

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ  
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

## **ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ**

**№ 1 (81)**

**ДОКЛАДЫ ИТОГОВОЙ СЕССИИ УЧЕНОГО СОВЕТА ААНИИ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ 2008 г.  
(19–23 января 2009 г., Санкт-Петербург,  
*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт*)**

Санкт-Петербург  
ААНИИ  
2009

Главный редактор  
*Фролов И.Е.* (ААНИИ)

Редакционная коллегия

*Данилов А.И.*  
(зам. главного редактора)

*Бузин И.В.*  
(ученый секретарь,  
тел. (812) 352-1227, e-mail: [buzin@aari.nw.ru](mailto:buzin@aari.nw.ru))

*Алексеев Г.В.* (ААНИИ)

*Грикуров Г.Э.* (ВНИИОкеангеология)

*Гудкович З.М.* (ААНИИ)

*Доронин Ю.П.* (РГГМУ)

*Зубакин Г.К.* (ААНИИ)

*Иванов В.Л.* (ВНИИОкеангеология)

*Катцов В.М.* (ГГО)

*Липенков В.Я.* (ААНИИ)

*Лихоманов В.А.* (ААНИИ)

*Макинас А.П.* (ААНИИ)

*Никифоров Е.Г.* (ААНИИ)

*Радионов В.Ф.* (ААНИИ)

*Рожков В.А.* (СПбГУ)

*Саватюгин Л.М.* (ААНИИ)

*Тимохов Л.А.* (ААНИИ)

*Шикломанов И.А.* (ГГИ)

## ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 1 (81)

Редактор: Е.В.Миненко  
Оригинал-макет и обложка: А.А.Меркулов, Е.А.Скутина  
Рисунок на обложке А.М.Козловского

Подписка на второе полугодие 2009 г. на журнал «Проблемы Арктики и Антарктики» принимается на всей территории Российской Федерации.

Подписной индекс издания 48657  
в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать»

ISSN 0555-2648

© Государственный научный центр РФ  
Арктический и антарктический  
научно-исследовательский институт  
(ГНЦ РФ ААНИИ), 2009.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
<i>Г.В.Алексеев, А.В.Пнюшков, Н.Е.Иванов, И.М.Ашик, В.Т.Соколов, П.Н.Головин, П.В.Богородский.</i> Комплексная оценка климатических изменений в морской Арктике с использованием данных МПГ 2007/08 .....	7
<i>З.М.Гудкович, В.П.Карклин, В.М.Смоляницкий, И.Е.Фролов.</i> О характере и причинах изменений климата Земли .....	15
<i>Н.Е.Иванов, А.П.Макштан, С.В.Шутилин, Р.М.Гунн.</i> Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси .....	24
<i>В.Ю.Бензман.</i> Измерение глубины слоя скачка плотности лазерным зондированием .....	42
<i>В.А.Ульев, И.В.Москвин.</i> Связь между спектром потоков солнечных протонов и амплитудой вариаций поглощения во время поглощения типа полярной шапки .....	52
<i>В.Г.Дмитриев.</i> Об одной возможности вероятностной интерпретации категорических прогнозов направления ветра на основе дистрибутивного подхода .....	59
<i>А.В.Богородский, Г.А.Лебедев.</i> Основные принципы построения гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на шельфе замерзающих морей для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений .....	69
<i>Г.А.Лебедев, В.П.Трипольников.</i> Разработка способа и технологических приемов разрушения атмосферных наледей взрывами .....	80
<i>В.А.Лихоманов, А.В.Чернов, Н.А.Крупина.</i> Экспериментальная реализация метода оценки глобальных ледовых нагрузок в экспедиции «Штокман-2008» .....	85
<i>С.П.Поляков, Б.В.Иванов, А.В.Клепиков, В.Д.Клоков, В.В.Лукин, В.Л.Мартьянов.</i> К вопросу о строительстве снежного аэродрома для тяжелых колесных самолетов в Центральной Антарктиде, на станции Восток .....	101
<i>Д.Ю.Большаянов, А.С.Макаров, Е.А.Морозова, М.В.Павлов, Л.М.Саватюгин.</i> Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер .....	108
<i>Е.Д.Добротина, Ш.Б.Тешебаев.</i> Полевой метод комплексной оценки антропогенного загрязнения почв и грунтов на территориях автономных поселений в Арктике .....	116
<i>Н.А.Бакунов, Д.Ю.Большаянов, Л.М.Саватюгин.</i> Особенности выноса глобального <sup>90</sup> Sr с водосбросов больших рек Субарктики в Северный Ледовитый океан .....	126
<i>В.А.Ульев, И.В.Москвин, М.И.Тясто, О.А.Данилова.</i> Риометрический метод определения жесткости геомагнитного обрезания спектра потока солнечных протонов на авроральных широтах .....	132
<i>Г.В.Казко.</i> О моделировании циркуляции подледникового озера Восток (Центральная Антарктида) .....	138
<i>А.Н.Мартинчик, В.Н.Шеповальников, Е.В.Пескова, В.А.Оношко, А.В.Домашенко, Е.Н.Лисенкова, В.И.Асауленко.</i> Содержание тяжелых металлов в продуктах питания и плазме крови населения Приуральского района .....	146
<i>М.В.Дорожжина, Л.М.Саватюгин.</i> Имена сотрудников ААНИИ на географических картах. Александр Иванович Гаудис .....	153
<i>Г.А.Лебедев</i> Виталий Васильевич Богородский (1919–1986) .....	156

