарь Совета, слева – В.Ф. Романенко, секретарь Мурманского обкома КПСС, Г.Е. Иванов, заведующий отделом тяжелой промышленности обкома КПСС

Н.Н. Мельников остановился только на крупных и новых работах, истоком которых стало выполнение программ по объединению «Апатит», Ловозерскому ГОКу, ГОКу «Ковдослюда», ГМК «Печенганикель». В заключение Н.Н. Мельников сказал: «Что касается перспектив нашей работы, то мы считаем, что было бы более правильно укрупнить темы и сделать наши программы не по площадкам, а по тематическим главным направлениям, тогда мы сможем более по-крупному решать эти вопросы».

В своем выступлении В.Т. Калинников выразил удовлетворение тем, что были представлены такие серьезные доклады от ведущих предприятий, с которыми сотрудничает институт: «Когда подряд слышишь все эти выступления, то видны сразу перспективы и недостатки, над которыми предстоит работать» (полностью текст выступления В.Т. Калинникова приведен далее в этой статье).

Заведующий лабораторией Горного института В.В. Гущин подробно остановился на совместной работе института и ПО «Апатит» по +252 и +172 горизонтам Кировского рудника. Он выразил пожелание, чтобы вся работа координировалась одним человеком как со стороны ПО «Апатит», так и со стороны Горного института, чтобы дважды в год проводить совместную или горную секцию, или ученый совет и технический совет ПО «Апатит», чтобы можно было эти вопросы обсуждать и получать тот выход, которые ученые обязаны давать производству.

Заместитель директора Горного института П.А. Усачев рассмотрел вопросы по выполнению программ в части обогащения минерального сырья на ПО «Апатит», Ковдорском ГОКе и ГОКе «Ковдорслюда». Он отметил, что относительно «Ковдорслюды» программа НТП действительно создавалась в трудный организационный период для предприятия, и выразил готовность несколько расширить эту работу в аспекте совершенствования технологии слюдяного и керамического сырья.

В постановлении Совета по обсуждаемому вопросу руководителям предприятий было рекомендовано усилить координацию работ по выполнению программ, включить предусмотренные региональными программами задания в планы создания и внедрения новой техники предприятий. Одобрена практика Ловозерского ГОКа и ПО «Апатит» по совместному проведению с учеными Кольского филиала АН СССР опытно-промышленных испытаний на базе этих предприятий.

Завтра—День советской науки

Крепить связь с производством

В КОЛЬСКОМ филиале АН СССР под председательством члена-корреспондента АН СССР Г. И. Горбунова состоялось очередное заседание совета содействия ускорению научно-технического прогресса при Мурманском обкоме КПСС. Совет рассмотрел ход реализации региональных программ научно - технического прогресса на горнодобывающих и металлургических предприятиях Мурманской области.

В обсуждении приняли участие главные инженеры предприятий Е. А. Деев (Оленегорский ГОК), А. А. Новиков (Ковдорский ГОК), А. В. Попов (Ловозерский ГОК), Г. К. Горюнов (ГОК «Ковдорслюда»), В. М. Худяков (комбинат «Северникель»), О. Я. Галущак («Печенганикель»), заместитель главного инженера объединения «Апатит» Ю. Л. Одров, директор Горного института Кольского филиала АН СССР Н. Н. Мельников, директор Института химии В. Т. Калинников, заместитель директора Горного института П. А. Усачев, заведующий лабораторией Горного института В. В. Гущин, заведующий отделом тяжелой промышленности Мурманского обкома КПСС Г. Е. Иванов.

Обстоятельный и критический анализ состояния работ по ускорению научно-технического прогресса в горной промышленности области позволил вскрыть недостатки в этом деле и наметить пути укрепления связи ученых и производственников. В принятом решении одобрена практика Ловозерского ГОКа и объединения «Апатит» по совместному проведению с учеными Кольского филиала АН СССР опытно-промышленных испытаний на базе предприятий, указано на недостаточность масштабов и темпов создания опытно - промышленных установок для укрупненных технологических испытаний на Ковдорском ГОКе и комбинате «Северникель». Руководителям предприятий предложено усилить координацию работ по выполнению программ научно-технического прогресса, включать предусмотренные региональными программами задания в планы разработки и внедрения новой техники предприятий.

На заседании совета было заслушано также сообщение заведующего лабораторией проблем порошковой металлургии Института химии КФАН СССР А. Н. Штейнберга о практике и перспективах применения методов порошковой металлургии на предприятиях Мурманской области. Участники заседания ознакомились в Институте химии с экспериментальным участком регионального центра по технологии газотермических покрытий.

В работе совета принял участие и выступил на нем секретарь Мурманского обкома КПСС В. Ф. Романенко.

М. ТАРАКАНОВ,
ученый секретарь совета содействия ускорению научно-технического прогресса при Мурманском обкоме КПСС.

Рис. 2. Статья в газете «Кировский рабочий» от 14 апреля 1984 г., № 44 (9127)

12 декабря 1983 г. состоялось заседание Совета с основным вопросом в повестке дня «О ходе выполнения перспективного плана внедрения совместных разработок и предложений Кольского филиала АН СССР и предприятий Мурманской области по организации выпуска прогрессивных строительных материалов и изделий из местного минерального сырья и отходов промышленности» (докладчик зав. лабораторией технологии стеновых и облицовочных материалов ИХТРЭМС КФАН СССР к.т.н. О.Н. Крашенинников).

Кроме того, председатель секции рыбной промышленности, зав. отделом рыбной промышленности обкома партии В.М. Смуров проинформировал Совет о работе секции.

Председательствовал зам. председателя Совета, секретарь Мурманского обкома КПСС В.Ф. Романенко.

В докладе О.Н. Крашенинникова было высказано много критики в адрес хозяйственных руководителей, которые плохо занимаются внедрением разработок, сделанных в Кольском филиале. В завершении своего доклада он сказал: «При большом диапазоне направлений различных технологий наш отдел (Отдел технологии строительных материалов Института химии КФАН СССР) не в состоянии обеспечить себя надежной опытно-промышленной базой для проверки результатов лабораторных исследований, что, естественно, тормозит внедрение разработок. Выход из положения заключается в необходимости создания на базе заинтересованных (ответственных за внедрение промышленных предприятий и организаций) опытно-промышленных, модельных установок. Для ускорения решения вопросов внедрения научных разработок необходимо заинтересованным организациям создать творческие группы (бригады), осуществляющие при научно-методической помощи КФАН СССР подготовку и проведение совместных опытно-промышленных и внедренческих работ. Главмурманскстрою было бы целесообразно создать на базе ПО «Апатитстройиндустрия», где сосредоточена большая часть областных предприятий по выпуску строительных изделий и конструкций, отдел внедрения научных разработок».

После доклада О.Н. Крашенинникова состоялось активное обсуждение. Выступили: зам. директора ГОКа «Ковдорслюда» Г.В. Охотин; директор ГМК «Печенганикель» Э.Н. Климов; генеральный директор объединения «Мурманскстройматериалы» С.А. Кургузов; главный инженер ПО «Апатитстройиндустрия» Г.Д. Дымерец; первый зам. начальника «Главмурманстроя» Б.И. Юдин; и.о. зав. отделом экономических исследований КФАН СССР к.т.н. Н.Г. Пешев; зав. отделом технологии строительных материалов ИХТРЭМС КФАН СССР д.т.н. А.П. Афанасьев; зав. отделом науки и учебных заведений обкома КПСС к.г.-м.н. А.В. Барабанов; зав. отделом строительства обкома КПСС Г.Е. Иванов; зав. отделом тяжелой промышленности обкома КПСС В.И. Горячкин.

В постановлении Совета записано: признать целесообразным создание опытно-промышленных и модельных установок в составе строительных организаций и промышленных предприятий, а также организацию творческих групп, лабораторий, обеспечивающих проведение экспериментальных работ при научно-методической помощи ОТСМ ИХТРЭМС КФАН. Рекомендовать секции по строительству и стройматериалам усилить контроль за выполнением перспективного плана внедрения со стороны ответственных за реализацию предприятий и организаций.

11 января 1985 г. состоялось заседание Совета с основным вопросом в повестке дня «О работе по осуществлению энергосберегающей политики на предприятиях и организациях Мурманской области» (докладчик – председатель секции по энергетики, зав. отделом энергетики КФАН СССР д.т.н. И.Р. Степанов).

Кроме того, председатель секции по строительству и стройматериалам, зав. отделом строительства Мурманского обкома КПСС Ю.А. Евдокимов проинформировал Совет о работе секции.

Председательствовал зам. председателя Совета, секретарь Мурманского обкома КПСС В.Ф. Романенко.

Активно прошло обсуждение основного вопроса повестки дня. Выступили: главный энергетик ПО «Апатит» И.А. Писарев; главный специалист комбината «Североникель» О.А. Попов; главный энергетик ГМК «Печенганикель» В.Ф. Швец; главный инженер управления «Мурманскккоммунэнерго» В.К. Шелепов; главный энергетик Кандалакшского алюминиевого завода В.Ф. Прислонов; начальник обстатуправления И.В. Тюшев, управляющий РЭУ «Колэнерго» С.И. Гурьянов.

Подводя итог обсуждения, В.Ф. Романенко отметил[*]: «Из обсуждения данной проблемы мы видим, что резервов у нас колоссально много, и не позволяет нам наша совесть смотреть на эти резервы с перспективой в 20–30 лет. Мы должны заниматься этими резервами сегодня, вчера и каждый день. Я думаю, что секция энергетики и другие руководители секции сделают из этого выводы и с таких позиций будут подходить к этому вопросу. Что касается практических дел, то я думаю, что т. И.Р. Степанов сделает также выводы и как-то систематизирует работу, определит программу действий, и секция должна будет ежемесячно собираться и рассматривать эти вопросы. И если он свою энергию исчерпает, он подключит к этому делу другие организации, которые помогут решить те проблемы, которые намечаются. В решении необходимо записать: обратить внимание на недостатки и усилить требовательность и планирование работ и повышения эффективности в вашей практической деятельности по решению тех перспективных вопросов, которые намечены».

Доклад В.Т. Калинникова 11 февраля 1983 г. на заседании Совета по вопросу «О ходе выполнения отраслевых программ научно-технического прогресса на горных предприятиях Мурманской области»

– Мне бы хотелось в своем выступлении рассказать, как смотрятся сегодня комплексные программы глазами химиков и технологов и как они смотрелись на стадии формирования программ.

Прошел уже год. Что мы сегодня имеем в положительном балансе и какие недостатки, недоработки вскрыли? Думаю, что в этом состоит цель нашего сегодняшнего обсуждения.

Хотелось бы отметить, что программа послужила основой для резкой оптимизации и развития деловых творческих контактов с промышленными предприятиями нашей области, позволила показать наши потенциальные возможности, возможности академических институтов и критически их оценить. Что особенно важно, это то, что наши партнеры, т.е. с кем мы работаем, и до этого и в течение отчетного года не теоретически, а воочию убедились в том, что есть вопросы, в которых академическая наука очень сильна и не имеет себе конкурентов, и в то же время у нас есть очень слабые места – это опытно-промышленные испытания.

И здесь нужно просто помогать для того, чтобы решалась общая большая задача. И все с этим соглашаются, но мало кто на это по-деловому откликается. И вот работа над совместными программами здесь подтолкнула, в хорошем смысле слова, те предприятия, которые еще не имели такой идеологии, и если я здесь имею возможность сказать о некоторых успехах, то эти успехи в основном достигнуты за счет таких связок на базе создания пилотных установок. Наибольшие успехи достигнуты именно здесь. Сами по себе установки – это еще набор неких агрегатов, их должны обслуживать люди, и на стадии создания этих установок, запуска их, конечно, они должны обслуживаться комплексными бригадами из представителей и сотрудников института и соответствующих предприятий. По-другому быть не может, и у нас уже есть положительный опыт и по этой части, хотя и очень небольшой. Такие комплексные бригады желательно создавать между подразделениями институтов и сотрудниками соответствующих предприятий.

Я должен сказать, что работа над программами является постоянной, и мы продолжаем процесс корректировки планов, с ориентацией на решение конкретных проблем отраслей.

В основном мы выполняем те задания, которые были зафиксированы в плане, и если говорить о главных задачах, касающихся химиков-технологов, то здесь с точки зрения формулировки это звучит очень просто: *создание комплексной технологии сложного минерального сырья нашего полуострова*. Эта формулировка не нова и это задача на сегодня и на длительную перспективу.

[*] Здесь и ниже сохранены орфография, пунктуация и стиль первоисточника.

Сказав добрые слова в адрес такой формы сотрудничества, регламентируемой комплексными программами, утвержденными областным комитетом партии, позволю себе привести несколько примеров и скажу о некоторых сложностях.

Если пройтись по программам, составленным по важнейшим предприятиям области, то, начав с ПО «Апатит», отметим, что у нас здесь есть следующие интересные разработки. В прошлом году впервые были найдены условия вскрытия нефелина азотной кислотой с получением легкофильтрованной формы кремнистых осадков. Эти результаты имеют глубокое технологическое содержание, потому что это ключ к решению проблемы комплексной переработки нефелина, хвостов обогатительной флотации и бедных забалансовых руд с получением очень важных целевых продуктов, а именно глинозема, содопродуктов, либо селитр натрия и калия, доизвлечения фосфора.

…

Я должен сказать, что производственное объединение «Апатит» совместно с руководством Кольского филиала приняли решение о создании в 1983 г. модельной установки. Ей уже дано название «Глинозем», которая будет перерабатывать примерно 1 т нефелинового концентрата в сутки, с выдачей тех продуктов, которые я назвал. Это, конечно, исключительно важный для нас момент. Исходные данные на проектирование такой установки институтом уже выданы в конце прошлого года.

В начале 1982 г. нами были выданы исходные данные на проектирование другой установки для переработки сфенового концентрата на титано-кальциевый пигмент. Это небольшая пилотная установка, как этап к запуску опытной промышленной установки.

….

Я бы хотел остановиться на одной работе, которая может приобрести большой масштаб уже сегодня по своей функциональной нацеленности, я имею в виду довольно простой способ получения коагулянтов из того же самого нефелина при сернокислотной обработке. Дело в том, что коагулянты ПО «Апатит» приобретает каждый год, а на самом деле их можно производить у себя очень дешево и довольно просто. И вот сейчас мы находимся в стадии конкретных переговоров об организации производства коагулянтов.

…

В минувшем году я бы хотел отметить несколько разработок. По просьбе Ловозерского ГОКа сначала в лабораторных условиях были проведены исследования по переработке ловозерского апатита, содержащего большое количество редкоземельных элементов и стронция, по двум схемам – азотно-кислотной и фосфорно-кислотной. В июне месяце в Ревде было совещание Совета директоров, и на этом совещании было принято решение создать пилотную установку по фосфорно-кислотной переработке апатита с целевыми продуктами: редкоземельный концентрат, стронциевый концентрат и полифосфаты натрия – основного компонента моющих средств.

Короче говоря, институтом в довольно короткие сроки выданы исходные данные для проектирования пилотной установки. Она уже собрана и в начале марта должна быть запущена. Гиредмету будут выданы исходные данные на проектирование цеха по переработке этого апатита примерно 10 тыс. т в год. Это хорошие цифры. Если говорить не только о комплексной переработке сырья, но и материалах, которые уже имеют непосредственно функциональное применение, то Ловозерский ГОК может быть приведен в качестве положительного примера. По линии цеха щелочных металлов на этом предприятии производятся и материалы для электронной промышленности, производятся твердые электролиты. И наш институт сотрудничает с комбинатом по созданию твердого электролита не на основе серебра, который является очень дефицитным, а на основе меди. Не вдаваясь в детали, я скажу, что нам удалось получить такие составы, которые по своим технически характеристикам не уступают серебряному электролиту, и сейчас вопрос в том, чтобы довести это до промышленного масштаба.

На Ловозерском ГОКе имеется большое количество эгиринового концентрата, который в сочетании с другим минеральным сырьем может дать ценный материал, в частности это исходный материал для стройматериалов, для труб, обладающий коррозийной стойкостью и абразивной стойкостью. Вклад института может быть и не велик в создание таких функциональных изделий, но мы сделали разработки по изучению составов, получили небольшие образцы декоративных изделий, эта работа продолжается, на комбинате будет создан целый участок.

Работа с комбинатом «Североникель» проводится в следующих направлениях. Нами создана специальная группа по изучению процессов адсорбции сернистых газов. Ведется работа по изучению процессов адсорбции платиновых металлов из промстоков медно-никелевого производства. Проведен большой цикл работ, получены неплохие результаты, комбинату представлен соответствующий отчет, и мы оформляем эту работу как хоздоговорную.

Очень важная работа проводится по изучению кинетики восстановления закиси никеля с помощью безуглеродистых восстановителей. Эта работа сейчас ведется в лабораторных условиях.

…

Интересная работа, которая ведется по поручению зам. председателя Совета Министров СССР тов. Костандова совместно с Ковдорским ГОКом, Филиалом и несколькими институтами, – это разработка технологии плавленых магнезиальных фосфатов. В электропечи (г. Истра) производилась проплавка предварительной 40-тонной пробы. Было приглашено наше руководство.

…

Заканчивая выступление, я должен сказать, что работа над программами научно-технического прогресса продолжается. На подходе у нас несколько других программ, которые будут представлены соответствующим отраслям промышленности. Летом этого года был составлен и утвержден перспективный план совместных разработок по материалам стройиндустрии.

Выступление В.Т. Калинникова 9 апреля 1984 г. на заседании Совета по вопросу «О ходе реализации региональных программ научно-технического прогресса на горнодобывающих и металлургических предприятиях Мурманской области»

– Я должен выразить удовлетворение тем, что здесь были поставлены такие серьезные доклады от наших ведущих предприятий, с которыми мы сотрудничаем. Когда слышишь подряд все эти сообщения, то видны сразу перспективы и недостатки, над которыми нам предстоит работать. Что касается тех работ, которые выполняет Институт химии, то красной нитью нашего дела, нашего сотрудничества с предприятиями является создание технологии комплексной переработки уникального сырья с доведением до продуктов или полупродуктов. И как было сказано на последней встрече первого секретаря с сотрудниками Кольского филиала, нам нужно довести наше сотрудничество до того состояния, чтобы на каждом предприятии была создана пилотная установка, и не одна. Производственное объединение «Апатит», которое здесь очень скромно по этой части высказалось устами зам. главного инженера, может служить сегодня очень серьезным примером того, как очень много усилий, средств и внимания затрачено на создание технологии комплексной переработки. Объединение «Апатит» создало последовательно сфеновую пилотную установку, буквально на днях запущена с большим участием сотрудников института в рамках комплексных бригад установка «Глинозем». На днях приступили к опытно-промышленной установке «Сфен», где проверяются основные переделы технологии сфенового концентрата.

Мы благодарны руководству объединения «Апатит» за то, что они эту работу доводят до результатов.

…

Ловозерский комбинат сделал доклад четкий, краткий, но очень показательный в отношении того, как на комбинате относятся к науке, начиная с руководителя комбината и кончая сотрудниками на всех переделах. Действительно, каждая тема, которая записана в плане, находится в сфере постоянного контроля, не формального, а делового. Сотрудники непрерывно работают на комбинате, в том числе и в цехе чистых веществ. Здесь именно такая система и нужна. Одним порывом серьезные проблемы не решаются. Если есть система, можно говорить о каких-то результатах, можно подводить какие-то итоги и можно говорить о том, какая будет перспектива в конце года или в конце пятилетки. Я должен подчеркнуть, что, конечно, для того, чтобы испытывать технологию на стадии пилотной установки, нужно и самим технологам вырасти до этого уровня.

…

Я бы хотел закончить кратким напоминанием о том, что здесь Василий Михайлович сказал о первых результатах сотрудничества с комбинатом «Североникель» по некоторым новым темам. Здесь присутствуют представители и тех предприятий, где уже имеется положительный опыт внедрения технологии нанесения никелевых защитных покрытий и с помощью сотрудников Института химии. Этот опыт мы готовы распространять и дальше.

Надо отметить, что программа претерпела довольно значительные изменения в сторону ее пополнения новыми пунктами, которые предлагаются как с нашей стороны, так и со стороны предприятий. Все это, конечно, взвешивается, насколько это реально – и сами по себе задачи, и те сроки, которые мы ставим. Работа по таким программам нас, работников института, во многом обогащает, правильно ориентирует, хотя это нелегко, но моральное удовлетворение от того, что здесь получены какие-то результаты, мы получаем. Это для нас большая награда.