## CONTENTS

Preface .....	5
<i>G.V.Alekseev, A.V.Pnuyshkov, N.E.Ivanov, I.M.Ashik, V.T.Sokolov, P.N.Golovin, P.V.Bogorodsky.</i> Assessment of the climatic changes in the marine Arctic with IPY 2007/2008 data .....	7
<i>Z.M.Gudkovich, V.P.Karklin, V.M.Smolyanitsky, I.E.Frolov.</i> On the character and causes of the Earth's climate changes .....	15
<i>N.E.Ivanov, A.P.Makshatas, S.V.Shutilin, R.M.Gun.</i> Long-term variability of climate characteristics in the area of Tiksi Hydrometeorological observatory .....	24
<i>V.Yu.Benzeman.</i> Measuring the depth of density maximal gradients layer by lidar sensing data .....	42
<i>V.A.Ulyev, I.V.Moskvin.</i> On connection between solar proton spectrum and amplitudes of absorption variations during polar cap absorption .....	52
<i>V.G.Dmitriev.</i> About the possibility of categorical wind direction forecast probabilistic representation and estimation based on the distribution-oriented approach .....	59
<i>A.V.Bogorodsky, G.A.Lebedev.</i> Basic principles of building-up the system of hydroacoustic monitoring of the dangerous ice formation at the shelf of freezing seas for the ensuring of the safe operation of the hydraulic facilities .....	69
<i>G.A.Lebedev, V.P.Tripolnikov.</i> Development of the mode and technological methods of destruction of the atmospheric icing with explosions .....	80
<i>V.A.Likhomanov, A.V.Chernov, N.A.Krupina.</i> Experimental implementation of the method of global ice loads' estimation during the expedition «Shtokman-2008» .....	85
<i>S.P.Poliakov, B.V.Ivanov, A.V.Klepikov, V.D.Klokov, V.V.Lukin, V.L.Mart'yanov.</i> On the building of snow runway for the heavy wheeled aircrafts at Vostok station, Central Antarctica .....	101
<i>D.Yu.Bolshiyarov, A.S.Makarov, E.A.Morozova, M.V.Pavlov, L.M.Savatyugin.</i> Polar regions environment during last millenium on the base of lake sediments investigations .....	108
<i>E.D.Dobrotina, Sh.B.Theshebaev.</i> Field method of the complex estimation of antropogenous pollution of the soils in areas of autonomous settlements in the Arctic .....	116
<i>N.A.Bakunov, D.Yu.Bolshiyarov, L.M.Savatyugin.</i> Peculiarities of global <sup>90</sup> Sr runoff from Watersheds of Subarctic big Rivers to the Arctic Ocean .....	126
<i>V.A.Ulyev, I.V.Moskvin, M.I.Tyasto, O.A.Danilova.</i> Riometer method of calculation of geomagnetic cutoff rigidity of spec .....	132
<i>G.V.Kazko.</i> On the modelling of subglacial lake Vostok circulation (Central Antarctica) .....	138
<i>A.N.Martinchik, V.N.Shepovalnikov, E.V.Peskova, V.A.Onoshko, A.V.Domashenko, E.N.Lisenkova, V.I.Asaulenko.</i> Contents of heavy metals in foods and blood serum of people living in near urals area of yamal-nenets autonomous okrug .....	146
<i>L.M.Savatyugin, M.V.Dorozhkina.</i> Names of AARI scientists on geographical maps. Alexander Ivanovich Gaudis .....	153
<i>G.A.Lebedev.</i> Vitalii Vasil'evich Bogorodsky (1919–1986) .....	156

## ПРЕДИСЛОВИЕ

19–23 января 2009 г. в Санкт-Петербурге в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте состоялась итоговая сессия Ученого совета ААНИИ, на которой обсуждались результаты работ 2008 года. В 2008 г. проекты ААНИИ выполнялись в рамках федеральных и региональных целевых программ, международного научно-технического сотрудничества, грантов РФФИ, внебюджетной деятельности.

На итоговой сессии было сделано 74 доклада, и в результате обсуждения были даны рекомендации опубликовать наиболее интересные и значимые материалы, которые и составили настоящий сборник. В докладах, представленных на секциях Ученого совета, изложены основные результаты работ по различным научным направлениям.

Оценка межгодовых и декадных изменений арктического климата в XX – начале XXI столетия, выполненная с использованием массивов отечественных и зарубежных океанографических, ледовых и атмосферных данных по Арктическому региону, позволила выявить изменения в приповерхностной атмосфере, Северном Ледовитом океане и морском ледяном покрове.

Рассмотрение характерных особенностей изменений климата Арктики и некоторых других регионов Земли с масштабами от десятилетий до столетий обнаружило полициклический характер климатических изменений, произошедших с конца XIX до начала XXI вв. В Арктике наибольшую амплитуду имели 60-летние циклы, с которыми связано чередование теплых и холодных эпох. Аналогичные циклы обнаружены и в других регионах планеты. Амплитуды этих колебаний, их вклад в общую изменчивость климата уменьшаются с широтой и различны в разных регионах. Такие колебания происходят на фоне более продолжительных изменений, которые обычно выражаются линейными трендами. Есть основание видеть в них проявление цикла продолжительностью около 200 лет. Его влияние создает межэпохальные различия в характере климатических изменений. Непосредственной их причиной является смещение пояса зонального переноса в атмосфере Северного полушария из высоких в умеренные широты. Это согласуется с климатическими вариациями состояния северного полярного вихря. Возможной их причиной являются изменения полной энергии, поступающей к Земле от Солнца, включая энергию солнечной активности. На основе реконструкции изменений этой энергии, а также фактических и восстановленных данных о температуре воздуха в Арктике и в Северном полушарии показано, что климатические изменения рассмотренных масштабов обусловлены естественными причинами.

На основании созданного ААНИИ и Тиксинским филиалом Якутского УГМС электронного архива всех доступных данных стандартных метеорологических наблюдений на полярной станции Тикси обоснован поддиапазонный подход к анализу изменчивости характеристик климата, приведены статистические оценки межгодовой изменчивости, годового хода, изменчивости синоптического масштаба и суточного хода. Это позволило высказать предположение о влиянии синоптических систем на многолетние тренды температуры воздуха и выявить согласованность трендов температуры воздуха и балла общей облачности в летний и зимний сезоны.

Рассмотрены экспериментальные вариации изменения поглощения коротких радиоволн в ионосфере над ст. Диксон во время нескольких явлений возрастания поглощения коротких радиоволн в ионосфере полярных широт (поглощения типа полярной шапки ППШ). Эти явления ППШ обусловлены потоками солнечных протонов (ПП) различного спектра от очень мягкого (с относительным преобладанием низкоэнергичных протонов) до очень жесткого (с относительным преобладанием высокоэнергичных протонов). Во время всех ППШ наблюдается спад поглощения в дневные часы, т.е. эффект полуденного восстановления (ПВ), и спад поглощения в ночные часы, т.е. эффект день-ночь вариации (ДНВ). Амплитуды спада поглощения во время ПВ и ДНВ сопоставлены со спектрами потоков протонов. Установлена следующая тенденция: чем мягче спектр, тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ.

При рассмотрении возможности вероятностной интерпретации и оценки достоверности прогностических направлений ветра на основе дистрибутивного подхода. Критерий оценки представляет собой вероятностную характеристику, позволяющую использовать ее в оптимизационных методах принятия решений на основе прогностических данных. Дистрибутивный подход дает возможность перевода категорической формы прогноза в вероятностный вид, при этом создаются условия для наглядного представления и визуализации вероятных направлений ветра для данного категорического прогноза. Предложенный подход предоставляет широкие возможности для детального анализа точности индивидуальных прогнозов для различных условий.

На основании анализа существующих гидроакустических средств (ГАС), которые могут быть использованы для обнаружения и оценки морфометрических характеристик подводных частей опасных ледяных образований (ОЛО) типа айсбергов, стамух, торосов, взаимодействие которых с морскими сооружениями может привести к разрушению последних разработаны принципы построения гидроакустического мониторинга ОЛО для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений и определена структура используемого ГАС, включающая систему дальнего (более 100 км) обнаружения ОЛО и систему ГАС, устанавливаемых на автономных необитаемых подводных носителях.

Рассмотрен новый способ очистки инженерных сооружений от наледей с использованием взрыва топливовоздушной смеси и соблюдение условий безопасного применения предлагаемой технологии, а также физические и технические основы способа, и дается пример расчета необходимой плотности распределения поджигающих зарядов, их массы, а также массы требуемого топлива для удаления наледи со сварной конструкции.

При проведении натуральных полномасштабных экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки на судно в северо-восточной части Баренцева моря (в экспедиции «Штокман-2008») исследовалось взаимодействие с различными ледяными образованиями: ровным льдом, различными типами торосов, айсбергами. Для определения сил, действующих на судно, применялись две измерительные системы, первая – позволяла фиксировать изменение кинематических параметров движения судна в процессе взаимодействия, вторая – измерить общий изгиб судна в вертикальной плоскости с помощью тензометрии.

Исследование изменений физико-механических свойств снега поверхности существующей ВПП ст. Восток при различных механических воздействиях на нее выявило ряд интересных закономерностей, в том числе изменение прочности снежного покрова во времени после механического воздействия. Получены значения оптимальных давлений на поверхность снега для достижения прочности покрытия, достаточного для посадки Ил-76ТД, и указаны структурные изменения снега после различных механических воздействий на него. Полученные экспериментальные данные позволяют создать теоретическую модель уплотнения холодного снега.

На основании обзора исследований озер и озерных отложений полярных областей показана роль озерных отложений в изучении палеоклимата голоцена. По данным изучения озерных отложений арктической области построены границы распространения малого ледникового периода в Российской Арктике. По результатам исследования озер оазиса Бангера (Антарктида), реконструирована граница всплывания ледника в результате трансгрессии моря 2000 лет назад.

Разработанная методика для проведения комплексной оценки антропогенного загрязнения арктических почв и грунтов в условиях, приближенных к полевым, показала, что уровень антропогенной нагрузки оценивается по содержанию в почве органических веществ.

Для больших рек европейской и азиатской частей Российской Севера, выполнены оценки выноса из почвенного покрова водосборов радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  за период в 30 лет. С повышением суровости климата в направлении с запада на восток снижалось поступление  $^{90}\text{Sr}$  с водосбора в гидрографическую сеть.

Предложенный метод (риометрический метод) расчета жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО) спектра потоков протонов солнечных космических лучей, проникающих в нижнюю ионосферу высоких широт после мощных солнечных вспышек, основан на использовании материалов риометрических и спутниковых наблюдений и модельного расчета изменения скорости ионизации, электронной концентрации и поглощения во время ППШ. Сопоставление расчетных и наблюдаемых значений поглощения, а также статистическая обработка результатов расчетов показывают, что применение значений ЖГО, полученных риометрическим методом, дает более точные величины поглощения, чем при использовании значений ЖГО, полученных по экспериментальным данным (спутниковые наблюдения) и траекторным расчетам.

Для решения проблемы моделирования циркуляции подледникового озера Восток предлагается применить специально разработанную гидродинамическую модель конвективной циркуляции в переменных завихренности – векторный потенциал, не использующую гидростатическое приближение. Приводятся некоторые результаты расчетов конвективных течений в бассейне кубической формы, демонстрирующие эффективность модели.

При исследовании путей попадания тяжелых металлов с пищевыми продуктами в организм человека проведен анализ содержания тяжелых металлов (хрома, никеля, кадмия) в крови волонтеров обследованных населенных пунктов в экологически неблагополучном поселке Харп и фоновых экологически чистых селах Аксарка и Белоярск.

*Редколлегия*

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В МОРСКОЙ АРКТИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ МПГ 2007/08

*д-р геогр. наук Г.В.АЛЕКСЕЕВ, науч. сотр. А.В.ПНЮШКОВ, науч. сотр. Н.Е.ИВАНОВ,  
канд. геогр. наук И.М.АШИК, зав. отделом В.Т.СОКОЛОВ,  
канд. геогр. наук П.Н.ГОЛОВИН, канд. физ.-мат. наук П.В.БОГОРОДСКИЙ*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru*

*В статье представлены результаты оценки многолетних изменений арктического климата в XX – начале XXI столетия. Рассмотрены изменения в приповерхностном слое атмосферы, состояния вод Северного Ледовитого океана и морского ледяного покрова. Используются массивы отечественных и зарубежных океанографических, ледовых и метеорологических данных по Арктическому региону, включая данные Международного полярного года 2007/08.*

*Ключевые слова:* изменения климата, Арктика, Арктический бассейн, МПГ 2007/08

### ВВЕДЕНИЕ

Арктика является одним из районов, для которых пока не удастся получить хорошего согласия между глобальными моделями и наблюдениями в воспроизведении происходящих изменений климата. В связи с этим необходимы исследования с использованием как данных мониторинга изменений состояния основных частей арктической климатической системы, так и результатов расчета этих изменений на глобальных моделях климата.

Широкомасштабные комплексные исследования, выполненные в ходе реализации программ и экспедиций МПГ 2007/08: «Арктика-2007», «Арктика-2008», NABOS, рейс НИС «Поларштерн» летом 2007 г., «Дрейфующие буи» («Ice-Tethered Profiler Program») и др., позволили получить уникальные данные о распределении температуры и солености вод Арктического бассейна Северного Ледовитого океана, использованные в данной работе. Данные о температуре воздуха предоставлены Е.И.Александровым, данные о распространении морских льдов в арктических морях – А.В.Юлиным и взяты с сайта National Snow and Ice Data Center (NSIDC).

### ИЗМЕНЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Для оценки региональных и сезонных особенностей изменений приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике и в северной полярной области за столетний период 1907–2007 гг. использованы среднемесячные данные 30 станций, расположенных к северу от 60° с.ш. Большая часть таких станций располагается в атлантической половине рассматриваемой области (к западу от меридиана 90–270°). С течением времени число станций увеличивалось, и после 1950 г. их насчитывалось уже более 200 [1]. Для обеспечения однородности временных рядов в условиях неравномерного покрытия рассматриваемой области изменяющимся числом станций расчет средних и анализ изменчивости полученных значений выполнен по постоянному набору станций.