О формировании региональных целевых научно-технических программ Мурманской области в начале XXI века

В начале 2000-х гг. была предпринята попытка перейти от произвольного формирования тематики исследований и разработок самими научными организациями Мурманской обл. к программно-целевому планированию на основе потребностей региона [2]. Были разработаны три региональные целевые научно-технические программы Мурманской обл. на 2003, 2004–2005 и 2006–2008 гг., основанные на мероприятиях, где в качестве исполнителей фигурировали в основном только научные институты и высшие учебные заведения Мурманской обл. Лишь в региональной целевой программе «Развитие науки, научно-технической и инновационной деятельности в Мурманской области на 2006–2008 гг.» по проблеме «Разработка технологий рациональной эксплуатации природных ресурсов и технологического сырья в Мурманской области» по 4 мероприятиям из 47 в качестве исполнителей были указаны наряду с учеными также и производственные предприятия – это совместные работы Горного института КНЦ РАН с ОАО «Апатит»[*] и ОАО «Ковдорский ГОК»[**]. Постановления Правительства Мурманской обл. от 09.06.2008 г. № 261-ПП и 28.05.2009 г. № 224-ПП о разработке долгосрочных целевых программ «Развитие науки, научно-технической и инновационной деятельности в Мурманской области» соответственно на 2009–2011 и на 2010–2012 гг. так и остались невыполненными, аналогичных постановлений после этого не принималось.

[*] «Повышение эффективности получения апатитового концентрата из апатитонефелиновой руды за счет оптимизации температурного и реагентного режима флотации апатита из апатитонефелиновой руды на оборотной воде» (п. 1.4.6) и «Развитие системы диагностики геологической среды на рудниках ОАО «Апатит» (п. 1.4.42).

[**] «Совершенствование технологии производства апатитового и бадделеитового концентрата на Ковдорской обогатительной фабрике и вовлечение в производство нового вида минерального сырья» (п. 1.4.5) и «Разработка системы геодинамического мониторинга на ОАО «Ковдорский ГОК» (п. 1.4.43).

Есть надежда, что в своем новом статусе возрожденный объединенный Кольский научный центр, опираясь на славные вехи своей истории, сумеет поднять на новый уровень интеграцию науки и производства в Мурманской обл.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Виноградов А.Н.* Изучать Арктику нужно сообща. Для этого готовится программа восстановления потенциала Кольского научного центра // Мурманский вестник. 2014. 18 дек. **2.** *Алимов А.Н., Маслобоев В.А.* Государственная инновационная политика Мурманской области и инновационный потенциал региона. URL: http://www.kolasc.net.ru/russian/innovation_ksc/vved.pdf.

Сведения об авторе

Тараканов Михаил Афанасьевич – старший научный сотрудник Института экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАН; e-mail: tarakanov@iep.kolasc.net.ru

УДК 004.932.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА «ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»*

А.Г. Олейник[1,2], А.В. Харитонов[3]
[1]Институт информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН
[2]Петрозаводский государственный университет, Кольский филиал
[3]Поволжский государственный технологический университет

Аннотация

Представлены результаты исследований по развитию методов компьютерной обработки цифровых изображений радужной оболочки глаза (РОГ) с целью их использования для биометрической идентификации пользователей в распределенных системах поддержки управления развитием территорий. Разработаны: методика и алгоритмы оперативного выделения зрачка на изображении РОГ; алгоритмы шифрования данных биометрической базы для предотвращения попыток подделки при компрометации данных; рекомендации по использованию технологий идентификации пользователей по РОГ в распределенных системах поддержки управления.

Ключевые слова:

биометрическая идентификация, радужная оболочка глаза, обработка изображения, защита информации, структура системы идентификации.

Введение

В Институте информатики и математического моделирования (ИИММ) КНЦ РАН проводятся исследования и разработка методов, моделей, технологий и систем, направленных на формирование целостной распределенной среды информационно-аналитической поддержки развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Важными особенностями указанных территорий являются динамичность и организационно-технологическая разнородность потенциальных пользователей формируемой информационно-аналитической среды, в качестве которых рассматриваются субъекты хозяйственной деятельности в АЗРФ. В связи с этим создаваемая среда должна обладать открытостью и адаптивностью. Системное решение задач управления АЗРФ требует интеграции разнородных информационных ресурсов и сервисов в рамках единой виртуальной среды и их совместного использования в процессе принятия решений. В то же время геополитическое положение АЗРФ и связанный с ним характер информации, которая должна быть представлена в информационно-аналитической среде, определяют актуальность решения задач регламентации доступа к ряду компонентов этой среды, основанной на надежной

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-37-50432 мол_нр).

идентификации пользователей. Перспективное направление в данной области – применение биометрических технологий. Распространение устройств, позволяющих «считывать» биометрические характеристики пользователя, обеспечивает возможность широкого применения методов биометрической идентификации пользователей и в распределенных динамических системах. Этим была обусловлена актуальность проведения в ИИММ КНЦ РАН работ по проекту «Исследование методов и алгоритмов защиты информации на основе биометрической идентификации личности пользователя в системах информационного обеспечения развития территорий Арктической зоны Российской Федерации», получившему поддержку РФФИ в 2014 г.

В качестве биометрического показателя в исследовании рассматривалось изображение радужной оболочки глаза. Выбор РОГ обусловлен, помимо уникальности рисунка, большой информативностью признаков РОГ и малой зависимостью рисунка РОГ от возраста.

Алгоритмы формирования и анализа цифровой модели радужной оболочки глаза

Несмотря на активные исследования в области распознавания личности по РОГ, существующие алгоритмы и системы распознавания имеют значимые недостатки. В связи с этим одна из задач исследования заключалась в разработке и создании алгоритмов обнаружения поддельного биометрического образца, предъявляемого биометрической системе идентификации личности по РОГ. В ходе исследования также решалась задача разработки методов шифрования данных биометрической базы для предотвращения попыток подделки при компрометации данных. Задачи интеграции технологий идентификации пользователей по РОГ в распределенные системы поддержки управления включают анализ ограничений на качество получаемого для идентификации изображения, а также определение требований и методов обеспечения безопасной передачи данных изображений в распределенных сетях.

Общая схема решения задачи идентификации личности по радужной оболочке глаза сводится к следующим шагам:

1) получение исходного изображения и его предобработка;
2) выделение радужной оболочки на изображении;
3) нормализация радужной оболочки;
4) параметризация радужной оболочки;
5) занесение полученного кода радужки в базу или сравнение полученного кода с кодами из базы данных.

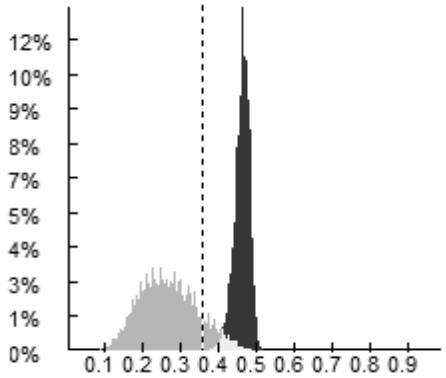
Выделение зрачка и радужной оболочки есть ключевой шаг всей системы идентификации, так как неверно или неточно определённые границы приведут к захвату сторонних областей и, как следствие, к увеличению ошибки при сравнении с эталонами в базе. Поиск границы зрачка на изображении глаза – одна из подзадач выделения радужной оболочки. Для ее решения в рамках проекта разработан оригинальный алгоритм, позволяющий локализовать зрачок на изображении глаза за приемлемое время. Алгоритм включает следующие этапы:

1) фильтрация шумов на исходном изображении;
2) дискретизация изображения и определение средней яркости каждого элемента;
3) бинаризация изображения с заданным порогом;
4) определение «области интереса» для поиска зрачка;
5) с учетом области интереса применяется преобразование Хафа.

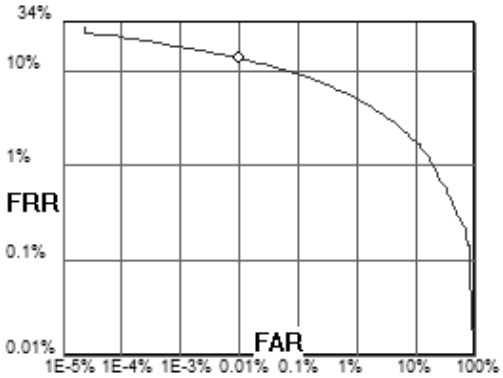
Этапы 2–4 обеспечивают существенное сокращение области изображения, подвергающейся обработке с использованием преобразования Хафа для выявления округлой части границы зрачка. Более подробно разработанный алгоритм представлен в работе [1].

Этот алгоритм программно реализован и прошел экспериментальную проверку. Для проведения экспериментов использованы изображения, хранимые в базе данных CASIA-Iris-Twins V4, представленной на сайте CBSR (Center for Biometrics and Security Research) [2] В ходе экспериментов обработано 3183 изображения, каждое из которых имело размер 640×480

пикселей. На рис. 1 и 2 приведены ROC (от англ. receiver operating characteristic) кривые системы идентификации и распределения расстояния Хэмминга для двух алгоритмов выделения зрачка. ROC кривая представляет собой график соотношения между показателями ошибок ложного отказа FRR (от англ. False Rejection Rate) и ошибок ложного допуска FAR (от англ. False Accept Rate), позволяющий оценить качество бинарной классификации. Одним из рассматриваемых алгоритмов был алгоритм, реализующий популярный метод Даугмана [3], вторым – метод, предложенный в данном проекте. На представленных изображениях серая область соответствует идентичным РОГ, а черная – разным. В небольшую светлую область на пересечении серой и черной областей попадают как идентичные, так и разные РОГ. Как видно, уровень ошибки ложного отказа FRR для предложенного метода снизился, значит, повысилась точность выделения радужной оболочки глаза. Достаточно высокое значение FRR (>10 %) связано с особенностью самих обрабатываемых изображений: большая доля глаз на изображениях закрыта ресницами и/или веками, что уменьшает полезную площадь РОГ.

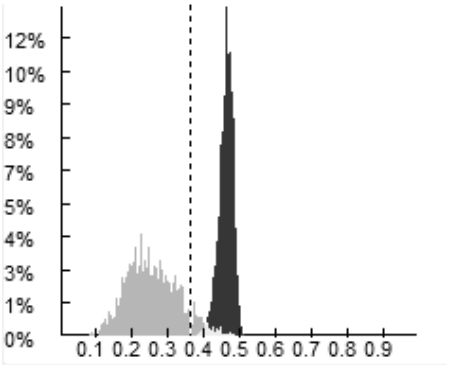


Распределение HD: серый цвет – идентичные РОГ; черный цвет – различные. Граница Хэмминга = 0.357

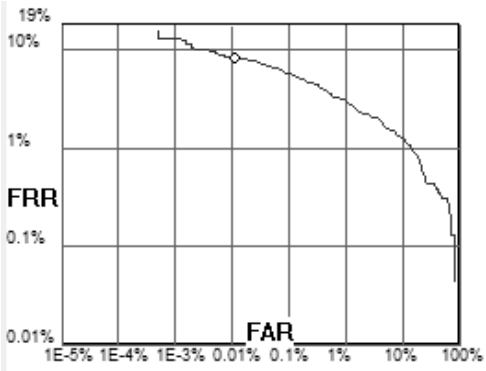


Кривая ROC. FAR=10^{-4}, FRR=13.4 %. Среднее время выделения РОГ = 205 мс

Рис. 1. Характеристики точности распознавания для системы, использующей алгоритм Даугмана для выделения зрачка



Распределение HD: серый цвет – идентичные РОГ; черный цвет – различные. Граница Хэмминга = 0.364



Кривая ROC. FAR=10^{-4}, FRR=8.38% Среднее время выделения РОГ = 162 мс

Рис. 2. Характеристики точности распознавания для системы, использующей предложенный алгоритм выделения зрачка

Предложенный в проекте метод выделения РОГ наиболее эффективен при использовании изображений, полученных в инфракрасном диапазоне, так как в этом случае регион минимума яркости гарантированно попадает в область зрачка, что существенно облегчает задачу поиска. При использовании изображений, полученных в видимом спектре, зрачок может быть светлее бровей и ресниц, что повлечет ложное определении зрачка. Это вносит определенные ограничения в использование предложенного метода для идентификации пользователя по изображению его глаза, получаемому с помощью типовых web-камер и камер мобильных устройств. Для получения устойчивого достоверного результата необходимо обеспечить условия освещения, в которых на радужной оболочке глаза не будут присутствовать блики и не будет происходить засвечивание зрачка с эффектом «красных глаз», что и приводит к ситуации, когда зрачок светлее бровей и ресниц.

Задача биометрической идентификации по РОГ не ограничивается выделением изображения РОГ и сопоставлением полученного изображения с имеющимися в базе системы образцами. Обязательным условием эффективной работы системы биометрической идентификации является ее устойчивость к атакам, а также возможность выявления таковых и противодействия им. Атаки могут быть ориентированы на различные компоненты системы биометрической идентификации: «обман» сенсора, принимающего изображение или сигнал от индивидуума; атака на базу данных, в которой хранятся биометрические шаблоны; атаки на модули сравнения и принятия решений.

Основную угрозу на уровне сенсора представляют так называемые атаки спуфинга (от англ. spoofing – подмена), когда путем предоставления биометрическому сенсору копий биометрического образца происходит попытка обмана биометрической системы.

Содержательный обзор методов борьбы с подделкой (или определения живости глаза) представлен в диссертационной работе И.А. Матвеева [4]. В настоящее время используются следующие методы:

• анализ спектра отраженного света от поверхности глаз – наиболее популярен в связи со скрытой возможностью проверки. Не лишен недостатков: на изображение или муляж можно нанести состав, по отражающей способности сравнимый с настоящим глазом;

• исследование пупиллограммы – изменения зрачка в зависимости от яркости освещения;

• исследование непроизвольных движений глазного яблока и зрачка. Не дает гарантии подлинности, так как не свойственен некоторым людям (движения происходят редко или выражены неявно);

• анализ спектра Фурье;

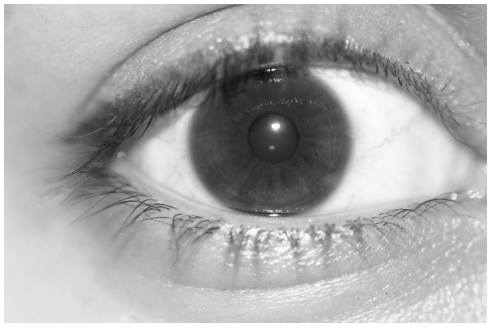
• поиск эффекта Пуркинье.

• освещение глаза случайно выбранными светодиодами и дальнейшая проверка их отражений на получаемых кадрах видеосъемки.

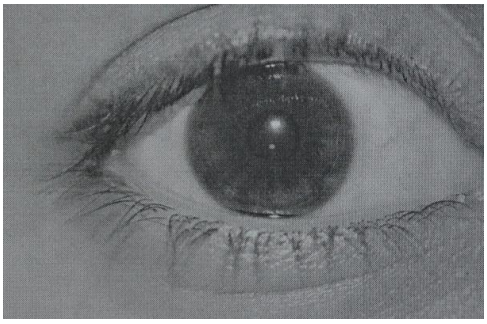
Подделать радужную оболочку глаза можно несколькими способами: использовать фотографию, видеозапись, муляж глаза, контактные линзы. В проекте рассматривался относительно простой и, как следствие, распространенный вариант подделки изображения с помощью печати. Изображения могут быть напечатаны на лазерных и струйных принтерах. Причем для камер инфракрасного диапазона тонер струйных принтеров не виден, поэтому для случая работы в диапазоне ближнего инфракрасного света имеет смысл рассматривать «подделки», выполненные с помощью лазерных принтеров. Известно, что при печати изображений лазерными принтерами происходит слипание зерен краски и появляются характерные полосы и зернение. Именно этот признак стоит искать при оценке предъявляемого глаза на живость. Для определения зернения предлагаются несколько способов.

Один из простых, быстрых и достаточно надежных способов – определение повышенного числа границ на поддельных изображениях. Для этого с применением оператора Собеля определяется матрица градиентов. Для изображений строится гистограмма распределения градиентов (рис. 3). Вертикальная линия отделяет зону гистограммы, левее которой находится

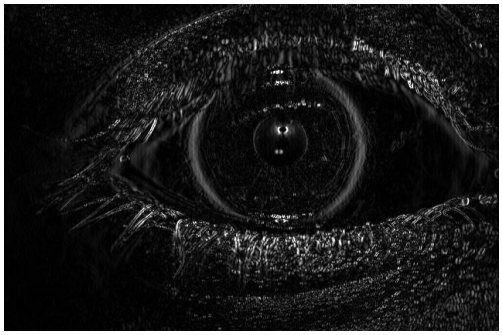
85 % значений градиентов. При этом поддельные изображения будут обладать характерным сдвигом гистограммы градиентов в область высоких значений – границ с высоким перепадом яркости. Классифицировать поддельное изображение можно по отклонению характеристик его гистограммы от усредненных для заведомо реальных изображений глаза.



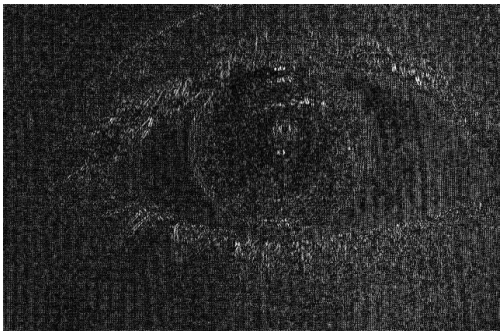
Реальное изображение



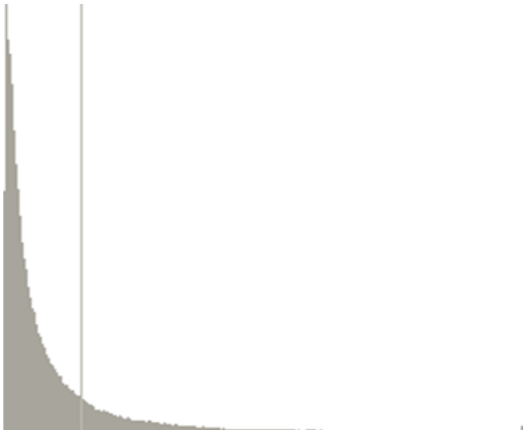
Напечатанное изображение



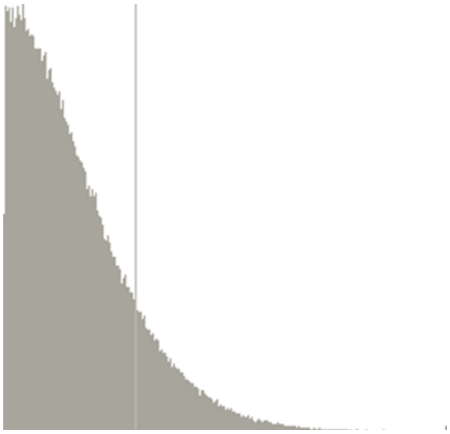
Изображение градиентов
для реального изображения



Изображение градиентов
для поддельного изображения



Гистограмма градиентов
для реального изображения
а



Гистограмма градиентов
для поддельного изображения
б

Рис. 3. Пример сравнения реального (а) и поддельного (б) изображений

Проведенные эксперименты показали, что расстояние Хэмминга для кодов радужных оболочек, полученных для эталонного изображения и этого же изображения, распечатанного на лазерном принтере, превышает порог, позволяющий утверждать, что радужные оболочки идентичны. Метод анализа градиентов можно использовать для пресечения попыток предъявления подделок при использовании сенсоров, работающих в инфракрасном диапазоне.

В атаках на системы биометрической идентификации с сенсорами, работающими в диапазоне видимого света, могут использоваться изображения глаза, распечатанные на струйном принтере. Вследствие высокого разрешения и качества печати на таком изображении проблематично определить зернистость и отдельные точки. Поэтому описанный выше метод здесь не подходит.

Универсальный метод оценки живости глаза дает анализ изменения радиуса зрачка от времени при определенных воздействиях. Кривая, описывающая зависимость радиуса зрачка от времени, называется пупиллограммой (рис. 4). Пупиллограмма характеризует психофизическое состояние человека. При условии, что он здоров и хорошо себя чувствует, пупиллограмму можно использовать в качестве дополнительного параметра идентификации.

Процедура оценки живости глаза на основе пупиллограммы включает четыре этапа:

1) начальное фиксирование изображения глаза и определение параметров зрачка и радужки;

2) подача синхронизированного «раздражающего» сигнала, например светового;

3) фиксация изменений диаметра зрачка на последовательности кадров видеоряда отслеживания;

4) оценка изменения размеров зрачка и вывод о живости глаза.

При исследовании пупиллограммы необходимо отбраковывать кадры, на которых происходит мигание. Для этого последовательность изображений представляется как медленно изменяющаяся сцена, на которой можно определить движение отдельных элементов. Такими элементами могут быть: веки, зрачок, вся сцена при смещении относительно камеры. После подачи светового сигнала фиксируется первый кадр, на нём определяется положение радужки. Выделенная радужка запоминается для дальнейшего поиска на последовательности видеоряда. Путем вычитания предыдущего и следующего кадров в области радужки получаем маску пикселей, которые были изменены; это и иесть изменяющаяся граница радужной оболочки. Затем достаточно оценить новые значения радиусов зрачка и радужной оболочки глаза.

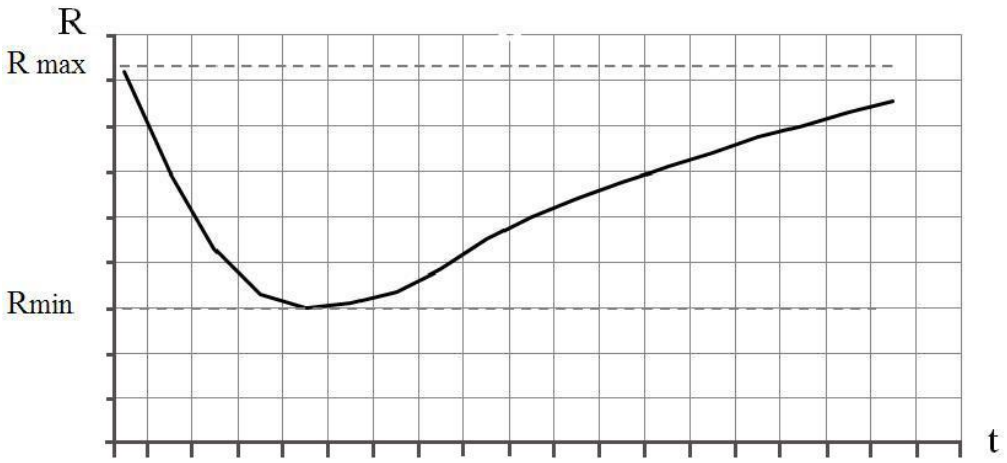


Рис. 4. Кривая пупиллограммы. Rmax – максимальный радиус зрачка, Rmin – минимальный радиус зрачка

Метод и алгоритмы шифрования и дешифрации кода образа РОГ для модулей идентификации пользователей

Важный вопрос безопасности биометрической системы – защита базы данных, хранящей биометрические данные пользователей. В случае компрометации этих данных злоумышленник может попытаться восстановить рисунок радужной оболочки глаза и предъявить его сканеру радужной оболочки. Другой вектор атак направлен на подмену пакетов данных, транслируемых между сенсором и базой данных (а также блоком принятия решений), реализуя атаку «Man in the middle» (MITM-атаку) [5].

В базах данных любые пароли или идентифицирующие данные хранятся в виде хэш-кодов. Это позволяет обезопасить систему даже в случае взлома и получения доступа к паролям. Поскольку хэш-функция однонаправленна, злоумышленник затратит много времени для подбора пароля. Однако хранить в базе биометрические образцы, зашифрованные хэш-функциями, не представляется возможным, поскольку сопоставление биометрических образцов происходит не по однозначному совпадению, а по наименьшему различию (расстояние Хэмминга). В случае хэш-функций различие хотя бы в одном бите приведёт к другому результату.

Для надёжной защиты базы данных биометрических образцов от возможной компрометации предлагается использовать метод симметричного шифрования с помощью шифра Вернама [6], а также скремблирование. Использование блочных кодов прибавляет вычислительные затраты, так как для сравнения необходимо иметь оригинал кода радужной оболочки, следовательно, всю базу данных следует расшифровать для одного сравнения. Код радужной оболочки глаза представляет собой битовую последовательность длиной 2048 бит. Мерой схожести двух радужных оболочек (их кодового представления) выступает нормированное расстояние Хэмминга. Следовательно, скремблирование к процедуре идентификации прибавит дополнительную операцию сложения по модулю 2 (исключающее или) с секретным ключом.

Рассмотрим шифр Вернама. Пусть $M = \{m_0,..., m_{n-1}\}$ представляет собой сообщение, где $m \in \{0, 1\}$ – бит, n – длина сообщения в битах; $K = \{k_0,...,k_{n-1}\}$ – ключ. Тогда шифрованное сообщение E вычисляется следующим образом: $E = K \oplus M$, где $\oplus$ – побитовая операция сложения по модулю 2 (XOR).

Дешифрование осуществляется с помощью того же ключа: $D = K \oplus E$.

Сообщение D эквивалентно сообщению M. Клодом Шенноном [6] доказана абсолютная стойкость шифра Вернама. Существует ряд особенностей его использования: шифр должен быть случайным; шифр должен совпадать с исходным текстом; шифр должен применяться один раз. При условии надежного хранения шифра, его можно применять многократно с периодической заменой.

Мерой случайности выступает корреляционная функция:

$C_k(S) = \sum_{i=0}^{N-1-k} s_i s_{i+k}$ $k = (1,...,N\text{-}1)$, где $S = (s_0,...,s_{N-1})$ – бинарная последовательность, каждый элемент которой $s_i \in \{0, 1\}$.

Подходящие бинарные последовательности с автокорреляционной функцией $C_i = \begin{cases} N & i = 0 \\ -1 & i \neq 0 \end{cases}$ эквивалентны циклическим разностным множествам, которые обычно определяются как разностные множества Пэлейя – Адамара.

Для генерации псевдослучайных последовательностей при участии исполнителей данного проекта разработан программный комплекс «Like-noise signals» [7].

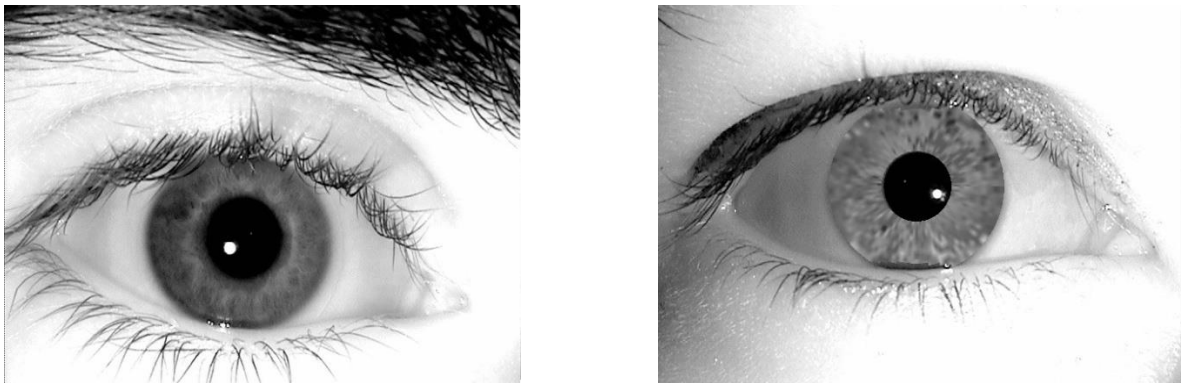
Получив доступ к базе биометрических данных, злоумышленник не сможет по коду радужной оболочки воссоздать нужный рисунок. Мера схожести воссозданного изображения с оригиналом превысит допустимый порог, так как в схему идентификации добавляется звено

сложения с секретным ключом (рис. 5). В результате идентификация не пройдёт. Кроме того, осуществив сравнение кода радужки полученного без использования секретного ключа, можно выявить попытку подделки изображения.

Для предотвращения MITM-атаки необходимо использовать безопасную передачу сообщений. Следует особо отметить, что предложенная схема шифрации и дешифровки достаточно проста с вычислительной точки зрения и не накладывает на систему биометрической идентификации дополнительных затрат по ресурсам и времени.

Для обеспечения безопасности передачи биометрических данных по сети используются различные комбинации вариантов шифрования канала передачи и сообщений.

Разработанные схемы противодействия атакам на биометрическую систему делают последнюю надёжным средством биометрической идентификации.



а *б*

Рис. 5. Изображение радужки: а – настоящее; б – сгенерированное

Требования к характеристикам устройств получения изображения РОГ, используемых для идентификации пользователей

Важный фактор эффективной работы системы идентификации пользователей по РОГ – качество предъявляемого изображения, так как им во многом определяется полученный код радужной оболочки и результат сравнения с эталонами в базе.

Качество цифрового изображения зависит от характеристик снимающей системы и условий освещенности. Одной из основных характеристик выступает разрешение получаемого изображения. Существующие биометрические базы данных, используемые для разработки и тестирования технологий биометрической идентификации, содержат изображения различных разрешений (от 320×280 до 2048×1360 px и выше). Однако для задач биометрической идентификации следует выбрать средний размер изображений, позволяющий добиться нужного соотношения между ошибками ложного допуска FAR и ложного отказа FRR и временем обработки информации. Экспериментальным путем выявлено, что для обеспечения ошибки первого рода FAR = 10^{-4} достаточно использовать изображения с минимальным разрешением 320×280 px, но лучший результат можно получить при разрешении 640×480 px. В частности, экспериментальное сравнение результатов обработки изображений 320×280 и 160×140 px показало, что ошибка FRR (при одинаковой ошибке FAR) для изображений с меньшим разрешением увеличилась с 4.93 до 6.04 %. Одновременно незначительно сократилось время локализации радужной оболочки глаза (с 72 до 61 мс). За счет уменьшения изображения в 2 раза (с 640 до 320 px) время локализации РОГ сократилось в 3.7 раза, но рост скорости локализации РОГ нельзя рассматривать как преимущество в связи с ухудшением качества идентификации в целом.

Важными показателями, определяющими пригодность изображения к дальнейшей обработке, служат резкость и контрастность изображения. Под резкостью изображения понимается степень размытости границ между соседними частями разной яркости. Резкость в основном достигается выставлением правильного фокусного расстояния при съемке. Контраст показывает разницу между темными и светлыми частями изображения. Улучшить изображение с малым контрастом возможно с помощью процедуры контрастирования.

Возможность работы сенсора в ближнем инфракрасном диапазоне позволяет повысить эффективность идентификации по РОГ, поскольку меланин, придающий окраску РОГ, пропускает данный вид излучения, и темные РОГ становятся светлыми, что улучшает качество локализации в частности и показатели системы идентификации в целом.

Для экспериментов, выполняемых в рамках проекта, использована база биометрических данных Utiris [8]. В ней представлены изображения, полученные в двух диапазонах – инфракрасном и видимом. Для изображений, снятых в видимом спектре света, ошибка FRR составляла 77.1 % (против 14.4 % – в инфракрасном), что вместе с увеличенным временем локализации РОГ говорит о существенном снижении качества распознавания для всей системы.

На основе проведенных исследований можно сформировать следующие требования к устройствам получения изображения РОГ для систем биометрической идентификации личности:

1) разрешение сенсора должно обеспечивать получение изображения, на котором минимальный размер области глаза будет равняться 640×480 px;

2) фокусное расстояние сенсора должно соответствовать расстоянию до РОГ. Это достигается либо использованием окуляра, либо использованием сенсора с автофокусом;

3) изображение, получаемое сенсором, должно иметь диапазон яркости 8 бит на канал [0; 255];

4) для получения лучшего результата (наименьшей ошибки второго рода при одинаковой ошибке первого рода) сенсор должен работать в диапазоне ближнего инфракрасного излучения. При этом осветительную систему следует расположить так, чтобы на изображении гла́за были минимизированы области бликов (при расположении осветителя вблизи камеры блики локализуются в зрачке; если расположить осветитель внизу камеры, то на изображении РОГ не будет теней от верхних ресниц);

5) соотношение сигнал/шум системы должно быть максимальным для получения качественного изображения РОГ;

Требования к регистрируемому изображению РОГ:

1) изображение РОГ считается изображением высокого качества, если радиус РОГ превышает 200 px; среднего – если радиус РОГ лежит в пределах [150; 200] px; низкого – если радиус РОГ лежит в пределах [100; 150] px;

2) закрытость РОГ ресницами и веками не должна превышать 35 %;

3) отношение длины РОГ к ее радиусу не должно быть меньше 35 %;

4) наилучшим с точки зрения освещенности РОГ на изображении является центральное расположение в кадре;

5) при получении изображения РОГ требуется расположить сенсор перпендикулярно «плоскости» глаза. Допустимы небольшие углы поворота головы, при которых радужная оболочка остается на месте. Для больших углов поворота необходимо применить сдвиги нормированного изображения РОГ для поиска максимального соответствия шаблону.

6) очки и контактные линзы негативно влияют на качество работы системы идентификации по РОГ.

Повысить качество распознавания и увеличить количество распознаваемых пользователей позволяет использование при идентификации информации обоих глаз пользователя одновременно. Это резко снижает ошибку ложного доступа: для одного глаза $FAR = 10^{-5}$, а для обоих глаз $FAR = 10^{-10}$.

Варианты интеграции методов идентификации личности по РОГ в системы информационного обеспечения развития территорий

Биометрическая идентификация в системах информационного обеспечения развития территорий Арктической зоны Российской Федерации может быть использована:

• для регламентации физического доступа к объектам, включая точки доступа к защищаемым информационным ресурсам;

• для регламентации логического доступа к данным – ролевое разграничение прав пользователей на доступ к информации и ресурсам;

• для использования в качестве ключа для менеджера паролей;

• для организации доступа к конфиденциальной информации исключительно на фиксированном рабочем месте.

Одна из проблем практического использования систем биометрической идентификации на основе РОГ состоит в необходимости применения качественных сенсоров для получения изображения РОГ. Типовые современные устройства получения изображений (web-камеры, фотокамеры сотовых телефонов и планшетов) могут иметь только ограниченное применение в таких системах по следующим причинам:

1) данные устройства работают в видимом диапазоне;

2) возникает трудность при ранжировании устройств по качеству получаемого изображения в связи с различным от устройства к устройству качеством матриц и оптики;

3) трудно обеспечить необходимые условия освещенности и позиционирования объектов съемки.

Все это ведет к высоким показателям ошибок идентификации, что неприемлемо при организации доступа к конфиденциальной информации. Кроме того, при использовании биометрии для организации логического доступа и эквивалента ключа менеджера паролей из неконтролируемых мест (дом, кафе, улица) возможен насильственный метод предъявления биометрического образца и осуществление несанкционированного доступа.

Базовой архитектурой системы биометрической идентификации личности является клиент-серверная архитектура, обеспечивающая независимые обращения базовых станций к обслуживающему серверу. На клиентской стороне обеспечивается получение изображения и его предобработка, поиск по базе данных и принятие решения об идентификации осуществляется на стороне сервера.

Таким образом, на стороне сервера работают:

• поисковая подсистема, обеспечивающая сравнение кодов РОГ в режиме идентификации и верификации. Процесс обработки целесообразно организовать по технологии параллельных вычислений;

• подсистема хранения данных, которая состоит из дисковых накопителей и сервера базы данных, обеспечивающего поддержание системы в актуальном состоянии;

• подсистема коммуникации, обеспечивающая взаимодействие узлов системы между собой и станциями удаленного доступа.

В зависимости от масштабов и «важности» системы биометрической идентификации для сервера базы данных может потребоваться кластерное исполнение, обеспечивающее поддержание непрерывной работоспособности системы. При отказе одного из серверов, входящих в кластер, происходит «горячий» подхват задач и используемой логической адресации выбывшего устройства резервным. Дисковая подсистема сервера БД организуется в виде raid-массива (от англ. redundant array of independent disks) дисков, предотвращая потерю данных.

Для реализации клиент-серверной архитектуры приложения в настоящее время хорошим выбором будет использование фреймворка Windows Communication Foundation (WCF) [9] от Microsoft. Он создан для обеспечения универсальной модели программирования распределенных вычислений, с помощью которого можно отправлять данные в виде

асинхронных сообщений от одной конечной точки службы к другой. Преимуществом такой технологии является простой способ коммуникации между клиентом и сервером.

Клиент представляет собой программу на стороне пользователя, которая обеспечивает предобработку предъявляемого изображения РОГ и взаимодействие с серверной частью.

Несмотря на высокую надёжность биометрической системы идентификации личности по РОГ, она не лишена ошибок ложного срабатывания. Значимое ограничение на массовое использование биометрических сенсоров – их достаточно высокая стоимость. На сегодняшний день цена персонального сенсора, готового для подключения к компьютеру, в среднем составляет 200–300 долл. США. Поэтому экономически целесообразен описанный выше вариант использования систем биометрической идентификации по РОГ для регламентирования физического доступа к компьютерам, работающим с защищаемыми информационными ресурсами. Возможен вариант установки более дешевых («упрощенных») решений на рабочем месте в рамках технологий двухфакторной авторизации, чтобы минимизировать риски. В любом случае при принятии решений о внедрении систем биометрической идентификации необходимо руководствоваться правилом, определяющим, что затраты на защиту информации не должны превышать ценности защищаемой информации.

Заключение

В результате выполнения проекта разработан метод выделения зрачка, позволяющий с высокой точностью его локализовать на изображениях глаза. Поиск на изображении глаза региона с минимальной яркостью позволяет достоверно определить точку, лежащую внутри зрачка, что значительно сокращает время поиска. Указанный подход может давать грубую оценку местоположения зрачка с целью дальнейшего уточнения его параметров.

Проведены экспериментальные исследования метода противодействия подделкам предъявляемого для идентификации изображения на основе гистограммы градиентов. Этот метод обеспечивает полную разделимость изображений реальных и поддельных глаз. Однако распечатанные на лазерном принтере изображения глаз не представляют угрозы, поскольку высокий уровень шумов искажает рисунок радужной оболочки глаза и не позволяет пройти проверку по критерию расстояния Хэмминга. Более надежно для проверки живости глаза исследование его пупилограммы – реакции зрачка на внешние световые раздражители. Для этого необходимо непрерывное наблюдение за глазом на протяжении нескольких секунд, что ограничивает широкое применение метода.

Предложен метод шифрования биометрических данных для хранения в базе данных с использованием псевдослучайных последовательностей. Для генерации псевдослучайных последовательностей различных длин и линейной сложности разработан программный комплекс «Like-noise signals». Достаточно простая схема шифрации и дешифровки не накладывает на систему биометрической идентификации дополнительных затрат по ресурсам и времени.

Определены требования к устройствам получения пригодных для идентификации изображений радужной оболочки глаза. Для высокого уровня точности распознавания необходимо использовать фотосенсоры, работающие в ближнем инфракрасном спектре. Ограниченность использования сенсоров (фотокамер), работающих в видимом диапазоне спектра, обусловлена чувствительностью к цвету глаз и бликам от источников освещения. Выработаны рекомендации по условиям съемки для получения изображения необходимого качества.

Рассмотрены возможные варианты использования технологии биометрической идентификации личности в системы информационного обеспечения развития территорий Арктической зоны Российской Федерации. Предложена архитектура системы и технология её построения на базе решения от компании Microsoft. Фреймворк WCF позволяет упростить процесс создания клиент-серверных приложений, а также взаимодействие между разработанными распределёнными приложениями.