Следует заметить, что можно рассчитывать средние значения и по сеточным массивам данных ПТВ, которые созданы в нескольких климатических центрах [8, 9, 10]. Однако эти массивы пополняются с задержкой, что не дает возможности рассматривать изменения за последние годы. Сеточные массивы использованы в этой работе для сравнения средних значений ПТВ с целью подтвердить репрезентативность оценок по ограниченному набору станций для рассматриваемой области. Сравнение средних значений по станциям с данными массива NCEP за 1951–2007 гг. и массива [10] за 1951–2000 гг. показало, что коэффициенты корреляции между ними находятся в пределах 0,81–0,90 с данными NCEP и 0,90–0,97 для данных [10].

Оценки тренда за весь период с 1907 по 2007 г. для всех рядов средней за год и за сезоны приповерхностной температуры воздуха во всей области и в приатлантической и тихоокеанской ее половинах положительны и, за исключением 5 рядов, значимы на 95 % и более уровне. Для всех рассматриваемых областей осенние (сентябрь–октябрь) тренды минимальны и незначимы, а весенние (апрель–май) максимальны и все значимы. В целом все тренды сильнее в тихоокеанской, чем в атлантической половине области. При этом оценки трендов неустойчивы к сдвигу начала ряда на более поздние годы. Их коэффициенты быстро убывают по мере приближения начала ряда к 1925 г. вплоть до смены знака тренда для зимы.

Сравнение средних температур за десятилетие 1997–2007 гг. с самым теплым десятилетием в период первого потепления показывает, что в среднем за год весной и летом ПТВ в последние десять лет выше во всех рассматриваемых районах. Однако зимой соотношение обратное для всей области и ее атлантической половины. Осенью последние десять лет несколько теплее, чем в десятилетия первого потепления. При этом самые теплые осенние сезоны в период первого потепления отмечались в конце 1940-х–начале 1950-х гг.

К 1951 г. к северу от 60° с.ш. насчитывалось уже более 200 метеорологических станций, что позволяет оценить изменения ПТВ при более равномерном и полном покрытии арктического региона данными метеорологических наблюдений. Особый интерес представляют изменения температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана. Изменения температуры в этой области в первую очередь влияют на зимнее разрастание и летнее таяние ледяного покрова. Изменение суммы положительных летних температур служит индикатором летнего теплового воздействия на лед, а сумма отрицательных температур за холодный период года характеризует максимальное увеличение объема льда зимой. Для оценки изменений обоих показателей термического влияния на ледяной покров выбраны данные 38 станций, расположенных на островах и побережье Северного Ледовитого океана, отку-

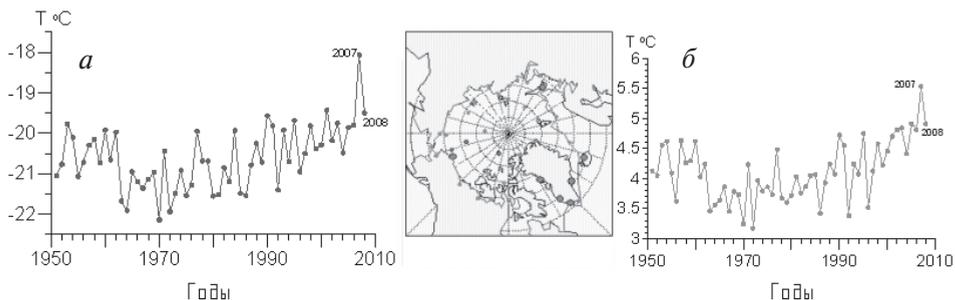


Рис. 1. Средняя зимняя (ноябрь–март)(а) и летняя (июнь–август)(б) ПТВ на 38 станциях в морской Арктике (на вставке) в 1951–2008 гг.

да начинается летнее отступление морских арктических льдов. Средние зимние и летние ПТВ на этих станциях начиная с 1951 г. показаны на рис. 1.

Графики на рис. 1 показывают быстрое убывание отрицательных температур после 1990 г. и рост положительных температур после 1995 г. с рекордом в 2007 г. Предыдущее значительно более слабое потепление согласно этим графикам отмечалось в 1950–1960-е гг. Для сравнения с первым потеплением были рассчитаны летние и зимние температуры по 30 станциям в области к северу от 60° с.ш. начиная с 1921 г. Они также подтвердили, что 2007 г. по этим показателям был самым теплым за период наблюдений, включающий в себя оба потепления.

### МОРСКОЙ ЛЕД

Морской ледяной покров играет важную роль во взаимодействии между Арктикой и остальной частью глобальной климатической системы и в то же время является индикатором изменений арктического климата. Наблюдаемое с начала 1980-х гг. сокращение площади, занимаемой морскими льдами в Северном полушарии (площадь морского льда (ПМЛ)), является очевидным свидетельством потепления в высоких широтах. Сокращение ПМЛ ускорилось в конце 1990-х гг., когда стали отмечаться последовательно рекордные минимумы летней (сентябрьской) ПМЛ с абсолютным минимумом (за период регулярных измерений со спутников в 1978 г.) в сентябре 2007 г. (4,30 млн км<sup>2</sup>) [11, 12, 13]. В сентябре 2008 г. ПМЛ несколько возросла (4,67 млн км<sup>2</sup>), но осталась на нисходящей ветви многолетних изменений (см. рис. 2).

Сравнение темпов сокращения ПМЛ за период развития современного потепления и в период потепления в Арктике в 1930–1940-е гг. возможно по данным о площади, занятой льдами в арктических морях с 1920-х гг. и по настоящее время. Тренды ПМЛ в арктических морях за полный период наблюдений, за 30-летние периоды потеплений в Арктике и за последние десять лет указывают на однозначную тенденцию к сокращению ПМЛ во все рассматриваемые периоды с усилением к последнему десятилетию для Сибирских морей в целом.

Особенно значительное сокращение ПМЛ в Сибирских морях, так же как и всего ледяного покрова в Арктике, произошло в последнее десятилетие (см. рис. 2). За 10 лет с 1997 по 2007 г. ПМЛ в сентябре сократилась на 26 % во всей Арктике и на 79 % в Сибирских морях. В то время как за весь период спутниковых наблюдений с 1979 по 2007 г. скорость сокращения составила 9,5 % за 10 лет для всей Арктики и 16,6 % за 10 лет для Сибирских морей.