ЛИТЕРАТУРА
1. *Харитонов А.В. Олейник А.Г.* Метод определения границы зрачка на изображении глаза // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. Вып. 5. С. 171–177. **2.** Сайт CBSR – Center for Biometrics and Security Research. URL: http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris%20Databases%20CH.asp. **3.** John Daugman's webpage / Cambridge University, Faculty of Computer Science & Technology. URL: http://www.cl.cam.ac.uk/~jgd1000/. **4.** *Матвеев И.А.* Методы и алгоритмы автоматической обработки изображений радужной оболочки глаза: дис. … докт. техн. наук: 05.13.11. М., 2014. 290 с. URL: http://www.ccas.ru/avtorefe/0012d.pdf. **5.** Man in the middle attacks Demos / *Alberto Ornaghi, Marco Valleri* // Blackhat Conference – USA 2003. URL: https://www.blackhat.com/presentations/bh-usa-03/bh-us-03-ornaghi-valleri.pdf. **6.** *Shannon C.* Communication Theory of Secrecy Systems // Bell System Technical J. 1949. Vol. 28(4). P. 656–715. **7.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Like-noise signals» № 2011610941. 25.01.2011 / *А.Н. Леухин и др.* **8.** University of Tehran IRIS (UTIRIS). Iris image database. Availabl e from. URL: http:// utiris.wordpress.com. **9.** MSDN – сеть разработчиков Майкрософт. URL: http://msdn.microsoft.com/ru-ru/default.aspx.

Сведения об авторах

Олейник Андрей Григорьевич – д.т.н., зам. директора по научной работе Института информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН; зав. кафедрой информационных систем и технологий, Кольский филиал Петрозаводского государственного университета; e-mail: oleynik@iimm.ru

Харитонов Андрей Васильевич – программист сектора интернет-технологий ЦНПТ «РИТМ» Поволжского государственного технологического университета; e-mail: kharitonov.a.v@yandex.ru

НАУЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ, ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ ИНСТИТУТАМИ КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН НА 2015 г.

● III Конференция научных обществ, посвященная Дню науки

Апатиты, Геологический институт, февраль, 1 день.

Число участников – 100.

● 38-й Ежегодный Международный семинар «Физика авроральных явлений»

Апатиты, Полярный геофизический институт, конец февраля – начало марта, 4 дня.

Число участников (в том числе иностранных) – 100 (5).

Финансирующая организация – РФФИ.

● VI Научно-практическая конференция «Теория и практика системной динамики»

Апатиты, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов, март, 4 дня.

Число участников – 60.

Финансирующая организация – РФФИ, МОН Мурманской области.

● XII Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия

Апатиты, Геологический институт, апрель, 3 дня.

● Школа-семинар «Полярные процессы в атмосферах планет»

Апатиты, Полярный геофизический институт, апрель, 4 дня.

Число участников (в том числе иностранных) – 25 (2).

● XV Международная научная конференция студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона»

Мурманск, Мурманский морской биологический институт, май, 1 день.

Число участников (в том числе иностранных) – 200 (10).

● Рабочее совещание «Состояние и перспективы развития геофизических исследований на архипелаге Шпицберген»

Пос. Баренцбург (арх. Шпицберген, Норвегия); Апатиты, Полярный геофизический институт, июнь, 7 дней.

Число участников (в том числе иностранных) – 15 (2).

● *Международное* совещание «Проблемы изучения и сохранения растительного мира Восточной Фенноскандии»

Кировск, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, июнь, 5 дней.

Число участников (в том числе иностранных) – 100 (20).

Финансирующая организация – ФАНО.

● Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Уникальные геологические объекты Кольского полуострова»

Апатиты, Геологический институт, июль, 3 дня.

Число участников: всего (в том числе иностранных) – 50 (20).

● III Всероссийская молодежная полевая школа-семинар с международным участием «Современные проблемы озеленения урбанизированных территорий в северных регионах»

Кировск, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, август, 5 дней.

Число участников (в том числе иностранных) – 40 (5).

Финансирующая организация – ФАНО.

● III Всероссийская научная конференция «Биоразнообразие и культуроценозы в экстремальных условиях»

Кировск, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, август, 3 дня.

Число участников (в том числе иностранных) – 70 (10).

Финансирующая организация – ФАНО.

● Международный семинар «Brainstorming for an Arctic Network in the Environmental Humanities»

Апатиты, Центр гуманитарных проблем, август-сентябрь, 6 дней.

Число участников (в том числе иностранных) – 30 (15).

Финансирующая организация – Barents Secretariat, администрация города Апатиты, Министерство экономического развития Мурманской области.

● Семинар с международным участием «Гуманитарные и социально-культурные проблемы арктических территорий»

Апатиты, Центр гуманитарных проблем, сентябрь, 1–2 дня.

Число участников (в том числе иностранных) – 45 (15).

● 5-я Школа молодого ученого «Высокоширотные геофизические исследования»

Мурманск, Полярный геофизический институт, октябрь, 1 день.

Число участников – 30.

● Международное совещание «Специализированный ландшафтный дизайн терапевтическое садоводство в ботанических садах»

Кировск, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, октябрь, 3 дня.

Число участников: всего (в том числе иностранных) – 200 (15).

● XII Всероссийская научная школа «Математические исследования в естественных науках»

Апатиты, Геологический институт, октябрь, 1 день.

Число участников – 50.

● Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Глубокие карьеры»

Апатиты, Горный институт, 12–15 октября, 4 дня.

Число участников (в том числе иностранных) – 150 (15).

Финансирующая организация – ФАНО, РФФИ.

● VI Школа молодых ученых «Геотехнология и обогащение полезных ископаемых»

Апатиты, Горный институт, ноябрь.

● IV Международная конференция «Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее»

Апатиты, Горный институт, ноябрь.

Бодрова О.А. В поисках отражения: саамы Кольского Севера в русской этнографической литературе второй половины XIX – начала XX вв. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. 168 с.

Проведено междисциплинарное исследование, сочетающее этнографический, филологический и историко-социологический ракурсы. Рассмотрен процесс формирования образа кольских саамов в русской этнографической литературе второй половины XIX – начала XX вв. С помощью сравнительно-типологического, структурно-функционального, семиотического, интерпретативного методов и филологического анализа изучены как широко известные, так и мало знакомые читателю этнографические источники, выявлены тиражируемые стереотипы и штампы описания культуры саамов, проблемы, связанные с интертекстуальностью источников. В систематизированном виде представлены особенности этнического образа саамов в этнографической литературе данного периода.

Монография может быть полезна специалистам гуманитарного профиля, в первую очередь историкам, этнографам, филологам, преподавателям и студентам общественных дисциплин, а также всем интересующимся вопросами этического взаимодействия, в частности рецепции культуры саамов, и жанром этнографических очерков.

Погодина И.А. Фораминиферы в донных отложениях морей Западной Арктики / отв. ред. Г.А. Тарасов; Мурман. мор. биол. ин-т Кольского науч. центра РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. 192 с.

Представлены результаты микропалеонтологического изучения донных отложений морей Западной Арктики, выполненного при помощи фораминиферового анализа. Изучено видовое и количественное распределение современных бентосных фораминифер, уточнены некоторые таксоны, используемые при палеонтологических реконструкциях. Морфологически описаны таксоны, имеющие наиболее важное стратиграфическое значение. Выделены сообщества бентосных фораминифер в осадках отдельных этапов позднечетвертичного времени – последнего межледниковья, оледенения и переходных условий от оледенения к голоцену. Выполнено стратиграфическое расчленение колонок и кернов бурения донных отложений по фораминиферам. Приведено микрофаунистическое обоснование стратиграфического расчленения, корреляции верхнечетвертичных отложений Баренцева моря и восстановленные на основе полученных данных палеоокеанологические условия в позднечетвертичное время.

Проблемы Арктического региона: материалы XIV Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов. Т. II: Форум студентов и аспирантов: тез. докл. (г. Мурманск, май 2014 г.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2014. 150 с.

В сборнике представлены тезисы докладов XIV Международной научной конференции студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона». В книгу вошли результаты научной работы студентов различных вузов и их филиалов, в том числе базовых кафедр Кольского научного центра РАН. Тематика представленных докладов включает исследования, связанные с биологическими, медицинскими, экологическими проблемами, проблемами физики, химии, техническими проблемами, проблемами экономики и социальными проблемами Арктического региона.

Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. 2014. Вып. 5 (24). Апатиты: КНЦ РАН, 2014. 255 с.

Фридман А.Я. Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing, 2015. 530 с.

Предложена иерархическая концептуальная модель нестационарной промышленно-природной системы (ППС), ориентированная на исследование статических и динамических

свойств объекта с учетом возможных альтернатив его реализации. Разработаны концептуальные модели основных подсистем ситуационной системы моделирования (ССМ): ГИС, экспертной системы, библиотеки исполнителей элементарных задач и базы данных предметной области. Рассмотрены вопросы координации и планирования взаимодействий составных частей моделируемого объекта, предложены практические схемы координации для числовых и нечисловых (на примере динамических интеллектуальных систем – ДИС) критериев качества функционирования этих частей, а также процедуры прямого синтеза плана в ДИС и ССМ.

ЗАХАРОВА Инна Борисовна

старший научный сотрудник лаборатории флотационных реагентов и обогащения комплексных руд Горного института КНЦ РАН. В Кольском научном центре работает более 50 лет после окончания Ленинградского горного института.

Научная деятельность Инны Борисовны связана с созданием прогрессивных технологий обогащения фосфорсодержащих, титаноциркониевых, кианитовых и платиносодержащих руд. Ряд научных достижений по темам НИР института в этой области включен в важнейшие достижения Российской академии наук.

Большая часть новых технологий обогащения, разработанных с ее участием, прошли все этапы испытаний: лабораторные, промышленные – и доведены до внедрения. Значительный вклад И.Б. Захарова внесла в разработку технологических регламентов на промышленное проектирование новых технологий обогащения минерального сырья: тонкозернистых хвостов Ковдорского техногенного месторождения, фосфоритовой руды месторождения Каратау, апатит-штаффелитовых руд Ковдорского месторождения, апатит-нефелиновой руды месторождения Олений ручей, а также в процесс реконструкции бадделеитового производства АО «Ковдорский ГОК». Инна Борисовна – соисполнитель программ фундаментальных исследований Президиума РАН, государственных контрактов, инновационных проектов, проекта РНФ.

Творческий труд отмечен почетными грамотами РАН и Профсоюза РАН, Президиума РАН, благодарностями РАН, а также знаком «Горняцкая слава» III степени.

В составе авторского коллектива награждена дипломами и медалями международных выставок-конгрессов, салонов инноваций и инвестиций. Принимает активное участие в работе научных конференций (международных, российских и стран СНГ). Достижения И.Б. Захаровой отражены в многочисленных публикациях: она автор и соавтор более 160 печатных работ, в том числе монографии и патентов на изобретения.

Юбиляры

ВИНОГРАДОВ Анатолий Николаевич

к.г.-м.н. (1968), с.н.с. (1975), главный ученый секретарь Президиума Кольского научного центра РАН, директор Кольского регионального сейсмологического центра – филиала Геофизической службы РАН (с 2003). В Кольском научном центре с 1961 г.

С Кольским научным центром связана вся трудовая биография и творческая деятельность А.Н. Виноградова. Его становление как научного работника произошло в Геологическом институте, где он успешно выполнил исследования по кандидатской диссертации, продолжительное время работал ученым секретарем института, а затем возглавлял лабораторию. В геологической науке он стал крупным специалистом в области формационной систематики магматических серий раннего докембрия, реконструкции эндогенных режимов магматизма и условий формирования рудно-магматических систем, комплексного петролого-геофизического изучения и моделирования глубинного строения, тектонического и металлогенического Евро-Арктического региона. Он участвовал в полевых исследованиях многих рудных районов: от Кольского полуострова до Камчатки, от Шпицбергена до Кавказа и Тяньшаня, а также зарубежных стран в Европе, Азии, Северной и Южной Америке. Свои богатые знания Анатолий Николаевич щедро отдает молодежи, являясь с 1999 г. доцентом Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета.

Широкая эрудиция, незаурядные способности организатора коллективной работы оказались востребованными в научной и научно-организационной деятельности в Кольском научном центре РАН и регионе. С 1985 г. А.Н.Виноградов – главный ученый секретарь Президиума Кольского научного центра РАН. Он активно воздействует на формирование направлений научной деятельности Центра, добивается организации комплексных междисциплинарных работ по приоритетным направлениям науки, системному подходу к освоению Арктической зоны России. Он был в числе организаторов Международного центра науки, культуры и образования и Центра адаптации человека на Севере при КНЦ РАН, ставших ныне самостоятельными научными подразделениями Центра. Настойчиво проводит идеи укрепления международного научного сотрудничества как ученый секретарь Координационного совета Мурманской области по научно-технической и инновационной политике и Регионального

экспертного совета РФФИ. В 2003-2005 гг. был координатором от Мурманской области международной программы «Развитие экологической платформы для Северного Калотта и Северо-Запада России», с 1997 г. является членом редколлегии международного журнала «Вестник Баренц-региона по гигиене труда».

На нынешнем переломном этапе деятельности организаций Российской академии наук А.Н. Виноградов вносит большой вклад в то, чтобы не только не растерять, но и приумножить важную роль кольской науки в комплексном решении задач освоения нашего края, расширить нишу деятельности Кольского научного центра в Арктической зоне России. Авторитет А.Н. Виноградова в вопросах научно-технической деятельности признан в отечественной научной среде и за рубежом. Свидетельство этому – избрание его академиком Российской академии естественных наук, награждение медалями им. Капицы (РАЕН, 1999) и им. Кантемира (Ясский университет, Румыния, 2004), с 1995 г. он член Президиума и ученый секретарь Апатитского отделения Мурманского регионального центра РАЕН.

За многолетний, плодотворный и добросовестный труд Анатолий Николаевич удостоен государственных наград – ордена Дружбы (1999), медали «За трудовое отличие» (1986), почетных грамот губернатора Мурманской области и администрации города Апатиты, награжден знаком «За заслуги перед Мурманской областью».

Вся деятельность А.Н. Виноградова отмечена глубиной и разносторонностью научных интересов, исключительным научным подвижничеством и бескорыстием. Энергичная деятельность в роли ученого секретаря Научно-издательского совета и главного редактора обеспечила выход в свет двух томов «Кольской энциклопедии», призванной сохранить историческую память о вкладе ученых в развитие Мурманского края. В течение всего периода работы в КНЦ РАН А.Н. Виноградов активно занимается общественной деятельностью, в том числе, являясь на протяжении многих лет членом Совета профсоюза Мурманской региональной (территориальной) организации работников Российской академии наук. Его деятельность отмечена многими академическими и профсоюзными наградами, почетными грамотами ЦК ВЛКСМ и общества «Знание».

Юбиляры

МАТИШОВ Геннадий Григорьевич

академик РАН (1997), д.г.н. (1981), профессор (1990), директор Мурманского морского биологического института КНЦ РАН (с 1981).

Научная деятельность Г.Г. Матишова началась в Ростовском государственном университете, где он в 1967 г. окончил географический факультет, получив квалификацию «географ-геоморфолог». Большое влияние на выбор научного пути молодого специалиста оказал крупный ученый в области отечественной морской геологии профессор Д.Г. Панов, что во многом предопределило дальнейшую научную судьбу молодого специалиста и навсегда связало его с исследованиями морей и океанов. С конца 1960-х по 1981 гг. работает в Полярном научно-исследовательском институте океанографии и рыбного хозяйства (ПИНРО)
в Мурманске, изучая геоморфологию морей Северо-Западной Антарктики, гляциальный и перигляциальный рельеф дна океана. Результаты этих исследований легли в основу его кандидатской и докторской диссертаций, которые он успешно защитил в 1973 и 1980 гг. Молодой ученый уже в те годы становится известен в научном мире. Им разработана оригинальная концепция функционирования морских экзогенных процессов в ледниковый период, создана модель четвертичного оледенения Баренцево-Карского региона, установлены закономерности дегляциации на Арктическом шельфе, объясняющие историю, динамику и современное состояние морских экосистем.

С 1981 г. по настоящее время работает в должности директора Мурманского морского биологического института (ММБИ) Кольского научного центра РАН – одного из старейших морских биологических институтов РАН на Севере России. Этот период научно-организаторской деятельности Г.Г. Матишова можно охарактеризовать как высоко плодотворный и для него, и для возглавляемого им научного коллектива. Выполняются важные фундаментальные исследования в области гидробиологии, океанологии, морской биологии, решаются прикладные задачи экономического развития Мурманской области в рыбохозяйственной деятельности, разрабатываются новые биотехнологии использовании морских млекопитающих для нужд Северного морского флота. Под руководством Г.Г. Матишова ММБИ становится головной организацией по экологическому обоснованию крупных проектов освоения нефтегазовых ресурсов арктических морей. Несомненно, в решении этих задач – большая заслуга Геннадия Григорьевича.

Его организаторские способности особенно ярко проявились в развитии международного сотрудничества с ведущими научными центрами многих зарубежных стран Европы, Америки, Азии, что позволяет в настоящее время осуществлять комплексный подход к научным исследованиям с использованием достижений отечественных и иностранных специалистов, повышать уровень и приоритет российской науки в мире. Одним из важных этапов в научной деятельности юбиляра следует считать его ведущую роль в организации Южного научного центра РАН, в создании которого Г.Г. Матишов принимал самое активное участие, убедительно обосновывая необходимость повышения приоритета российской академической науки в изучении южных морей, который был утерян в этом регионе после распада СССР. Этот центр под его руководством объединил научный потенциал 10 южных регионов России, вносит весомый вклад в развитие фундаментальных и прикладных исследований отечественной науки.

Несмотря на большую загруженность административной и научно-организационной работой, академик Г.Г. Матишов уделяет большое внимание молодым ученым и специалистам, передает им свой большой научный опыт, содействует профессиональному росту, помогает в решении различных проблем в их работе и жизни.

Г.Г. Матишов, как и прежде, остается «морским романтиком», считая, что каждый океанолог и морской биолог должен своими руками прикоснуться к уникальному миру морской флоры и фауны. Под его руководством и при личном участии ежегодно сотрудники Южного научного центра и ММБИ проводят морские и береговые экспедиции в арктических и южных морях России как на собственных судах, так и на судах других организаций и ведомств. Более 10 лет продолжается творческое сотрудничество с Мурманским ледокольным атомным флотом по трассе Северного морского пути, в ходе которого ученые Южного научного центра и ММБИ получили уникальные новые результаты о функционировании морских экосистем в ледовых условиях.

При активном содействии академика развиваются творческие связи с Краснознаменным Северным флотом по разработке новых биотехнологий использования морских млекопитающих для укрепления обороноспособности Российского флота. На побережье Баренцева моря созданы экспериментальные полигоны для этих животных, решаются важные фундаментальные и прикладные задачи.

Г.Г. Матишов – автор более 1 тыс. научных работ, в том числе 60 монографий и книг. Его многолетняя и плодотворная научная деятельность по достоинству отмечена высокими государственными наградами: орден Почета (1999), орден «Знак Почета» (1985), орден «За морские заслуги» (2004), орден «Заслуги перед Отечеством» IV степени (2010); он лауреат премии Правительства РФ (2005), а также премии О.Ю. Шмидта (2007).

Юбиляры

АМОСОВ Павел Васильевич

к.т.н. (1992), старший научный сотрудник лаборатории проблем освоения и рационального использования подземного пространства Горного института КНЦ РАН. В Кольском научном центре работает с 1985 г. после окончания Ярославского государственного университета.

Специалист в области исследований по проблеме использования подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики. Применительно к подземным ядерно-энергетическим объектам (подземные атомные электростанции, хранилища радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива) на основе численного моделирования изучал процессы тепломассопереноса. Результаты научно-исследовательской работы Павла Васильевича составляют часть решения важнейшей научно-технической проблемы повышения безопасности обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в Северо-Западном регионе России.

Павел Васильевич – призер Международного конкурса проектов по преобразованию объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС в экологически безопасную систему, эксперт в выполнении ряда крупных проектов, направленных на повышение экологической безопасности окружающей среды и населения Мурманской области, по программам TACIS и INTAS.

Им опубликовано более 200 научных трудов и учебно-методических пособий, в т.ч. 9 монографий (8 в соавторстве).

П.В. Амосов в течение многих лет преподавал физические дисциплины в Кольском филиале Петрозаводского государственного университета, отличаясь профессиональным подходом к делу воспитания научных кадров.

Награжден Почетной грамотой РАН и Почетной грамотой губернатора Мурманской обл., имеет благодарности и грамоты Горного института КНЦ РАН, ему присвоено звание «Ветеран труда».