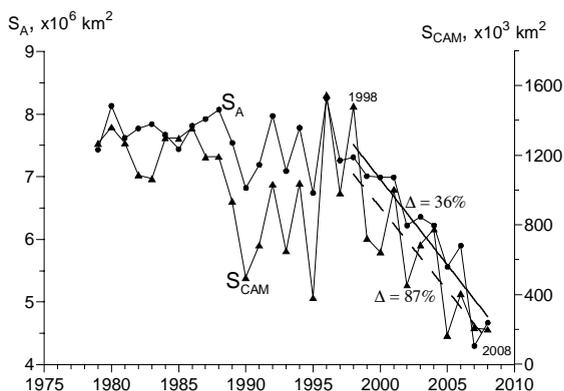


Рис. 2. Площадь, занятая морским льдом, в сентябре в Арктике ( $S_A$ ) и в Сибирских арктических морях ( $S_{CAM}$ ) в 1979–2008 гг.

## ОКЕАН

С развитием потепления Арктики с начала 1990-х гг. возрос интерес к изменениям в состоянии Северного Ледовитого океана, что проявилось в организации и осуществлении целого ряда международных и национальных программ арктических исследований. Важной составляющей этих программ являются морские экспедиционные исследования Арктического бассейна, благодаря которым были получены значительные объемы океанографических данных. В этот период впервые после обширных советских исследований 1970-х гг. удалось охватить наблюдениями большую часть бассейна. Правда, в отличие от наблюдений 1970-х гг., которые проводились в течение семи весенних сезонов на акватории всего бассейна [6], наблюдения 1990-х гг. покрыли бассейн в течение десятилетия. В 2000-е гг. число океанографических наблюдений возрастало, а в период Международного полярного года 2007/08 оказалось достаточным для покрытия почти всего Арктического бассейна в течение одного летнего сезона.

Океанографические данные, собранные в СЛО до начала 1990-х гг., были использованы при подготовке климатических атласов [4, 5] и цифровых океанографических атласов СЛО для зимнего и летнего периодов [7], в которые вошли данные за 1948–1993 гг. Таким образом, были получены климатические океанографические характеристики СЛО в период до развития современного потепления Арктики, особенно детально представляющие климат СЛО в 1970-е гг. – десятилетие устойчивого состояния СЛО в период относительного похолодания между потеплением Арктики в 1930–1940-е гг. и современным потеплением. Средние океанографические поля за десятилетие 1970-х гг., представленные в атласе [7] для зимнего периода, были использованы при построении океанографических полей Арктического бассейна по данным экспедиционных наблюдений в период полевой фазы исследований по программам и проектам МПГ в 2007 г. (рис. 3).

Для построения полей океанографических характеристик использована идея выделения крупномасштабной составляющей поля путем согласования полученных данных с имеющимся климатическим полем [2]. Основанием для этого является консервативность крупномасштабной структуры водных масс океана, в частности Арктического бассейна, в котором сохраняется трехслойная структура вод (верхний холодный и опресненный слой, промежуточный слой воды атлантического происхождения с положительной температурой и нижележащий слой глубинных и придонных вод). Характеристики водных масс в этих слоях и границы между ними могут изменяться от года к году под влиянием как крупномасштабных процессов циркуляции атмосферы и водообмена с Атлантическим и Тихим океанами, так и локальных мезомасштабных процессов в океане. Данные наблюдений на отдельных станциях фиксируют состояние водных масс в данный момент времени, которое включает обе составляющие изменения относительно некоторого климатического состояния. В качестве такого климатического состояния использованы средние океанографические поля за десятилетие 1970-х гг., представленные в атласе [7] для зимнего периода. Эти поля построены по данным уникальных океанографических наблюдений в течение 8 весенних сезонов на сетке станций, покрывающей весь Арктический бассейн.

Построение крупномасштабной составляющей поля включает выбор сеточной области на климатическом поле, в которой выполнено некоторое число океанографических станций, расчет средних значений и отклонений от них для климатических и наблюдаемых значений, минимизацию расхождений между отклонениями (нахождение регрессии климатических отклонений на наблюдаемые) и расчет оптимизированных отклонений для каждого узла сеточной области с добавлением среднего по наблюдениям. Такая процедура позволяет получить крупномасштабную составляющую наблюдаемого поля, свободную от возмущений,

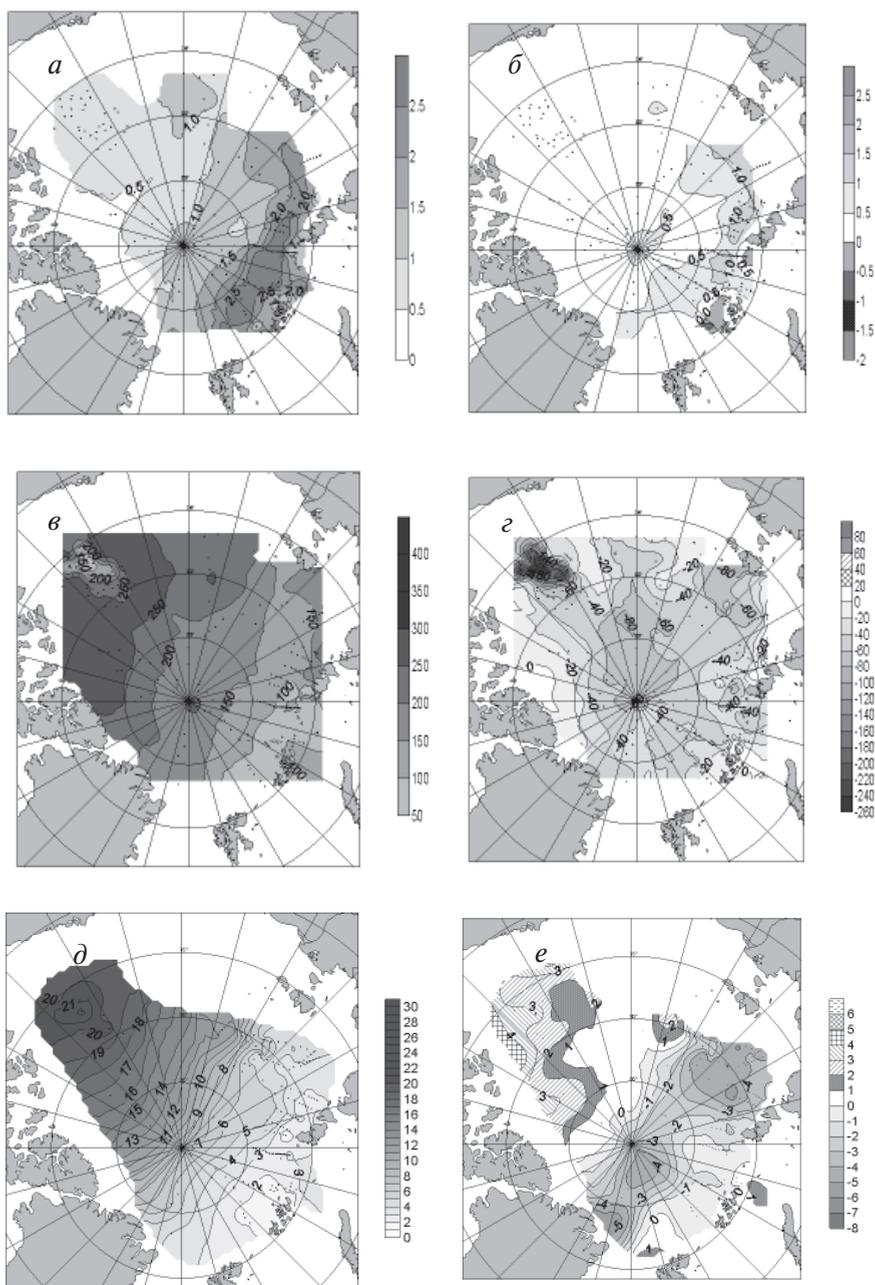


Рис. 3. Верхний ряд – максимальная температура в слое атлантической воды в Арктическом бассейне в 2007 г. (а) и аномалии относительно 1970-х гг. (б); средний ряд – глубина залегания верхней 0 °С изотермы в 2007 г. (в) и аномалии относительно 1970-х гг. (г); нижний ряд – содержание пресной воды (м) в слое от поверхности до глубины изохалины 34,80 psu (д) и аномалии относительно 1970-х гг. (е)

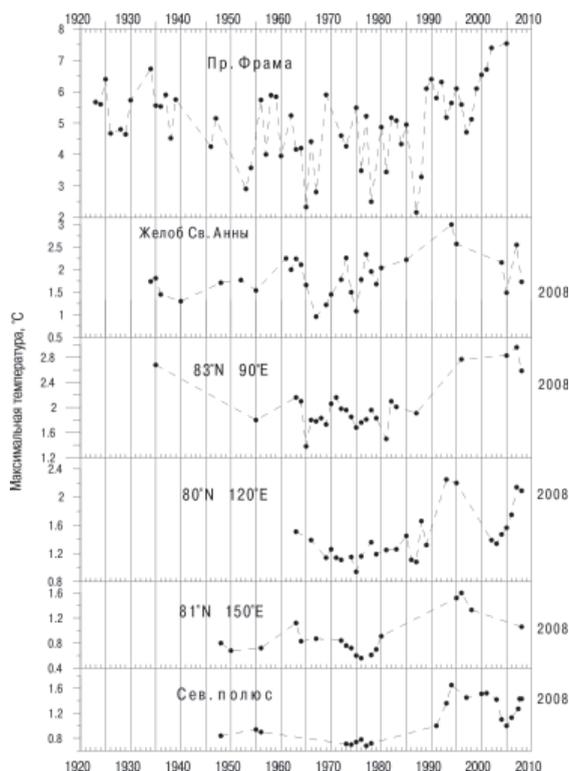


Рис. 4. Изменения максимальной температуры в слое атлантической воды в шести районах Арктического бассейна (слева) в 1924–2008 гг.

связанных с влиянием мезомасштабных процессов и ошибок в наблюдениях, и сохраняющую структуру климатического поля.

Применение предложенного метода позволило получить поля температуры, солёности и характеристик структуры водных масс на большей части акватории Арктического бассейна по данным наблюдений в 2007 г. (рис. 3). Распределения температуры воды в слое АВ в сравнении с климатическими температурами 1970-х гг. показали масштабы потепления в этом слое, охватившего весь Арктический бассейн. Максимальная температура в слое АВ увеличилась, особенно в области потока АВ вдоль материкового склона, превысив на востоке области на 1–1,5 °С уровень 1970-х гг. Одновременно поднялась верхняя граница слоя АВ, отождествляемая с нулевой изотермой. Уменьшение глубины нулевой изотермы составило от 20 до 80 м относительно ее глубины в 1970-е гг. Вследствие этих изменений опресненный верхний слой над областью потока АВ уменьшился и часть воды этого слоя сместилась в сторону Гренландии и Канадского архипелага, в результате усилился сток опресненной воды из Арктического бассейна через канадские проливы.

В условиях неопределенности последствий глобального потепления для океанического влияния на климат мониторинг поступления атлантической воды в Арктический бассейн — конечное звено североатлантической части глобального океанического «конвейера» — приобретает особое значение [3]. Океанографические наблюдения в Арктическом бассейне обнаружили начиная с 1990 г. повышение температуры в слое атлантической воды (АВ) на глубинах от 100 до 600 м. Это повышение началось на входе АВ в Арктический бассейн и затем распространи-

лось почти по всему бассейну. Данные о температуре АВ, полученные в 2007 и 2008 гг. в ходе экспедиционных исследований по программам МПГ 2007/08 гг. в Арктическом бассейне и сопоставленные с данными предыдущих наблюдений, показывают продолжение потепления (рис. 4).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наблюдений за приповерхностной температурой воздуха к северу от 60° с.ш. средние зимние ПТВ в этой области были выше в период первого потепления Арктики в 1930–1940-х гг., а наиболее значительные положительные тренды средней ПТВ за столетний период 1907–2007 гг. отмечены для весны и лета. Эти особенности заметнее всего в приатлантической половине области, а в тихоокеанской ее половине современное потепление и тренды выше, чем в приатлантической, во все сезоны года за исключением осени.

По более полным данным наблюдений за ПТВ в Арктике с 1951 г. рассчитаны средние ПТВ за холодный (ноябрь–апрель) и теплый (июнь–август) периоды года в области, соответствующей максимальному распространению морского льда зимой (морская Арктика). Абсолютные максимумы ПТВ для обоих периодов пришлись на 2007 г., а в 2008 г. произошло некоторое понижение ПТВ, которое, тем не менее, сохраняется значительно выше средней за рассматриваемый период наблюдений.

Площадь, занятая морским льдом в Арктике и Сибирских арктических морях в конце летнего периода, быстро сокращается в последнее десятилетие. Абсолютный ее минимум был достигнут в 2007 г., а в 2008 г. произошло незначительное увеличение.