НАГОВИЦЫН Олег Владимирович

к.т.н. (1995), ведущий научный сотрудник, секретарь горной секции ученого совета Горного института. В Кольском научном центре РАН – с 1988 г.

Окончил Свердловский горный институт по специальности «Технология и комплексная механизация открытой разработки месторождений полезных ископаемых» (1988). Специалист в области методов компьютерного моделирования открытой разработки месторождений полезных ископаемых, систем автоматизированного проектирования и планирования горных работ. Один из идеологов и разработчиков горно-геологической информационной системы MINEFRAME, предназначенной для решения задач горной технологии.

Как специалист в области компьютерных методов решения задач горной технологии, О.В. Наговицын внес большой вклад в развитие методов моделирования объектов горной технологии и разработки инструментов автоматизации решения горно-геологических задач. Уделяет большое внимание внедрению системы MINEFRAME на горнодобывающих предприятиях России, где наряду с задачами повышения уровня инженерного обеспечения горных работ решаются и конкретные технологические задачи, стоящие перед предприятиями.

Геоинформационные технологии в области горного дела, развитием которых О.В. Наговицын занимается на протяжении многих лет, нашли применение и в учебном процессе АФ МГТУ и КФ ПетрГУ.

Олег Владимирович – высококвалифицированный специалист, получивший признание коллег в России и за рубежом. Его работы поддерживались различными грантами (РФФИ, федеральными целевыми программами, программами фундаментальных исследований Президиума РАН, программами ОНЗ).

Опубликовано свыше 80 научных работ О.В. Наговицына, в том числе 20 работ в трудах международных научных конференций.

Достижения ученого отмечались дипломами, грамотами и знаками отличия за плодотворную научную деятельность, результаты исследований неоднократно включались в число важнейших достижений Отделения наук о Земле РАН.

Калинников Владимир Трофимович
27.11.1935–11.01.2015

Президиум Кольского научного центра Российской академии наук с глубоким прискорбием извещает, что 11 января 2015 года на 80-м году жизни скоропостижно скончался Председатель Центра академик Калинников Владимир Трофимович.

Ушел из жизни талантливый многогранный ученый, выдающийся организатор науки и настоящий патриот Российского Севера, отдавший развитию его потенциала более 30 лет своей творческой жизни. Детство и юность, проведенные на Камчатке, сформировали его целеустремленный характер, а учеба в Московском университете и работа в головных институтах АН СССР – в совокупности с преподавательской деятельностью в знаменитом Физтехе и стажировкой в лучших университетах США – дали ему огромную эрудицию и умение работать с талантливыми людьми. Весь этот накопленный опыт был с максимальной отдачей реализован в годы работы Владимира Трофимовича в Мурманской области. В 1981 году он был направлен Отделением химии АН СССР в город Апатиты для подъема на новый уровень поисковых исследований, проводившихся в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского филиала АН СССР. Через четыре года его избрали Председателем Президиума этого филиала и затем каждые пять лет переизбирали на этот высокий пост еще пять раз – такого прецедента в трехсотлетней истории Российской академии наук еще не было! Объяснение этому явлению простое: под руководством В.Т. Калинникова Кольский филиал Академии наук превратился в крупнейший научный центр в Заполярье, стал признанным мировым лидером в системном исследовании взаимодействия Природы и Человека в Арктике, в обосновании эффективных методов экологически сбалансированного хозяйствования на арктических территориях. Именно по инициативе В.Т. Калинникова Правительство СССР в 1989 г. при разработке программы развития Мурманской области предусмотрело целевое выделение средств на создание первых в стране арктических институтов промышленной экологии и информационных технологий, на предоставление заполярным ученым современной компьютерной техники и спутниковых коммуникаций, морских исследовательских судов и новейшей аналитической аппаратуры для экспериментов в области материаловедения и биотехнологий. Зримым воплощением такого поворота в государственной политике в сторону высокотехнологичного пути развития региона стало строительство в Апатитах завода «Северные кристаллы», на котором воплощались в жизнь технологические идеи «Школы Калинникова». В 1990-е годы «шоковая терапия» оборвала на взлете многие перспективные замыслы, но Кольский научный центр РАН под руководством академика В.Т. Калинникова не только выстоял, но и увеличил свою роль в цивилизационном процессе обживания Арктики за счет повышения активности гуманитарных исследований и подготовки высококвалифицированных кадров в аспирантуре и вузовской «оболочке», окружившей Академгородок в Апатитах.

В ученом мире академик В.Т. Калинников получил мировую известность как один из создателей новой научной дисциплины – магнетохимии, практическое применение которой позволило добиться прорывных результатов в управляемом синтезе функциональных материалов для квантовой электроники. В нашем же регионе особое значение имели разработки В.Т. Калинникова в области гидрометаллургии комплексного минерального сырья и сфере промышленной экологии. По результатам этих исследований опубликовано более 900 статей и 15 монографий, получено более 70 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Ряд работ удостоен Государственной премии РФ (2000), Премии Правительства РФ (1997), трех премий Российской академии наук: имени великих ученых (Н.С. Курнакова – 1988 г.; Л.Н. Чугаева – 2000 г.; В.А. Коптюга – 2008 г.), отмечен золотыми медалями имени С.П. Капицы и С.Т. Кишкина.

Будучи активным общественным деятелем Северного Калотта, Владимир Трофимович энергично устанавливал связи со скандинавскими учеными и защитниками окружающей среды еще в то время, когда наши страны разделял «железный занавес», а после подписания в 2003 г. Киркенесской декларации о создании Баренц-региона он многие годы руководил научно-техническим комитетом Баренц-совета. Благодаря этому были осуществлены десятки совместных трансграничных проектов, создана возможность для совместного обучения студентов в вузах Мурманска, Апатитов и Скандинавии, в том числе с использованием дистанционных методов преподавания с помощью телекоммуникационных систем. В последние годы академик В.Т. Калинников, как член Правительственной комиссии по обеспечению российского присутствия на архипелаге Шпицберген, инициировал организацию в Баренцбурге Российского национального исследовательского центра и обеспечил полномасштабное вовлечение институтов КНЦ РАН в его исследовательскую программу.

Как советник губернатора Мурманской области по науке и технологиям, В.Т. Калинников внес большой вклад в интеграцию вузовского и академического секторов науки и образования, в становление инновационной инфраструктуры региона. При активном участии В.Т. Калинникова в городе Апатиты организованы филиалы Петрозаводского государственного университета и Мурманского государственного технического университета; учреждены «Технопарк Апатиты» (2003), Региональный центр трансфера технологий (2004) и бизнес-инкубатор (2005). Под руководством В.Т. Калинникова разработаны проекты долгосрочных стратегий развития Мурманской области, ориентированные на придание ей статуса важнейшего центра науки, образования и культуры в Баренц/Евро-Арктическом регионе, обладающем большой инвестиционной привлекательностью. За заслуги в укреплении научного и образовательного потенциала области В.Т. Калинников удостоен звания «Почетный гражданин города Апатиты» (2005) и «Почетный гражданин Мурманской области» (2008). Государство отметило его трудовые достижения орденами Почета (1995), Дружбы (1999), «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2007), почетным званием «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР» (1986).

Светлая память о Владимире Трофимовиче Калинникове, большом Ученом, доброй и щедрой души Человеке, останется в сердцах всех, кто работал и общался с ним. Выражаем глубокие соболезнования родным и близким покойного.

Якубович Марина Викторовна
22.01.1961–09.02.2015

В 1992 г. окончила Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы». С 1995 г. работала в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН. Она занимала должности ведущего инженера, научного сотрудника. В 2007 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Исследование наведенных напряжений на отключенных воздушных линиях, находящихся в зоне влияния разветвленной высоковольтной сети».

Показала себя как высококвалифицированный специалист в научных исследованиях, направленных на решение проблем электромагнитной совместимости. Результаты ее исследований нашли широкое применение при решении практических задач высоковольтной электроэнергетики Северных энергосистем.

С 2008 г. Марина Викторовна преподавала в Кольском филиале ПетрГУ, руководила дипломными проектами студентов.

Принимала активное участие в общественной жизни коллектива, была чутким и отзывчивым человеком.

Светлая память о Марине Викторовне Якубович навсегда сохранится в наших сердцах. Выражаем глубокие соболезнования родным и близким покойной.

Владимир Дмитриевич Терещенко
9.11.1943 – 11.02.2015

Длинный жизненный путь, постоянная борьба с научными трудностями и каждодневные достижения, служебные и жизненные неприятности и их преодоление, и борьба, борьба, борьба. Таков был жизненный путь Владимира Дмитриевича Терещенко. Он родился в 1943 г., окончил Ленинградский государственный университет специальность «Радиофизика» (1967), к.ф.-м.н. («Спектры радиоволн, некогерентно рассеянных магнитоактивной плазмой с анизотропией температуры и с потоками частиц», 1979). В Полярном геофизическом институте работал с 1968 г.

Специалист по развитию теории методов возвратно-наклонного зондирования, некогерентного рассеяния и частичного отражения радиоволн, а также по практическому применению этих методов для исследования структуры и динамики ионосферы высоких широт. Им была предложена форма кинетического уравнения, учитывающая поляризационное рассеяние, перезарядку и кулоновские соударения ионов в пространственно-неоднородной плазме, находящейся во внешних электрическом и магнитном полях. На основе решения этого уравнения Владимира Дмитриевич произвел расчет распределения ионов по скоростям и получил общие формулы для спектра флуктуаций электронной плотности в слабо неоднородной магнитоактивной плазме с сильным однородным электрическим полем.

Он также определил условия на параметры ионосферной плазмы, при которых распределение ионов не является максвелловским, а спектр флуктуаций плотности электронов приобретает необычную трехгорбую форму. На основании анализа дисперсионного уравнения для немаксвелловской плазмы выявил необходимые условия генерации конусной и градиентно-дрейфовой неустойчивостей в F-области полярной ионосферы. Доказал, что конусные неустойчивости, связанные с образованием неоднородностей концентрации с предельно малыми поперечными размерами, могут возбуждаться только при наличии достаточно сильного внешнего электрического поля.

Под руководством Владимира Дмитриевича методом частичного отражения было обнаружено уникальное явление – полярное мезосферное эхо средних радиоволн, наблюдаемое во все сезоны года. Он проводил измерения ионосферных эффектов полярных суббурь, сильных землетрясений, космических и химических взрывов и других крупномасштабных воздействий на атмосферу Земли.

Кроме того, Владимир Дмитриевич открыл дополнительные диагностические возможности методов: возвратно-наклонного зондирования, некогерентного рассеяния и частичного отражения при определении параметров среды во время возмущений. Разработал предложения по повышению эффективности работы различных радиоэлектронных средств, предназначенных для связи, навигации и радиолокации в средних и высоких широтах.

Экспериментально методом частичных отражений зафиксированы особые события: подводный взрыв на АПЛ «Курск» (2000 г.); Витимский, Челябинский и Кольский метеориты (2002, 2013 и 2014 гг.); гамма-всплеск магнитара (2004 г.); сильнейшие землетрясения в Юго-Восточной Азии, Японии, Турции и Норвежском море (2004–2012 гг.); две мощные солнечные вспышки (январь 2005 г. и декабрь 2006 г.); пуски легких ракет из акватории Баренцева моря и Плесецка (2007–2011 гг.). Предложены способы определения концентрации малых составляющих и заряженной пыли в мезосфере во время появления интенсивных отражений средних радиоволн.

Награжден медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина» и медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, Почетной грамотой Президиума Академии наук СССР, благодарственным письмом Президиума Российской академии наук, дипломами Кольского научного центра РАН за научно-технические достижения, включенные в важнейшие итоги деятельности Российской академии наук в 2003 и в 2004 гг., Почетной грамотой и Благодарностью губернатора Мурманской области.

Владимир Дмитриевич был хорошим, добрым отцом и дедушкой. Очень любил своих дочерей и внуков, сочинял им сказки, стихи, а дети любили его слушать. Был ответственным человеком, обладал отличной памятью.

CONTENTS

Herald of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences 1/2015(20)

NATURAL AND TECHNICAL SCIENCES

N.N. Melnikov, P.V. Amosov, N.V. Novozhilova — Study of Thermal State of Permafrost Rocks on the Facility for Underground Isolation of Spent Nuclear Fuel at The Bilibinskaya Nuclear Power Plant…….. 3

V.T. Filatova, V.P. Petrov — Geophysical Heterogeneity of the Keivy Block and Their Geological Nature…. 19

E.D. Tereshchenko, A.N. Milichenko, M.V. Shvetset — Total Electron Content Estimstion Using Satellites Signals of the Global Navigation System Glonass…….…….. 32

S.M. Cherniakov, I.V. Korableva, V.A. Ljubchich, V.F. Grigoriev, R.Yu. Yurik — The Deep Electromagnetic Sounding of Thick Low-Resistance Sedimentary Rock Cover in the Northern Part of the West Siberian Platform…….. 44

A.P. Zhichkin — Dynamics of Inter-annual and Seasonal Anomalies of Ice-cover Extent in the Barents and Kara Seas …… 55

D.V. Moiseev, M.S. Gromov — Hydrometeorogical Conditions in the Dolgaya Bay of the Barents Sea……. 65

E.V. Smirnova, O.V. Karamushko — Spatial distribution and Some Biological Features of Gelatinous Seasnail *Liparis cf. Fabricii Krøyer*, 1847 in the Kara Sea……... 78

P.A. Kashulin, N.V. Kalacheva — Diurnal Photosynthetic Cycles and Cold Hardiness of Northern Plants…… 85

S.V. Asming, N.R. Kirillova — To Characteristic of Some Riverine Grass Bogs in the Central Part of Murmansk Region…… 92

V.A. Dauvalter, N.A. Kashulin — The Main Regularities of Heavy Metals Distribution in Lakes Sediments for the Northwest Part of Murmansk Region and the Border Territory of Adjacent Countries…….. 101

V.I. Demin, A.P. Antsyferova, O.I. Mokrotovarova — Changes of the Air Temperature in Murmansk Since the 19th Century……..... 113

V.A. Myazin — Determination of Hydrocarbons and Products of Their Transformation at Pollution of Cultivated Podzolic Soils in the Euro-Arctic Region…….. 126

M.A. Tarakanov — Integration of Science and Production in the Murmansk Region During the XI Five-Year Plan (1981–1985)……. 132

A.G. Oleynik, A.V. Kharitonov — Results of The Project «Research of Methods and Algorithms for Information Protection of on the Basis of the Biometric Users Identification in the Systems of Information Support to Development of Russian Arctic Territory»…… 146

CONFERENCES, WORKSHOPS ……..... 158

NEW BOOKS ……...…..... 160

ANNIVERSARIES …… 162

AD MEMORIAM……... 169

CONTENTS……..…. 173

N.N. Melnikov, P.V. Amosov, N.V. Novozhilova

STUDY OF THERMAL STATE OF PERMAFROST ROCKS ON THE FACILITY FOR UNDERGROUND ISOLATION OF SPENT NUCLEAR FUEL AT THE BILIBINSKAYA NUCLEAR POWER PLANT

The results of numerical modelling of thermal state of permafrost rocks are shown taking into account the “water-ice” phase transition on a facility for underground isolation of spent nuclear fuel (SNF) at the Bilibinskaya nuclear power plant. Three schemes have been analysed for SNF disposal in long-term storage covers (on depth of host rock): 2, 3 and 4 layers. For each disposal scheme, the SNF holding period has been determined that provides for the safe depth of thawing between adjacent wells. Spatial-temporal distributions of temperature has been analysed at variations of the well radius and thermal conductivity of the filling material. The features of temperature dynamics at the model areas have been marked, and dimensions of thawing areas at the host rock have been estimated.

Keywords: *modelling, SNF disposal, permafrost, “water-ice” phase transition, dynamics of temperature distribution, holding period.*

Authors

Nikolay N. Mel’nikov – full member of RAS, director of Mining Institute KSC RAS; e-mail: root@goi.kolasc.net.ru

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

Natalya V. Novozhilova – junior scientific researcher of Mining Institute KSC RAS; e-mail: nat1966kis@mail.ru

REFERENCES

1. Vozmozhnosti sozdaniya opytno-promyshlennogo ob"ekta podzemnoj izolyacii OYAT i RAO / M.V. Baryshnikov i dr. // Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy. 2012. № 3. S. 70–75. **2.** *Lobanov N.F.* Sozdanie opytno-promyshlennogo ob"ekta podzemnoj izolyacii OYAT v tolshche mnogoletnemerzlyh porod v zone razmeshcheniya Bilibinskoj AEHS: materialy seminara KEHG MAGATEH «Ehkonomika obrashcheniya s otrabotavshim yadernym toplivom: pererabotka i neposredstvennaya izolyaciya». Aronsborg, Shveciya, 7 oktyabrya 2011. Rezhim dostupa: http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/WTS/CEG/CEG-Workshop-7-Oct-2011/3.5-Lobanov-Rus.pdf (data obrashcheniya 06.11.2012 g.). **3.** Vozmozhnosti sozdaniya opytno-promyshlennogo ob"ekta podzemnoj izolyacii OYAT i TRO / S.B. Karapetyan i dr. // Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy. 2012. № 2. S. 133–139. **4.** Vybor marshrutov transportirovaniya OYAT Bilibinskoj AEHS na osnove ocenki radiacionnyh riskov / *E.V. Suvorova, A.V. Haperskaya, A.A. Stroganov i dr.* // Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy. 2013. № 3-4. S.53-56. **5.** Obosnovanie vozmozhnosti razmeshcheniya opytno-promyshlennogo ob"ekta podzemnoj izolyacii OYAT i RAOv tolshche mnogoletnemerzlyh gornyh porod v zone razmeshcheniya Bilibinskoj AEHS / B.G. Lukishov, N.P. SHvedova, N.V. Garmasheva i dr. // Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' Rossii. 2013. Vyp. 15. S. 31–41. **6.** *Mel'nikov N.N., Amosov P.V., Novozhilova N.V.* Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya mnogoletnemerzlyh gornyh porod na ob"ekte podzemnoj izolyacii OYAT Bilibinskoj AEHS v zavisimosti ot vremeni vyderzhki // Vestnik KNC RAN. 2014. № 1 (16). S. 3–9. **7.** Inzhenernaya geokriologiya: spravochnoe posobie / *Eh.D. Ershov* i dr.; pod red. *Eh.D. Ershova*. M.: Nedra, 1991. 439 s. **8.** Ershov EH.D., Parmuzin S.YU., Lisicyna O.M. Problemy zahoroneniya radioaktivnyh othodov v kriolitozone // Geoehkologiya. 1995. № 5. S. 20–36. **9.** *Kazakov A.N., Lobanov N.F., Man'kin V.I.* Dinamika razvitiya teplofizicheskih processov pri podzemnoj izolyacii teplovydelyayushchih RAO v mnogoletnemerzlyh gornyh porodah // Geoehkologiya. 1997. № 2. S. 36–40. **10.** Regulirovanie teplovogo rezhima podzemnyh sooruzhenij skladskogo i special'nogo naznacheniya v usloviyah Severa / *A.S. Kurilko i dr.* Yakutsk: Izd-vo In-ta merzlotovedeniya SO RAN, 2011. 246 s. **11.** Modelirovanie teplovyh processov v gornom massive pri otkrytoj razrabotke rossypej kriolitozony / *A.S. Kurilko* [dr.]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2011. 139 s. **12.** *Lunardini V.J.* Heat transfer in cold climates. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981. 731 p. **13.** Bilibinskaya atomnaya ehlektrostanciya / *V.M. Abramov i dr.* // Atomnaya ehnergiya. 1973. T. 85, № 5. S. 299–304. **14.** Fizicheskie velichiny: spravochnik / *A.P. Babichev i dr.*; pod red. *I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejlihova*. M.: Ehnergoatomizdat, 1991. 1232 s. **15.** Radiogeoehkologicheskie aspekty bezopasnosti podzemnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov i otrabotannogo yadernogo topliva na evropejskom severe Rossii / N.N.