Экспедиционные исследования по программе МПГ внесли большой вклад в мониторинг морской среды Арктики. Впервые получены оценки характеристик водных масс на акватории Арктического бассейна, сопоставимые с оценками советских экспедиций 1970-х гг. Полученные данные показали, что повышенная температура в слое атлантической воды сохраняется, а толщина верхнего опресненного слоя уменьшилась над областью потока АВ и увеличилась в Канадской части Арктического бассейна. Оценки максимальной температуры АВ по пути ее распространения в Арктическом бассейне по данным наблюдений с 1930-х гг. и по 2008 г. указывают на сохранение повышенных значений температуры и в 2008 г. в продолжение потепления, начавшегося в 1990-е гг.

*Работа проводилась в рамках проектов ЦНТПЗ.2.1 и 5.3.2 при поддержке грантов РФФИ 06-05-64054-а, 07-05-00393-а, 07-05-13558 офи-ц, 07-05-13578 офи-ц.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е.И., Дементьев А.А. База приземных метеорологических данных полярных районов и ее использование // Формирование базы данных по морским льдам и гидрометеорологии. СПб.: Гидрометеоздат, 1995. С. 67–75.
2. Алексеев Г. В. Натурные исследования крупномасштабной изменчивости в океане / Под ред. Ю.В.Николаева. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 111 с.
3. Алексеев Г.В., Фролов И.Е., Соколов В.Т. Наблюдения в Арктике не подтверждают ослабление термохалинной циркуляции в Северной Атлантике // ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 277–280.
4. Атлас Арктики / Под ред. А.Ф.Трешникова, Е.С.Короткевич и др. М.: Главное Управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1985. 204 с.
5. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан / Под ред. С.Г.Горшкова. М.: Издательство Военно-морского флота СССР, 1980. 182 с.
6. Константинов Ю.Б., Грачев К.И. Высокоширотные воздушные экспедиции «Север» (1937, 1941–1993 гг.) / Под ред. В.Т.Соколова. СПб.: Гидрометеоздат, 2000. 176 с.

7. Arctic Climatology Project. Environmental Working Group joint U.S.-Russian atlas of the Arctic Ocean winter period / Edited by L. Timokhov and F. Tanis. Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan in association with the National Snow and Ice Data Center, 1998. CD-ROM.
8. Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Sato M. GISS analysis of surface temperature change // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 30997–31022.
9. Jones P.D., Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001 // J. Climate. 2003. 16. P. 206–223.
10. Kuzmina S., Johannessen O.M., Bengtsson L., Aniskima O., Bobylev L. High northern latitude surface air temperature: comparison of existing data and creation of a new gridded data set 1900–2000 // Tellus. 2008. 60A. P. 289–304.
11. NSIDC. Arctic Sea Ice Shatters All Previous Record Lows // Press release. 1 October 2007. <http://nsidc.org>.
12. Serreze M. C., Maslanik J. A., Scambos T. A., Fetterer F., Stroeve J., Knowles K., Fowler C., Drobot S., Barry R. G., Haran T. M. A record minimum arctic sea ice extent and area in 2002 // Geophys. Res. Lett. 2003. № 30. P. 1110. doi:1029/2002GL016406.
13. Stroeve J. C., Serreze M. C., Fetterer F., Arbetter T., Meier W., Maslanik J., Knowles K. Tracking the Arctic's shrinking ice cover: Another extreme September minimum in 2004 // Geophys. Res. Lett. 2005. № 32. L04501. doi:10.1029/2004GL021810.

*G.V.ALEKSEEV, A.V.PNUYSHKOV, N.E.IVANOV, I.M.ASHIK, V.T.SOKOLOV,  
P.N.GOLOVIN, P.V.BOGORODSKY*

## **ASSESSMENT OF THE CLIMATIC CHANGES IN THE MARINE ARCTIC WITH IPY 2007/08 DATA**

*It is presented the assessment of the interannual and decadal changes of the Arctic climate for XX onset of XXI centuries. Changes in the surface air temperature, in the Arctic Ocean and sea ice cover are considered. National and international data sets including ones from IPY 2007/08 were used.*

*Key words:* Climate change, Arctic, Arctic Ocean, IPY 2007/08.

## О ХАРАКТЕРЕ И ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ЗЕМЛИ

*д-р геогр. наук З.М.ГУДКОВИЧ, канд. геогр. наук В.П.КАРКЛИН,  
канд. геогр. наук В.М.СМОЛЯНИЦКИЙ, д-р геогр. наук И.Е.ФРОЛОВ*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru*

*Рассмотрены характерные особенности изменений климата Арктики и некоторых других регионов Земли с масштабами от десятилетий до столетий. Данные наблюдений позволили выявить полициклический характер климатических изменений, произошедших с конца XIX до начала XXI вв. В Арктике наибольшую амплитуду имели 60-летние циклы, с которыми связано чередование теплых и холодных эпох. Аналогичные циклы обнаружены и в других регионах планеты. Амплитуды этих колебаний, их вклад в общую изменчивость климата уменьшаются с широтой и различны в разных регионах. Такие колебания происходят на фоне более продолжительных изменений, которые обычно выражаются линейными трендами. Есть основание видеть в них проявление цикла продолжительностью около 200 лет. Его влияние создает межэпохальные различия в характере климатических изменений. Непосредственной их причиной является смещение пояса зонального переноса в атмосфере Северного полушария из высоких в умеренные широты. Это согласуется с климатическими вариациями состояния северного полярного вихря. Возможной их причиной являются изменения полной энергии, поступающей к Земле от Солнца, включая энергию солнечной активности. На основе выполненной учеными реконструкции изменений этой энергии, а также фактических и восстановленных данных о температуре воздуха в Арктике и в Северном полушарии показано, что климатические изменения рассмотренных масштабов вызываются естественными причинами.*

*Ключевые слова:* изменения климата, полициклический характер, полярные вихри, пояс зональных переносов в атмосфере, солнечная активность, поток общей энергии Солнца, естественные причины.

Климат, как статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой за достаточно длительные промежутки времени [18], не постоянен в пространстве и времени. Изменения климата в пространстве зависят от географической широты, распределения материков и океанов, а также связанными с этими факторами средними анемобарическими полями, системами морских течений, составляющими теплового баланса поверхности и проч. Изменения во времени характеризуются циклическими колебаниями разных масштабов. В отличие от гармонических колебаний, амплитуда и период таких квазиколебаний не остаются постоянными (в определенных пределах) от одного цикла к другому. В настоящее время циклические колебания масштабов от десятилетий до столетий (в голоцене) и десятков тысячелетий (в позднем плейстоцене) выявлены в ряде показателей климата Земли [7, 13, 14, 18, 19 и др.].