Mel'nikov i dr. Apatity: Izd. KNC RAN, 2001. 194 s. **16.** Hranenie otrabotavshego yadernogo topliva ehnergeticheskih reaktorov: preprint / *V.I. Kalinkin i dr.* SPb.: VNIPIEHT, 2009. 124 s. **17.** PORFLOW a software tool for multiphase fluid flow, heat and mass transport in fractured porous media. User's manual (version 3.07) / ACRi. 1997. 326 p. **18.** *Samarskij A.A.* Vychislitel'naya teploperedacha / *A.A. Samarskij, P.N. Vabishchevich.* M.: Editorial URSS, 2003. 784 s. **19.** *Amosov P.V.* Proverka koda dlya chislennogo modelirovaniya teplovyh processov v poristoj srede s uchetom fazovogo perekhoda «led – voda» // Vestnik MGTU. 2013. Vyp. 16, № 4. S. 641–643. **20.** *Amosov P.V.* Diffuzionnyj perenos radioaktivnyh veshchestv v obvodnennoj treshchinovatoj poristoj srede (model' odinochnoj treshchiny) // GEOEHKOLOGIYA. 2001. №1. S. 88–93.

V.T. Filatova, V.P. Petrov

GEOPHYSICAL HETEROGENEITY OF THE KEIVY BLOCK AND THEIR GEOLOGICAL NATURE

Tectonic and structural, as well as time-and-space features of the Earth's crust formation in the Keivy ore area accommodating a number of major deposits and ore occurrences have been considered. The structure of geophysical anomalies within the area has been defined; its relation with petrophysical properties of the rocks and staging of deformation and metamorphic processes has been identified. The results showed that the tectonic regimes and the nature of metamorphic processes could significantly affect the material composition, structure and commercial value of the Keivy block mineral deposits.

Keywords: Keivy, Neoarchaean, Palaeoproterozoic, Baltic Shield, geophysical field, tectonic regime, metamorphic process.

Authors

Valentina T. Filatova – Dr. Sc. (Math.), leading scientific researcher of Geological Institute KSC RAS; e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru

Valentin P. Petrov – Dr. Sci. (Geol.), Professor, Vice-President of KSC RAS; e-mail: petrov@admksc.apatity.ru

REFERENCES

1. *Zagorodnyj V.G., Radchenko A.T.* Tektonika rannego dokembriya Kol'skogo poluostrova (sostoyanie izuchennosti i problemy). L.: Nauka, 1983. 96 s. **2.** Dokembrijskaya tektonika severo-vostochnoj chasti Baltijskogo shchita (ob"yasnitel'naya zapiska k tektonicheskoj karte masshtaba 1:500000) / Radchenko A.T., Balaganskij V.V., Vinogradov A.N., Golionko G.B., Petrov V.P., Pozhilenko V.I., Radchenko M. ; K. ; SPb.: Nauka, 1992. 111 s. **3.** Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / *F.P. Mitrofanov, V.I. Pozhilenko, V.F. Smolkin, A.A. Arzamastsev, V.Ya. Yevzerov, V.V. Lyubtsov, E.V. Shipilov, S.B. Nikolaeva, Zh.A. Fedotov*. Apatity: KSC RAS, 1995. 144 s. **4.** *Mirskaya D.D.* Suprakrustal'nye formacii Kejvskoj zony // Geologiya i geohimiya metamorficheskih kompleksov Kol'skogo poluostrova. Apatity: KFAN SSSR, 1975. S. 23–35. **5.** Katalog geohronologicheskih dannyh po severo-vostochnoj chasti Baltijskogo shchita / T.B. Bayanova, V.I. Pozhilenko, V.F. Smol'kin, N.M. Kudryashov, T.V. Kaulina, V.R. Vetrin. Apatity: GI KNC RAN, 2002. 53 s. **6.** *Balaganskij V.V., Myskova T.A., Skublov S.G.* O vozraste paleoproterozojskoj kollizii na yugo-vostoke Kol'skogo regiona, Baltijskij shchit // Geologiya i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona. Trudy X Vserossijskoj Fersmanovskoj nauchnoj sessii, posvyashchyonnoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya akad. V.I. Vernadskogo (Apatity, 8–9 aprelya 2013 g.). Apatity: GI KNC RAN, 2013. S. 13–16. **7.** Geologiya i geohimiya metamorficheskih kompleksov rannego dokembriya Kol'skogo poluostrova / A.P. Belolipeckij, V.G. Gaskel'berg, L.A. Gaskel'berg, E.S. Antonyuk, YU.I. Il'in. L.: Nauka, 1980. 240 s. **8.** *Petrov V.P.* Metamorfizm rannego proterozoya Baltijskogo shchita. Apatity: KNC RAN, 1999. 325 s. **9.** *Filatova V.T.* Mobil'no-pronicaemye zony v fundamente severo-vostochnoj chasti Baltijskogo shchita i usloviya ih lokalizacii // Geofizicheskij zhurnal NAN Ukrainy. 2012. T. 34, №1. S. 50–62. **10.** *Filatova V.T.* Formirovanie karkasnyh tektonogenov v severo-vostochnoj chasti Baltijskogo shchita // DAN. 2014. T. 455, № 4. S. 464–470. **11.** Filatova Valentina. Tectonophysical conditions of magma feeding channels formation in the Archaean basement of the north-eastern Baltic Shield // Proceedings of the 34th International Geological Congress 2012, 5–10 August 2012. Brisbane, Australia. Brisbane: IGC34, 2012. ISBN 978-0-646-57800-2. P.2254. **12.** *Verba V.V., Gaskel'berg V.G., Zajcev V.G.* Petrofizicheskaya harakteristika dokembrijskih kompleksov severo-vostochnoj chasti Kol'skogo poluostrova // Petrofizicheskaya harakteristika sovetskoj chasti Baltijskogo shchita. Apatity: KFAN SSSR, 1976. S. 34–38.

E.D. Tereshchenko, A.N. Milichenko, M.V. Shvets, S.M. Cherniakov, I.V. Korableva

TOTAL ELECTRON CONTENT ESTIMSTION USING SATELLITES SIGNALS OF THE GLOBAL NAVIGATION SYSTEM GLONASS

The smart estimation method of total electron content for signals of the global navigation satellite system GLONASS is presented. Comparison of calculated values of total electron content with obtained values of total electron content from data of other satellites and the global model UAM and the global ionosphere map GIM was done. Results have shown that the proposed method gave good agreement with results of the independent methods of total electron content calculations and can be an effective method of total electron content estimation from signals of the GLONASS satellites.

Keywords: Global navigation satellite systems, total electron content, differential code biases.

Authors

Evgeny D. Tereschenko – Dr. Sc. (Math.), director of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: general@pgi.ru
Alexander N. Milichenko – vice-director of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: alexander@pgi.ru
Mikhail V. Shvets – senior engineer of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: shvec@pgi.ru
Sergey M. Chernyakov – scientific researcher of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: sergeich@pgi.ru
Irina Korablyova – junior scientific researcher of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: irinakorab@pgi.ru

REFERENCES

1. GLONASS: principy postroeniya i funkcionirovaniya / pod red. *A.I. Perova, V.N. Harisova*. 3-e izd., pererab. M.: Radiotekhnika, 2005. 688 s. **2.** GPS. Interface specification IS-GPS-200. Rezhim dostupa: http://www.gps.gov/technical/icwg/ (data obrashcheniya 23.12.2014 g.). **3.** *Afrajmovich Eh.L., Perevalova N.P.* GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli. Irkutsk: GU NC RVH VSNC RAMN, 2006. 480 s. **4.** *Sardón E., Zarraoa N.* Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases? // Radio Science. 1997. Vol. 32, № 5. P. 1899–1910. **5.** *Choi B.K., Cho J., Lee S.* Estimation and analysis of GPS receiver differential code biases using KGN in Korean Peninsula // Adv. Space Res. 2011. Vol. 47. P. 1590–1599. **6.** International GNSS service. ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf (data obrashcheniya 23.12.2014 g.). **7.** *Zhao B., Wan W., Liu L., Ren B.* Characteristics of the ionospheric total electron content of the equatorial ionization anomaly in the Asian-Australian region during 1996-2004 // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. P. 3861–3873. **8.** Isimaru A. Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchajno-neodnorodnyh sredah. M.: Mir, 1981. T. 2. 280 s. **9.** *Sardon E., Ruis A., Zarraoa N.* Estimation of the transmitter and receiver biases and ionospheric total electron content from Global Positioning System observations // Radio Sci. 1994. Vol. 29, N 3. P. 577–586. **10.** *Jin R., Jin S., Feng G.* M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases // GPS Solut. 2012. Vol. 16, № 4. P. 541–548. **11.** *Zhang W., Zhang D.H., Xiao Z.* The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental biases // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. P. 1613–1623. **12.** *Coco D.C., Coker C., Dahlke S.R., Clynch J.R.* Variability of GPS satellite differential group delay biases // IEEE T. Aero. Elec. Sys. 1991. Vol. 27. P. 931–938. **13.** *Shagimuratov I.I., Chernyak YU.V., Zaharenkova I.E., Yakimova G.A.* Ispol'zovanie kart polnogo ehlektronnogo soderzhaniya dlya analiza prostranstvenno-vremennoj struktury ionosfery // Zhurnal fizicheskoj himii. 2013. T. 32, № 11. S. 82–87. **14.** *Ma G., Maruyama T.* Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. P. 2083–2093. **15.** *Ma X., Maruyama T., Ma G., Takeda T.* Determination of GPS receiver differential biases by neural network parameter estimation method // Radio Sci. 2005. Vol. 40, № 1: RS1002. doi:10.1029/2004 RS003072. **16.** *Lanyi G.E., Roth T.* A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellite observations // Radio Sci. 1988. Vol. 23. P. 483-492. **17.** *Ho C.M., Wilson B.D., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Yuan D.N.* A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOREX radar, and Bent model // Radio Sci. 1997. Vol. 32. P. 1499–1521. **18.** *Jakowski N., Sardon E., Engler E., Jungstand A., Klähn D.* Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations // Ann. Geophys. 1996. Vol. 14. P. 1429–1436. **19.** Global Ionosphere Maps Produced by CODE. Rezhim dostupa: http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/, ftp://cddis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/ (data obrashcheniya 23.12.2014 g.). **20.** *Schaer S., Gurtner W., Feltens J.* IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1 // In Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centres Workshop, ESOC. 1998. P.

233–247. **21.** *Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // Radio Science. 1998. Vol. 33. P. 565–582. **22.** M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases – by Rui Jin, Shuanggen Jin, and Guiping Feng. Rezhim dostupa: http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/m_dcb.htm (data obrashcheniya 23.12.2014 g.). **23.** IGS Station: tro1. Rezhim dostupa: http://igscb.jpl.nasa.gov/network/site/tro1.html (data obrashcheniya 23.12.2014 g.). **24.** *Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.* Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step // Geomag. and Aeronomy Intern. 1998. Vol. 1, № 1. P. 53–58.

V.A. Ljubchich, V.F. Grigoriev, R.Yu. Yurik

THE DEEP ELECTROMAGNETIC SOUNDING OF THICK LOW-RESISTANCE SEDIMENTARY ROCK COVER IN THE NORTHERN PART OF THE WEST SIBERIAN PLATFORM

The article deals with application of the powerful generator to electromagnetic sounding of the Earth by using industrial power transmission lines as a dipole antenna. This technique provides deep investigation of thick sedimentary rock cover of the West Siberian platform. The article briefly describes technical characteristics of the equipment used for measuring and generating of a harmonic electromagnetic field. An example of our experimental work in the northern part of the West Siberian platform shows that integrated interpretation of the data obtained by magnetotelluric sounding and electromagnetic sounding with controlled source data is useful.

Keywords: generator of electromagnetic field, industrial power transmission line, electromagnetic sounding, sedimentary rock cover.

Authors

Vladimir A. Lyubchich – PhD (Math.), scientific researcher of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: lubchich@yandex.ru
Valery F. Grigoriev – assistant director of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: valgri@pgi.ru
Roman Yu. Yurik – PhD (Math.), senior scientific researcher of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: roman.yurik@pgi.ru

REFERENCES

1. Glubinnye zondirovaniya s promyshlennymi LEHP v komplekse s MTZ / *A.A. ZHamaletdinov, A.N. Shevcov, T.G. Korotkova, B.V. Efimov, M.B. Barannik, V.V. Kolobov, P.I. Prokopchuk, YU.A. Kopytenko, V.S. Ismagilov, L.B. Pesin* // Izvestiya RAN. Fizika Zemli. 2007. № 3. S. 74–80. **2.** Ehlektromagnitnoe zondirovanie zemnoj kory v rajone sverhglubokih skvazhin YANAO v polyah estestvennyh i kontroliruemyh istochnikah / *A.A. Zhamaletdinov, M.S. Petrishchev, A.N. Shevcov, V.V. Kolobov, V.N. Selivanov, M.B. Barannik, E.D. Tereshchenko, V.F. Grigor'ev, P.A. Sergushin, E.A. Kopytenko, M.A. Birulya, A.A. Skorohodov, O.A. Esipko, R.V. Damaskin* // Izvestiya RAN. Fizika Zemli. 2013. № 6. S. 99–115. **3.** Povyshayushchij preobrazovatel' i sistema ehnergoperedachi generatora “EHnergiya-2” dlya ehlektromagnitnyh zondirovanij i monitoringa ochagovyh zon zemletryasenij / E.D. Tereshchenko, V.F. Grigor'ev, M.B. Barannik, A.N. Danilin, B.V. Efimov, V.V. Kolobov, P.I. Prokopchuk, V.N. Selivanov, YU.A. Kopytenko, A.A. Zhamaletdinov // Sejsmicheskie pribory. 2008. T. 44, № 4. S. 43–66. **4.** Razrabotka soglasuyushchego ustrojstva stacionarnogo istochnika ehlektromagnitnogo izlucheniya ehkstremal'no nizkochastotnogo diapazona / *E.D. Tereshchenko, M.B. Barannik, V.F. Grigor'ev, V.V. Ivonin, V.V. Kolobov, A.N. Milichenko, P.I. Prokopchuk, V.N. Selivanov* // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2012. T. 4, № 1. S. 68–78. **5.** *Filatov M.V., Pil'gaev S.V., Fedorenko YU.V.* Chetyrekhkanal'nyj 24-razryadnyj sinhronizirovannyj s mirovym vremenem analogo-cifrovoj preobrazovatel' // Pribory i tekhnika ehksperimenta. 2011. № 3. S. 73–75. **6.** *Shamanova I.I.* Pribrezhnaya kriolitozona central'noj chasti Obskoj guby // Inzhenernaya geologiya. 2008. № 3. S. 8–14. **7.** *Esipko O.A., Gorbachev V.I., Sokolova T.N.* Fizicheskie svojstva porod Tyumenskoj sverhglubokoj skvazhiny po dannym geofizicheskih issledovanij // Geologiya i geofizika. 2000. T. 41, № 6. S. 905–919. **8.** Ob"yasnitel'naya zapiska k Tektonicheskoj karte morej Karskogo i Laptevyh i severa Sibiri M 1:2500000 / *N.A. Bogdanov, V.E. Hain, O.M. Rozen, EH.V. SHipilov, V.A. Vernikovskij, S.S. Drachev, S.L. Kostyuchenko, A.B. Kuz'michev, S.B. Sekret*ov. M.: Institut litosfery okrainnyh i vnutrennih morej RAN, 1998. 127 s. **9.** *Berdichevskij M.N., Dmitriev V.I.* Modeli i metody

magnitotelluriki. M.: Nauchnyj mir, 2009. 680 s. **10.** Kontroliruemaya transformaciya krivyh MTZ / *E.V. Andreeva, M.N. Berdichevskij, N.S. Golubcova, D.S. Koldaev, A.G. Yakovlev* // Izvestiya RAN. Fizika Zemli. 1991. № 10. S. 89–95.

A.P. Zhichkin

Dynamics of Inter-annual and Seasonal Anomalies of Ice-cover Extent in the Barents and Kara Seas

The paper examines results of studies on inter-annual and seasonal fluctuations of sea-ice anomalies in the Barents Sea from 1934 to 2014 and in the Kara Sea from 1979 to 2014. Based on an electronic database of inter-annual data on the sea-ice regime of the Barents Sea, homogenous periods with a prevailing sign of the anomaly are determined, and features of seasonal fluctuations of anomalies in the periods of the maximum (February – April) and minimum (August – September) sea ice-cover extent on the Barents Sea are identified. The ice-cover extent in the Kara Sea in the winter months during the last 10 years was stable, and anomalies of both signs were insignificant. The February 2012 was the most anomalous of the winter months in the Kara Sea, when the ice-cover extent anomaly dropped sharply to − 20 %. During the winter of 2013, under the changing conditions of the largescale atmospheric circulation in the northern hemisphere, the ice-cover extent tended to increase in the Barents and Kara Seas. In the Kara Sea in February–March, this parameter was close to average values. The paper introduces temporal distribution and repeatability of large and super large sea ice-cover anomalies in the Barents Sea within the last 50 years and in the Kara Sea from 1979 to 2012.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, sea ice-cover anomalies, inter-annual and seasonal fluctuations.

Author

Aleksandr P. Zhichkin – Ph.D. (Geogr.), senior scientific researcher, Oceanography and Radioecology Laboratory of Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS; e-mail: zhichkin@mmbi.info

REFERENCES

1. *Bochkov Yu.A., Tereshchenko V.V*. Sovremennye mnogoletnie izmeneniya gidrometeorologicheskih uslovij v Barencevom more i ih biologicheskie posledstviya // Ehkologicheskie problemy Barenceva morya: sb. nauch. tr. PINRO. Murmansk, 1992. S. 225 243. **2.** *Denisov V.V.* Ehkologo-geograficheskie osnovy ustojchivogo prirodopol'zovaniya v shel'fovyh moryah (ehkologicheskaya geografiya morya). Apatity: Izd. KNC RAN, 2002. 502 s. **3.** Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries / *G. Matishov, D. Moiseev, O. Lyubina, A. Zhichkin, S. Dzhenyuk, O. Karamushko, E. Frolova* // Polar Biology. 2012. Vol. 35, № 12. P. 1773–1790. **4.** *Zhichkin A.P.* Osobennosti klimaticheskih kolebanij i rybnyj promysel v vysokoshirotnyh rajonah Barenceva morya. // Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. 2013. № 30. C. 108–115. **5.** *Matishov G.G., Zhichkin A.P.* Vliyanie klimaticheskih fluktuacij na promyslovuyu ihtiofaunu ehkosistemy Barenceva morya // Vestnik YUzhnogo nauchnogo centra RAN. 2013. T. 9, № 1. C. 61–70. **6.** *Mironov E.U.* Ledovye usloviya v Grenlandskom i Barencevom moryah i ih dolgosrochnyj prognoz. SPb.: GNC RF AANII, 2004. 320 s. 7. Klimaticheskie izmeneniya ledovyh uslovij v arkticheskih moryah Evrazijskogo shel'fa / *I.E. Frolov, Z.M. Gudkovich, V.P. Karklin, E.G. Kovalev, V.M. Smolyanickij* // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2007. № 75. C. 149–160. **8.** *Spichkin V.A.* Opredelenie kriteriya krupnoj anomalii // Issledovaniya ledovyh uslovij Arkticheskih morej, metody rascheta i prognoza: tr. AANII. 1987. T. 402. C. 15–19. **9.** Klimaticheskie anomalii Barenceva morya // Otchet o NIR (zaklyuchitel'nyj) / pod red. G.G. Matishova. Murmansk: MMBI KNC RAN, 2000. 98 s. **10.** Variability of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years / I.V. Polyakov, G.V. Alekseev, L.A. Timokhov et.al. // Journal of Climate. 2004. Vol. 17, № 23, P. 4485–4497. **11.** *Zhichkin A.P.* Klimaticheskie kolebaniya ledovyh uslovij v razlichnyh rajonah Barenceva morya // Meteorologiya i gidrologiya. 2012. № 9. C. 69–78. **12.** Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov / *G.G. Matishov, S.L. Dzhenyuk, D.V. Moiseev, A.P. Zhichkin* // Oceanologia. 2014. 56 (3). P. 445–460.

D.V. Moiseev, M.S. Gromov

HYDROMETEOROGICAL CONDITIONS IN THE DOLGAYA BAY OF THE BARENTS SEA

Based on literature sources and MMBI research conducted in 2008-2009, the Dolgaya Bay (Barents Sea) hydrometeorogical conditions are described. The main features of meteorological and hydrological regime in connection to planned tidal power plant construction in the Dolgaya Bay are shown.

Keywords: Dolgaya Bay, hydrometeorogical conditions, temperature, salinity, wind.

Authors

Denis V. Moiseev – Ph.D. (Geogr.), deputy director on science of Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS; e-mail: Denis_Moiseev@mmbi.info

Mikhail S. Gromov – scientific researcher, Oceanography and Radioecology Laboratory of Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS; e-mail: gromov@mmbi.info

REFERENCES

1. Lociya Barenceva morya. CH. II. Ot reki Vor'ema do proliva Karskie Vorota i Zapadnye berega ostrovov Novaya Zemlya. GUNiO MO. SPb., 2006. 496 s. **2.** Prognoziruemye ehkologicheskie i social'no–ehkologicheskie posledstviya stroitel'stva Severnoj i Mezenskoj PEHS / *V.N. Beznosov, N.A. Demidenko, M.A. Kuchkina, P.R. Makarevich, B.F. Prishchepa, A.L. Suzdaleva, I.N. Usachev* // Malaya ehnergetika. 2008. № 4. S. 62–70. **3.** Severnaya prilivnaya ehlektrostanciya / *Yu.B. Shpolyanskij, I.N. Usachev, B.L. Istorik, A.L. Zolotov, A.N. YUrchenko, S.P. Novikov* // Malaya ehnergetika. 2011. № 1–2. S. 10–26. **4.** *Moiseev D.V., Gromov M.S.* Gidrometeorologicheskie usloviya v gube Dolgaya letom 2008 g. i vesnoj 2009 g. // Priroda morskoj Arktiki: sovremennye vyzovy i rol' nauki. Tez. dokl. Mezhdunar. nauch. konf. (g. Murmansk, 10–12 marta 2010 g.). Apatity, KNC RAN, S. 158–160, 2010. a. **5.** *Demidenko N.A.* Gidrometeorologicheskie usloviya rajona Severnoj PVEHS v gube Dolgaya Barenceva morya // Malaya ehnergetika. 2011. № 1–2. S. 39–54. **6.** Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej SSSR. T. 1 Barencevo more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. L.: Gidrometeoizdat. 1990. 280 s. **7.** *Denisov V.V.* Cirkulyaciya vod Barenceva morya kak reakciya na peremeshchayushchiesya ciklony // Problemy Arktiki i Antarktiki. L.: Gidrometeozdat, 1985. Vyp. 61. S. 36–42. **8.** Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoj zony morej SSSR. T. 6. Barencevo more. L.: Gidrometeoizdat, 1985. Vyp. 1, 2. 263 s. **9.** *Denisov V.V., Potanin V.A., Turchaninov V.I.* Chislennoe modelirovanie prilivov Barenceva morya // Tr. AANII, 1987. T. 410. S. 7–19. **10.** Zhizn' i usloviya ee sushchestvovaniya v pelagiali Barenceva morya / pod red. G.G. Matishova. Apatity: MMBI AN SSSR, 1985. 220 s. **11.** *Ozhigin V.K., Ivshin V.A.* Vodnye massy Barenceva morya. Murmansk: PINRO, 1999. 48 s. **12.** Klimaticheskie izmeneniya morskih ehkosistem Evropejskoj Arktiki / *G.G. Matishov, S.L. Dzhenyuk, D.V. Moiseev, A.P. Zhichkin* // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2010. № 3 (86). S. 7–21. **13.** *Matishov G.G., Matishov D.G., Moiseev D.V.* Inflow of Atlantic–Origin waters to the Barents Sea along glacial troughs // Oceanologia. 2009. Vol. 51, № 3. P. 321–340. **14.** *Moiseev D.V., Zhichkin A.P.* Termohalinnye usloviya na Zapadnom Murmane v marte 2007 g. // Priroda shel'fa i arhipelagov evropejskoj Arktiki. Vyp. 8. Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Murmansk, 9–11 noyabrya 2008 g.). M.: GEOS, 2008. S. 257–260. **15.** *Fedorov K.N.* Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskih frontov. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 296 s. **16.** *Fedorov K.N., Ginzburg A.I.* Pripoverhnostnyj sloj okeana. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 303 s. **17.** Nikiforov E.G., SHpajher AO. Zakonomernosti formirovaniya krupnomasshtabnyh kolebanij gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana. L., 1980. 269 s. **18.** Atlas oblakov. SPb.: Gidrometizdat, 2006. 249 s. **19.** Bauman. I.A. Sinopticheskaya meteorologiya dlya okeanologov. L.: LGI, 1983. 228 s. **20.** Metodicheskie ukazaniya po proizvodstvu okeanologicheskih rabot na sudah zaprybpromrazvedki. Kaliningrad, 1977. 203 s. **21.** Rukovodstvo po gidrologicheskim rabotam v okeanah i moryah. L.: Gidrometeoizdat, 1977. **22.** Uchet specifiki termohalinnyh gradientov pri STD–profilirovanii morya / *G.G. Matishov, D.G. Matishov, D.V. Moiseev, V.V. Kulygin* // Vestnik Yuzhnogo nauchnogo centra RAN. 2008. T. 4, № 2. S. 34–45. **23.** SBE 19plus SEACAT PROFILER. User Manual, Version 012. Bellevue, Washington. USA. 2005. **24.** *Semenov V.N.* Izmeneniya ehkosistemy pod vliyaniem Kislogubskoj prilivnoj ehlektrostancii na poberezh'e Barenceva morya // Sovremennoe sostoyanie i perspektivy issledovanij ehkosistem Barenceva, Karskogo morej i morya Laptevyh: tez. dokl. Mezhd. konf. Murmansk, 1995. S. 84–86. **25.** *Moiseev D.V., Gromov M.S.* Distancionnyj gidrometeorologicheskij monitoring pribrezh'ya Barenceva morya // Priroda morskoj Arktiki: sovremennye vyzovy i rol' nauki: tez. dokl. Mezhdunar. nauch. konf., g. Murmansk, 10–12 marta 2010 g. Apatity: Izd. KNC RAN, 2010 b. S. 160–161.

E.V. Smirnova, O.V. Karamushko

SPATIAL DISTRIBUTION AND SOME BIOLOGICAL FEATURES OF GELATINOUS SEASNAIL *LIPARIS CF. FABRICII KRØYER*, 1847 IN THE KARA SEA

Gelatinous seasnail main features of habitat spatial distribution and temperature in the Kara Sea are discussed. Researched species was found at depths from 17 to 414 m, at temperatures from 1.91 to 0°C and had preferred bottom with mud and sandy-mud surface. Specimens of the gelatinous seasnail with length from 3.9 cm to 18.8 cm were noted in the Kara Sea catches and most of them were females. Some part of these females had ripe eggs (8.33 %) and another part with flowing eggs (3.33 %).

Keywords: Gelatinous seasnail, spatial distribution, length composition, Kara Sea.

Authors

Elena V. Smirnova – junior scientific researcher, Laboratory on Fish Ichthyology and Physiology of Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS; e-mail: smirnova@mmbi.info

Oleg. V. Karamushko – PhD (Biol.), Head of Laboratory on Fish Ichthyology and Physiology of Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS; e-mail: karamushko_o@mmbi.info

REFERENCES

1. *Astaf'eva A.V. Antonov S.G., Petrov A.A.* Tralovye raboty v Karskom more // Osobennosti biologii ryb severnyh morej: Sb. nauch. tr. MMBI KNC RAN. L.: Nauka, 1983. S. 3–12. **2.** *Andriyashev A.P.* Ryby severnyh morej SSSR. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1954. 556 s. **3.** *Esipov V.K.* O rybah, sobrannyh ehkspediciej na l/p «Sadko» v 1935 g. Zool. zhurnal. 1939. T. 18. Vyp. 5. S. 877–887. **4.** *Esipov V.K.* Ryby Karskogo morya. M.: Izd-vo AN SSSR, 1952. 146 s. **5.** *Soldatov V.K.* Materialy po ihtiofaune Karskogo i vostochnoj chasti Barenceva morej po sboram ehkspedicii Instituta v 1921 g. // Tr. Plavuchego morskogo nauchn. in-ta. 1923. Vyp. 3. S. 5–79. **6.** *Efimov V.M., Kovaleva V.Yu.* Mnogomernyj analiz biologicheskih dannyh. Izd-vo Innovacionnyj centr zashchity rastenij, 2008. 85 s. **7.** *Borkin I.V., Vasil'ev A.V., Chetyrkina O.YU.* Ihtiofauna // Ehkosistema Karskogo morya. Murmansk: Izd-vo PINRO, 2008. S. 179–181. **8.** *Chernova N.V.* Liparovye ryby evroaziatskoj Arktiki. Apatity: Izd. KNC AN SSSR, 1991. 112 s. **9.** Atlas of the Barents Sea Fishes. №1. Murmansk, Bergen: IMR, PINRO, 2011 / *R. Wienerroither, E. Johannesen, A. Dolgov, I. Byrkjedal, O. Bjelland, K. Drevetnyak, K.B. Eriksen, Å. Høines, G. Langhelle, H. Langøy, T. Prokhorova, D. Prozorkevich, T. Wenneck*. 272 p. **10.** *Dolgov A.V., Benzik A.N., Chetyrkina O.YU*. Novye dannye po pitaniyu nepromyslovyh ryb v Karskom more // Global'nye klimaticheskie processy i ih vliyanie na ehkosistemy antarkticheskih i arkticheskih regionov: tez. dokl. mezhdunar. nauchn. konf., 2011 g.; MMBI KNC RAN. Apatity: Izd. KNC RAN, 2011. S. 53–54.

P.A. Kashulin, N.V. Kalacheva

DIURNAL PHOTOSYNTHETIC CYCLES AND COLD HARDINESS OF NORTHERN PLANTS

A long-term study of photosynthetic activity was carried out for Kola North native deciduous arboreal and for cultivated plant species in terms of pulse amplitude modulated chlorophyll fluorescence with a portable PAM-2100 fluorometer.

The day-to-day temporal pattern in photochemical conversion amongst monitored plants appeared to have a diurnal rhythm related to chlorophyll fluorescence of attached leaves. The rhythm has been retained throughout August to October 2014. A regular amplitude noon abatement followed by evening growth was inhered in quantum yield of PS II diurnal run. This master regular rhythm showed the species-dependent susceptibility to both abrupt temperature falls and fluctuations in UV. The assimilation of most cold hardy Salix caprea, and of Lonicera edulis, L. tatarica, Syringa josikaea had more robust diurnal cycles as compared to Betula pendula. In resistant species, the activation was found in heat dissipation of antennae excited states after night frost events, it resulted in sharp rise of NPQ. It is supposed that plant cold hardiness and frost resistance are connected with both protective down regulation of PSII and with clock mechanisms controlling a diurnal rhythm of photochemical conversion.

Keywords: Subarctic, deciduous plants, photosynthesis, cyclicity, cold hardiness, chlorophyll, fluorescence.

Authors
Piotr A. Kashulin – Dr. Sc. (Biol.) major scientific researcher of Polar Alpine Botanical Garden and Institute KSC RAS; e-mail: falconet1@yandex.ru
Natalya V. Kalachiova – junior scientific researcher of Polar Alpine Botanical Garden and Institute KSC RAS; e-mail: natty1000@yandex.ru

REFERENCES
1. Direct human influence on atmospheric CO2 seasonality from increased cropland productivity / *J.M. Gray, S. Frolking, E.A. Kort, D.K. Ray, Ch.J. Kucharik, N. Ramankutty, M.A. Friedl* // Nature. 2014. Vol. 515, No 7527. R. 398–401. **2.** Funct. Ecolol. Chlorophyll fluorescence as a probe of he photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrumentation / *H.R. Bolhar-Nordenkampf, S.P. Long, N.R. Baker, G. Oquist, U. Schreiber, E.G. Lechner*. 1989. Vol. 3. P. 497–514. **3.** *Kashulin P.A., Kalacheva N.V.* Vozrastnye izmeneniya funkcij fotosinteticheskogo apparata sosny evropejskoj // Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2011. № 2 (5). S. 34–40. **4.** Izuchenie fiziologicheskogo sostoyaniya drevesnyh rastenij po harakteristikam fluorescencii v kore odnoletnih pobegov derev'ev / *P.S. Venediktov, YU.V. Kazimirko, T.E. Krendeleva, G.P. Kukarskih, V.V. Makarova, S.I. Pogosyan, O.V. Yakovleva* // Ehkologiya. 2000. № 5. S. 338–342. **5.** Fotohimicheskie processy v rasteniyah na Severe i okruzhayushchaya sreda / *P.A. Kashulin, N.V. Kalacheva, N.A. Artemkina, S.A. Chernous* // Vestnik MGTU. 2009. T. 12, vyp. 1. S. 137–142. **6.** *Genty B., Briantais J-M., Raker N.R.* The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence // Biochim. Biophys. Acta. 1989. Vol. 990. P. 87–92. **7.** New flux parameters for the determination of QA redox state and excitation fluxes / D.M. Kramer, J. Johnson, O. Kiirats, G.E. Edwards // Photosynthesis Research. 2004. Vol. 79. P. 209–218. **8.** Klughammer Ch., Schreiber U. Complementary PS II quantum yields calculated from simple parameters measured by PAM fluorometry and the saturation pulse method // PAM Application Notes. 2008. Vol. 1. P. 27–35. **9.** A clock-work green circadian programs in photosynthetic organisms / *C.H. Johnson, M. Knigh, A. Trewavas, T. Kondo; P.J. Lumsden, A.J. Millar*, eds. // Biological Rhythms and Photoperiodism in Plants. BIOS Scientific Publishers, Oxford. 1998. P. 1–34. **10.** *Somers D.E.* The physiology and molecular bases of the plant circadian clock // Plant Physiology. 1999. Vol. 121. P. 9–19.

S.V. Asming, N.R. Kirillova

TO CHARACTERISTIC OF SOME RIVERINE GRASS BOGS IN THE CENTRAL PART OF MURMANSK REGION

The floristical structure, environmental ecological characteristics and features of three riverine grass bogs at south-east locality of Apatity are described. These plant communities are impacted by calcium-containing flows from Dolomitovaya mountain, but there are no many rare and calcium-favoured species. However, these riverine grass bogs have resource and regional economic importance.

Keywords: grass bogs, resources, plants, Murmansk region.

Authors
Svetlana V. Asming – PhD (Biol.), assistant laboratory researcher of Polar Alpine Botanical Garden and Institute KSC RAS, Assistant Professor of Kola Branch of Petrozavodsk State University; e-mail: asming@yandex.ru
Natalya R. Kirillova – junior scientific researcher of Polar Alpine Botanical Garden and Institute KSC RAS; e-mail: knr81@mail.ru

REFERENCES
1. Blinova I.V. O nekotoryh osobennostyah struktury populyacij sosudistyh rastenij v fitocenozah travyanyh bolot Murmanskoj oblasti // Bioraznoobrazie i kul'turocenozy v ehkstremal'nyh usloviyah: Materialy dokladov Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Apatity: «K&M», 2012. S. 17–19. **2.** *Blinova I.V., Petrovskij M.N.* K harakteristike minerotrofnyh travyanyh bolot v central'noj chasti Murmanskoj oblasti i o neobhodimosti ih ohrany // Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2014. №3. S. 38–55. **3.** *Cherepanov S.K.* Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nyh gosudarstv (v predelah byvshego SSSR). SPb.: Mir i sem'ya, 1995. 992 s. **4.** *Zajceva T.A.* K sistematike Krovohlebki lekarstvennoj // Byull.

GBS. M.: Nauka, 1980. Vyp. 117. S. 31–36. **5.** Krasnaya kniga Murmanskoj oblasti. 2-e izd., pererab. i dop. / otv. red. *N.A. Konstantinova, A.S. Koryakin, O.A. Makarova, V.V. Bianki*. Kemerovo: Izd. Aziya-print, 2014. 584 s. **6.** Rastitel'nye resursy Rossii. Dikorastushchie cvetkovye rasteniya, ih komponentnyj sostav i biologicheskaya aktivnost'. T. 3. Semejstva Fabaceae-Apiaceae. 2010. 608 c. **7.** *Boch M.S.* O bolotah lesnoj polosy Kol'skogo poluostrova // Bot. zhurn. 1989. T. 74, № 12. S. 1747–1756. **8.** *Boch M.S., Smagin V.A.* Redkie associacii bolot Severo-Zapada Evropejskoj chasti SSSR. (II. Primulo-Schoenetum ferruginei Oberd. 62, Caricetum hostianae ass. nova, Cladietum marisci Allorge 22) // Byul. MOIP. 1987. T. 92, vyp. 4. S. 104–110. **9.** *Smagin V.A.* Rastitel'nost' bolot taezhnoj zony evropejskoj Rossii // Fundamental'nye i prikladnye problemy botaniki v nachale XXI veka: materialy vseros. konf. (g. Petrozavodsk, 22–27 sentyabrya 2008 g.). CH. 5: Geobotanika. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2008. S. 286–289. **10.** *Smagin V.A.* Kompleksy rastitel'nyh soobshchestv bolot taezhnoj zony evropejskoj Rossii // Bot. zhurn. 2014. T. 99, № 11. S. 1185–1223. **11.** *Koroleva N.E.* Osnovnye biotopy severo-taezhnyh lesov i berezovyh krivolesij Murmanskoj oblasti: landshaftnoe i botanicheskoe raznoobrazie, osnovaniya dlya ohrany // Vestnik MGTU. 2011. T. 14, № 4. S. 819–832.

V.A. Dauvalter, N.A. Kashulin

THE MAIN REGULARITIES OF HEAVY METALS DISTRIBUTION IN LAKES SEDIMENTS FOR THE NORTHWEST PART OF MURMANSK REGION AND THE BORDER TERRITORY OF ADJACENT COUNTRIES

On the basis of the researches done during the last quarter century, the main consistent patterns of heavy metals distribution in lakes sediments for the northwest part of Murmansk Region and the border area of the adjacent countries are determined. The increase in the contents of Ni, Cu and Co in lake sediments had been usually found in the layers with the age estimated as 1920th-1930th, and the maximum values were noted in 1970th-1980th as a result of metallurgical activity in this region. Significant increase of Pb concentration was recorded in lake sediments at the beginning of the 18th century. Pb becomes one of the main pollutants when moving farther from the Pechenganikel Company. It is especially typical for Finnish and Norwegian lakes. The considerable increase in the contents of chalcophile Pb, Hg, As and Cd in lake sediments occurred in the middle of the last century; it was connected with intensive industrial development after the Second World War, including more and more growing use of leaded gasoline as well as renewal of metallurgical production in the region.

Keywords: sediments, lakes, Murmansk region, heavy metals, pollution.

Authors

Vladimir A. Dauval'ter – Dr. Sc. (Geogr.), Professor, major scientific researcher of *Institute of North Industrial Ecology Problems* KSC RAS; e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

Nikolay A. Kashulin – Dr. Sc. (Biol.), Professor, Head of Laboratory on Aquatic Ecosystems, vice-director on science of Institute of Northern Industry Ecology Problems KSC RAS; e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

REFERENCES

1. *Moreckij V.N.* O nekotoryh harakteristikah dolgoperiodnogo krupnomasshtabnogo vzaimodejstviya okeana s atmosferoj severnogo polushariya // Tr. AANII. Leningrad, 1976. T. 319. S. 4–23. **2.** *Moiseenko T.I.* Teoreticheskie osnovy normirovaniya antropogennyh nagruzok na vodoemy Subarktiki. Apatity: Izd. KNC RAN, 1997. 261 s. **3.** *Kashulin N.A.* Ryby malyh ozer severnoj Fennoskandii v usloviyah aehrotekhnogennogo zagryazneniya. Apatity: Izd. KNC RAN, 2004. 130 s. **4.** Catalogue of lakes in the Russian, Finnish and Norwegian Border Area / *N.A. Kashulin, V.A. Dauvalter, S.S. Sandimirov, I.M. Koroleva* // Finland, Kuopio: Kopijyva Oy, 2008. 141 p. **5.** Mur Dzh.V., Ramamurti S. Tyazhelye metally v prirodnyh vodah. M.: Mir, 1987. 285 s. **6.** *Zejler G.* Nekotorye problemy analiza biologicheskih materialov na soderzhanie toksichnyh ehlementov v sledah // Nekotorye voprosy toksichnosti ionov metallov. M.: Mir, 1993. S. 246–269. **7.** *Blevins R.D., Pancorbo O.C.* Metal concentrations in muscle of fish from aquatic systems in east Tennessee, U.S.A. // Water, Air and Soil Pollution. 1985. No. 29. P. 361–371. **8.** *Nriagu J.O.* Global metal pollution // Environment. 1990. Vol. 32. P. 6–21. **9.** *Sorensen E.M.* Metal poisoning in fish, U.S.A. Texas: CRC Press, 1992. 362 p. **10.** Moiseenko T.I. Zakislenie i zagryaznenie tyazhelymi metallami poverhnostnyh vod Kol'skogo Severa. Apatity: Izd. KNC RAN, 1991. 48 s. **11.** Formirovanie kachestva vod i

donnyh otlozhenij v usloviyah antropogennyh nagruzok na vodoemy arkticheskogo bassejna (na primere Kol'skogo Severa) / *T.I. Moiseenko, I.V. Rodyushkin, V.A. Dauval'ter, L.P. Kudryavceva*. Apatity: Izd. KNC RAN, 1996. 263 s. **12.** *Moiseenko T.I.* Zakislenie vod: faktory, mekhanizmy i ehkologicheskie posledstviya. M: Nauka, 2003. 276 c. **13.** Horowitz A.J. A primer on trace metal-sediment chemistry. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 2nd rew. ed., 1991. 136 p. **14.** Ehkologicheskij katalog ozer Murmanskoj oblasti. Severo-zapadnaya chast' Murmanskoj oblasti i prigranichnoj territorii sopredel'nyh stran: v 2 ch. / *N.A. Kashulin, S.S. Sandimirov, V.A. Dauval'ter, P.M. Terent'ev, D.B. Denisov*. Apatity: Izd. KNC RAN, 2009. CH. 1. 226 s.; CH. 2. 262 s. **15.** *Dauval'ter V.A.* Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodnyh ob"ektah Evropejskoj Subarktiki (prirodoohrannye aspekty problemy): dis. … dokt. geogr. nauk. Apatity, 1999. 399 s. **16.** *Dauvalter V.* Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61. **17.** *Dauval'ter V.A.* Koncentracii tyazhelyh metallov v donnyh otlozheniyah ozer Kol'skogo poluostrova kak indikator zagryazneniya vodnyh ehkosistem // Problemy himicheskogo i biologicheskogo monitoringa ehkologicheskogo sostoyaniya vodnyh ob"ektov Kol'skogo Severa. Apatity: Izd. KNC RAN, 1995. S. 24–35. **18.** *Dauval'ter V.A.* Zagryaznenie donnyh otlozhenij vodosbora reki Pasvik tyazhelymi metallami // Geoehkologiya. 1997. № 6. S. 43–53. **19.** *Dauval'ter V.A.* Tyazhelye metally v donnyh otlozheniyah ozerno-rechnoj sistemy ozero Inari – reka Pasvik // Vod. resursy. 1998. T. 25, № 4. S. 494–500. **20.** *Dauval'ter V.A.* Himicheskij sostav donnyh otlozhenij subarkticheskogo ozera pod vliyaniem gornoj metallurgii // Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya. 2002. № 4. S. 65–73. **21.** *Dauvalter V., Rognerud S.* Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18. **22.** *Dauvalter V.* Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia // J. Environ. Monitor. 2003. Vol. 5 (2). P. 210–215. **23.** Airborne contamination by heavy metals and aluminium in the freshwater ecosystems of the Kola subarctic region (Russia) / *T.I. Moiseenko, L.P. Kudryavtseva, I.V. Rodyushkin* [et al.] // Sci. Tot. Environ. 1995. Vol. 160/161. P. 715–727. **24.** *Dauval'ter V.A.* Geoehkologiya donnyh otlozhenij ozer. Murmansk: Izd-vo Murmanskogo gos. tekhn. un-ta, 2012. 242 s. **25.** *Dauval'ter V.A., Kashulin N.A.* Himicheskij sostav donnyh otlozhenij sistemy reki Pasvik v usloviyah global'nogo i lokal'nogo zagryazneniya // Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2014. № 2. S. 106–121. **26.** *Rognerud S., Norton S.A., Dauvalter V.* Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/ 93, 1993. 18 p. **27.** Nekotorye aspekty sovremennogo sostoyaniya presnovodnyh resursov Murmanskoj oblasti / *N.A. Kashulin, V.A. Dauval'ter, D.B. Denisov, S.A. Val'kova, O.I. Vandysh, P.M. Terent'ev, A.N. Kashulin* // Vestnik MGTU. 2013. T. 16, №1. S. 98–107. **28.** *Appleby P.G., Oldfield F.* The calculation of the 210Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to sediments // Catena. 1978. Vol. 5. P. 1–8. **29.** Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.

V.I. Demin, A.P. Antsyferova, O.I. Mokrotovarova

CHANGES OF THE AIR TEMPERATURE IN MURMANSK SINCE THE 19th CENTURY

Meteorological measurement in Murmansk started in 1918. The weather station was relocated in 1924 and 1934. For this reason, homogeneous time series of air temperature in Murmansk began in 1935 only. However, there are long-running temperature records from other sites in the Northern Europe (Kola, Vardo, Tornedalen), that had been started before the observation in Murmansk. Linear regression relationships for temperature data from various sites were obtained for periods with overlapping observations. These relations were applied to periods with no data in Murmansk and corresponding data for other sites. This method permits reconstruction of temperatures in Murmansk back to 1802. These early data has been combined with the temperature series from the weather station in Murmansk, which began in 1935.

All four seasons of reconstructed time-series show evident warming trend between 1802 and 2013. Magnitude and rate of the temperature rise vary with time as local temperatures depend on changes in patterns of the large-scale atmospheric circulation. The rise of winter temperatures reached culmination in the 1930s. During following years, temperatures were falling until the 1970s. The new warming began in the late 1980s, but it does not exceed the level of the 1930s yet. Average spring, summer, autumn temperatures calculated for the periods 1984-2013, 1994-2013 and 2004-2013's years were the warmest ones among any similar periods during the past 211 years.

Keywords: Murmansk region, climate, climate change, statistical climatology.

Authors
Valery I. Diomin – scientific researcher of Polar Geophysical Institute KSC RAS; e-mail: demin@pgia.ru
Aleksandra R. Antsiferova – meteorologist of Murmansk Administration on Hydrometeorology and Environmental Monitoring; e-mail: klimat@kolgimet.ru
Olga I. Mokrotovarova – Chief of Murmansk Administration on Hydrometeorology and Environmental Monitoring; e-mail: leader@kolgimet.ru

REFERENCES
1. *Demin V.I.* Osnovnye klimaticheskie tendencii na Kol'skom poluostrove za period instrumental'nyh meteorologicheskih nablyudenij // Trudy KNC RAN. "Prikladnaya ehkologiya Severa". 2012. 2 (9). Apatity, 2012. S. 98–110. **2.** *Rubinshtejn E.S.* Klimat SSSR. CH. 1. Temperatura vozduha. Vyp. 2. Srednie mesyachnye temperatury vozduha v Evropejskoj chasti SSSR za otdel'nye gody s sevra do 55 s.sh. L.: GGO, 1929. 180 s. **3.** *Yakovlev B.A.* Klimat Murmanska. L.: Gidrometeoizdat, 1972, 108 s. **4.** Spravochnik po klimatu SSSR. L., Gidrometeoizdat, 1965. Vyp. 2, ch. 1. 144 s. **5.** *Kobysheva N.V., Narovlyanskij G.YA.* Klimatologicheskaya obrabotka meteorologicheskoj informacii. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 296 s. **6.** Metody klimatologicheskoj obrabotki meteorologicheskih nablyudenij / pod red. O.A. Drozdova. L.: Gidrometeoizdat, 1957. 492 s. **7.** *Demin V.I.* Neklimaticheskie klimaticheskie izmeneniya // Materialy glyaciologicheskih issledovanij. 2012. № 1. S. 110–114. **8.** *Andresen L.* Homogenization of monthly long-term temperature series of mainland Norway. Met.no. Note 2, 2011. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway. Rezhim dostupa: http: //met.no/filestore/Homog_Norway.pdf **9.** *Klingbjer P. and Moberg A.* A composite monthly temperature record from Tornedalen in northern Sweden, 1802–2002, Int. Journal of Climatology, 2003. 23:1465–1494. **10.** *Lobanov V.A., Smirnov I.A., SHadurskij A.E*. Praktikum po klimatologii. CHast' 1: uchebnoe posobie. Spb.: RGGMU, 2011. 145 s. **11.** Svod pravil po proektirovanie i stroitel'stvu: SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskih harakteristik. M.,: 2004. **12.** *Semenov A.V.* Instrumental'nye klimaticheskie nablyudeniya na Kol'skom poluostrove i osobennosti obsluzhivaniya regional'nyh potrebitelej klimaticheskoj informaciej // doklad na Mezhd. konferencii «Adaptaciya k izmeneniyu klimata i ee rol' v obespechenii ustojchivogo razvitiya regionov», Murmansk, 13 maya 2008 g. // Rezhim dostupa: http://www.myshared.ru/slide/378692 **13.** Climate changes 2014. Physical bases. Fifth Assessment Report. Rezhim dostupa: http://www.ipcc.ch/report/ar5. **14.** *Hromov S.P., Mamontova L.I.* Meteorologicheskij slovar'. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 568 s. **15.** *Girs A.A.* Makrocirkulyacionnyj metod dolgosrochnyh meteorologicheskih prognozov. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 488 s. **16.** *Demin V.I., Svyashchennikov P.N., Ivanov B.V.* Izmeneniya krupnomasshtabnoj cirkulyacii atmosfery i sovremennoe poteplenie klimata na Kol'skom p-ove // Vestnik KNC RAN. T.84. №2, S. 101-105. **17.** Oke T.R. Klimaty pogranichnogo sloya. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 360 s. **18.** Mikroklimat SSSR / pod red. *I.A. Gol'cberg*. L., Gidrometeoizdat, 1967. 286 s. **19.** *Mishchenko Z.A.* Bioklimat dnya i nochi. L., Gidrometeoizdat, 1984. 280 s.

V.A. Myazin

DETERMINATION OF HYDROCARBONS AND PRODUCTS OF THEIR TRANSFORMATION AT POLLUTION OF CULTIVATED PODZOLIC SOILS IN THE EURO-ARCTIC REGION

The article discusses assessment of soil contamination by hydrocarbons and products of their transformation. A comparative analysis of the contaminated soil was carried out by two ways, namely IR spectroscopy and separation of the chloroform bitumoid. It is shown that increasing of pollution period as well as cleaning and recovery of soil (application of mineral and organic fertilizers or bacterial preparations) results in a redistribution of the components of the soil bitumoid. Quantity of petroleum hydrocarbons, determined by IR spectroscopy goes down, while quantity of products of their transformation increases. Moreover, some of these products may negatively affect the soil. After 3 years of contamination, content of the products of transformation for hydrocarbons can reach 90% of the organic matter of the soil bitumoid. That is why the extent of residual contamination cannot be fully assessed by using IR spectroscopy only, without additional research.

Keywords: oil, soil bitumoid, bioremediation, cultivated podzolic soil.

Author
Vladimir A. Myazin – PhD (Biol.), deputy scientific researcher of *Institute of North Industrial Ecology Problems* KSC RAS; e-mail: myazin@inep.ksc.ru

REFERENCES
1. *Rogozina E.A.* Aktual'nye voprosy problemy ochistki neftezagryaznennyh pochv // Aktual'nye problemy prognozirovaniya, poiskov, razvedki i dobychi nefti i gaza v Rossii i stranah SNG // Geologiya, ehkologiya, ehkonomika. SPb.: Nedra, 2006. S. 522–528. **2.** *Odincova T.A.* Razrabotka tekhnologii identifikacii i monitoringa neftyanyh zagryaznenij: dis. … kand. tekhn. nauk: 25.00.36. Perm', 2010. 214 s. **3.** *Zubajdulin A.A.* Ocenka ehkologicheskih riskov pri neftyanom zagryaznenii bolot v Hanty-mansijskom avtonomnom okruge – YUgre // Biodiagnostika v ehkologicheskoj ocenke pochv i sopredel'nyh sred: tezisy dokladov mezhdunarodnoj konferencii. M.: BINOM. Laboratoriya znanij, 2013. S. 83. **4.** GOST 17.1.4.01-80. Obshchie trebovaniya k metodam opredeleniya nefteproduktov v prirodnyh i stochnyh vodah. Ohrana prirody // Gidrosfera. 1980. 13 s. **5.** PND F 16.1:2.2.22-98. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli nefteproduktov v pochvah i donnyh otlozheniyah metodom IK-spektrometrii. M. 1998. 15 s. **6.** *Bachurin B.A., Odincova T.A.* Problemy diagnostiki i kontrolya neftyanyh zagryaznenij prirodnyh geosistem // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij. 2005. № 9–10. S. 79–82. **7.** Metodicheskoe rukovodstvo po lyuminiscentno-bituminologicheskim i spektral'nym metodam issledovaniya organicheskogo veshchestva porod i neftej. M.: Nedra, 1979. 204 s. **8.** Problema diagnostiki i normirovaniya zagryazneniya pochv neft'yu i nefteproduktami / YU.I. Pikovskij, A.N. Gennadiev, S.S. CHernyanskij, G.N. Saharov // Pochvovedenie. 2003. № 9. S. 1132–1140. **9.** *Evdokimova G.A., Mozgova N.P., Mihajlova I.V.* Sposoby bioremediacii pochv Kol'skogo Severa pri zagryaznenii dizel'nym toplivom // Agrohimiya. 2009. № 6. S. 61–66. **10.** Ochishchenie pochv i stochnyh vod ot nefteproduktov kombinirovannymi metodami v usloviyah Severa / G.A. Evdokimova, A.SH. Gershenkop, N.P. Mozgova, V.A. Myazin, N.V. Fokina // Vestnik KNC RAN. 2010. № 3. S. 34–39. **11.** Dinamika ubyli nefteproduktov iz agrozemov i ih mikrobiologicheskaya aktivnost' / N.V. Fokina, V.A. Myazin, N.P. Mozgova, G.A. Evdokimova // Mezhdunarodnaya konferenciya «Antropogennaya transformaciya prirodnoj sredy»: materialy konferencii. 2010. T. III. S. 452–458. **12.** *Evdokimova G.A., Masloboev V.A.* Bioremediaciya zagryaznennyh nefteproduktami pochv v usloviyah Kol'skogo Severa // Murmanshel'fInfo. 2011. №2 (15), Aprel'. S. 34–38. **13.** Bioremediation of Oil-Polluted Cultivated Soils in the Euro-Arctic Region / *Galina Evdokimova, Vladimir Masloboev, Natalia Mozgova, Vladimir Myazin and Nadezda Fokina* // Journal of Environmental Engineering A. 2012. Vol. 1, № 9. P. 1130–1136. **14.** *Masloboev V.A., Evdokimova G.A.* Bioremediation of oil product contaminated soils in conditions of North Near-Polar Area // Proceedings of the Murmansk state technical university. 2012. Vol. 15, №2. R. 357–360. **15.** Myazin V.A. Razrabotka sposobov povysheniya ehffektivnosti bioremediacii pochv Kol'skogo Severa pri zagryaznenii nefteproduktami (v usloviyah model'nogo opyta): dis. … kand. biol. nauk: 03.02.08. Apatity, 2014. 168 s.

M.A. Tarakanov

INTEGRATION OF SCIENCE AND PRODUCTION IN THE MURMANSK REGION DURING THE XI FIVE-YEAR PLAN (1981–1985)

Work of the Council on assistance to speeding up scientific and technical progress of enterprises at the Murmansk regional committee of the Communist Party of the Soviet Union during the XI five-year plan is elucidated. In fond remembrance of Academician of RAS V.T. Kalinnikov, passed away in January 2015, his speeches at plenary sessions of the Council, kept by the author of the article as the scientific secretary of the Council in 1983-1985, are presented.

Keywords: Murmansk region, scientific-technical progress, Kola Branch of the Academy of Sciences of the USSR, V.T. Kalinnikov.

Author
Mikhail A. Tarakanov – senior scientific researcher of Institute of Economical Problems KSC RAS; e-mail: tarakanov@iep.kolasc.net.ru

REFERENCES
1. *Vinogradov A.N.* Izuchat' Arktiku nuzhno soobshcha. Dlya ehtogo gotovitsya programma vosstanovleniya potenciala Kol'skogo nauchnogo centra // Murmanskij vestnik. 18.12.2014 g. **2.** *Alimov A.N., Masloboev V.A.* Gosudarstvennaya innovacionnaya politika Murmanskoj oblasti i innovacionnyj potencial regiona. Rezhim dostupa: http://www.kolasc.net.ru/russian/innovation_ksc/vved.pdf. Dost. 12.02.2015.

A.G. Oleynik, A.V. Kharitonov

RESULTS OF THE PROJECT «RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS FOR INFORMATION PROTECTION OF ON THE BASIS OF THE BIOMETRIC USERS IDENTIFICATION IN THE SYSTEMS OF INFORMATION SUPPORT TO DEVELOPMENT OF RUSSIAN ARCTIC TERRITORY»

The study's results are presented on development of methods for computer processing of iris digital images to be used for biometric identification of users in distributed management systems for territories development support.

In the frame of the project, the authors have developed: methods and algorithms for the operative search for the pupil in the image of an iris; algorithms for encryption of biometric data in order to prevent attempts of counterfeiting and discrediting the data; recommendations on the use of technologies to identify users by their iris in distributed systems of management support.

Keywords: biometric identification, iris, processing of digital image, information protection, structure of identification system.

Authors
Andrey G. Oleynik – Dr. Sc. (Tech.), vice-director on science of Institute for Informatics and Mathematical Modelling KSC RAS; Chairman of Information Systems and Technologies Chair of Kola Branch of Petrozavodsk State University; e-mail: oleynik@iimm.ru
Andrey V. Kharitonov – programm designer of IT-sector of Volga State University of Technology; e-mail: kharitonov.a.v@yandex.ru

REFERENCES
1. *Haritonov A.V.* Olejnik A.G. Metod opredeleniya granicy zrachka na izobrazhenii glaza // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Informacionnye tekhnologii. Apatity: Izd. KNC RAN, 2014. Vyp. 5. S. 171–177. **2.** Sajt CBSR – Center for Biometrics and Security Research. Rezhim dostupa: http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris%20Databases%20CH.asp. **3.** John Daugman's webpage, Cambridge University, Faculty of Computer Science & Technology, Cambridge UK. Rezhim dostupa: http://www.cl.cam.ac.uk/~jgd1000/. **4.** *Matveev I.A.* Metody i algoritmy avtomaticheskoj obrabotki izobrazhenij raduzhnoj obolochki glaza: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni d.t.n.: 05.13.11. M., 2014. 290 s. Rezhim dostupa: http://www.ccas.ru/avtorefe/0012d.pdf **5.** *Ornaghi A.* Man in the middle attacks Demos / Alberto Ornaghi , Marco Valleri // Blackhat Conference – USA 2003. Rezhim dostupa: https://www.blackhat.com/presentations/bh-usa-03/bh-us-03-ornaghi-valleri.pdf. **6.** *Shannon C.* Communication Theory of Secrecy Systems // Bell System Technical Journal. 1949. Vol. 28(4). P. 656–715. **7.** Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM «Like-noise signals» № 2011610941. 25.01.2011 / A.N. Leuhin, A.S. Shuvalov, A.S. Petuhov, E.N. Potekhin, A.V. Haritonov **8.** University of Tehran IRIS (UTIRIS). Iris image database. Availabl e from http: // utiris.wordpress.com. **9.** MSDN – set' razrabotchikov Majkrosoft. Rezhim dostupa: http: // msdn.microsoft.com/ru-ru/default.as

Научное издание

ВЕСТНИК КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

1/2015(20)

Редактор А.С. Менделева
Корректор С.А. Шарам
Технический редактор В.Ю. Жиганов

Подписано к печати 19.01.2015.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times/Cyrillic.
Усл. печ. л. 21.73. Заказ № 5. Тираж 500 экз.

Российская Академия Наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр Российской академии наук,
редакция журнала «Вестник Кольского научного центра РАН»
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14
Тел.(81555)79226, факс (81555)76425; e-mail: usov@admksc.apatity.ru
Требования к оформлению статей: http://www.kolasc.net.ru/russian/news/vestnik/trebovaniya.pdf