Результаты исследования [19, 20] показали, что изменения среднегодовой поверхностной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике и ледовитости арктических морей в XX в. характеризовались наличием циклических колебаний (средняя продолжительность циклов около 60, 20, 10 и менее лет), которые происходили на фоне квазилинейного тренда потепления. Вклад наиболее энергоемкого 60-летнего цикла в изменения климатической системы заметнее всего проявился в Арк-

тике, однако его присутствие обнаружено и в других регионах, включая Антарктику. С ним связана отмеченная многими учеными происходившая в XX в. смена эпох потепления и похолодания.

Наличие указанных циклов во внутривековых изменениях площади ледяного покрова и других характеристиках климатической системы Земли подтверждено исследованиями многих российских [2, 3] и зарубежных [26, 27, 29 и др.] ученых.

В работах Г.В.Алексеева и его сотрудников выявлены различия в проявлении эпох потепления и похолодания, отмеченных на протяжении XX в., а также их связь с атмосферной циркуляцией. Работы [27, 29] посвящены исследованиям изменений режима Северного Ледовитого океана в связи с арктическим колебанием (АК), включающим циклы продолжительностью 10–20 лет. В статье [26] приведены результаты исследований климатических изменений температуры воздуха и воды в разных регионах Тихого океана, Северной Америки и области Индийского океана, примыкающей с юга к азиатскому материку. Автор приходит к выводу, что во всех упомянутых регионах характерной особенностью климатических изменений является присутствие циклических колебаний продолжительностью 50–70 лет. Характерно, что фазы колебаний в большинстве регионов практически совпадают с аналогичными циклами, выявленными в Арктике. К теплым эпохам в этих регионах отнесены периоды 1870–1889, 1925–1947 и 1977–1990 гг., к холодным – 1890–1924, 1948–1976 гг. Лишь в западной части Тихого океана (Япония) фаза колебаний противоположна, что обусловлено влиянием тыловой части Алеутской барической депрессии, атмосферное давление в которой изменяется согласованно с чередованием теплых и холодных эпох. Депрессия углубляется в теплые эпохи и частично заполняется – в холодные. Как будет показано ниже, сходные особенности имеют изменения климата в северной части Атлантического океана.

Судя по результатам анализа изотопного состава атмосферных осадков в ледяном керне за последние 200 лет на станции Восток в Антарктиде [23], колебания климата со средним периодом 50–60 лет хорошо выражены и в высоких широтах Южного полушария. Однако такие колебания в Антарктике и Арктике существенно различаются. Согласно данным, приведенным в отчете МГЭИК [14], в течение 1946–1975 гг. здесь отмечалось потепление, а в 1976–2000 гг., наоборот, похолодание. Следовательно, в Антарктике, как и в Арктике, в изменениях климата обнаруживается «полувековой» цикл, однако его фазы противоположны: потепление в Северном полушарии практически совпало с похолоданием в Южном и наоборот. Эту закономерность подтверждают изменения температуры воздуха и ледовитости антарктических вод за последние 20–30 лет [9].

В книге [18], помимо анализа крупномасштабных климатических циклов, с которыми связано чередование ледниковых и межледниковых эпох в истории Земли, большое внимание уделено изучению 60-летнего и 180-летнего циклов. Последний цикл, выявленный также в работах [6, 37], может отвечать за присутствие внутривековых трендов в изменениях климата.

В упомянутой работе [19] показано, что интенсивность потепления западного региона Арктики (моря Гренландское, Баренцево и Карское), описываемая параметрами линейного тренда, существенно уменьшилась от начала к концу XX в. К такому же выводу ранее пришел Т.Винье [35], который установил, что скорость понижения ледовитости приатлантических морей в апреле уменьшилась с  $8 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год в 1880 г. до  $3 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>/год в 1980 г. В восточном регионе (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) тренд ледовитости был гораздо меньше, а структура циклических колебаний их ледовитости заметно отличалась: если в морях западного региона доля 60-летних и 20-летних циклов в общей дисперсии ледовитости составляла свыше 30 %, то в морях восточного региона – только 12 %. Основной вклад в дисперсию его ледовитости вносят циклы средней продолжительностью от 10 лет и ниже [19].

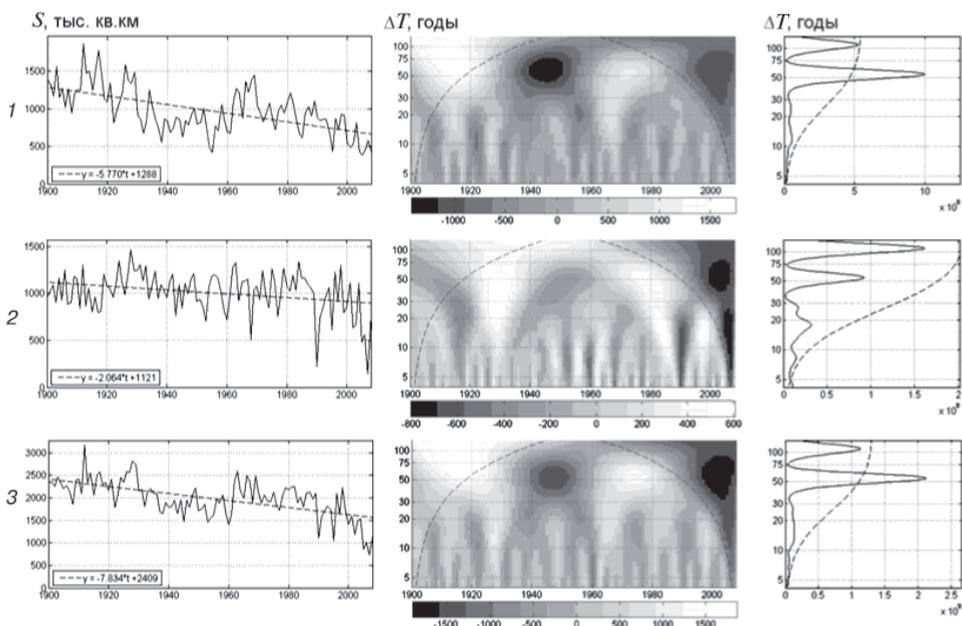


Рис. 1. Изменчивость ледовитости (слева), вейвлет-спектр (в центре) и суммарная спектральная плотность ледовитости (справа) для западных (Гренландское, Баренцево, Карское) — 1, восточных (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) — 2 и в целом для морей Евразийской Арктики (Гренландское–Чукотское) — 3 за период 1900–2008 гг.; на вставках приведены соответствующие уравнения линейного тренда; штриховыми линиями показаны линейные тренды и области 95 % значимости

Это иллюстрирует и рис. 1, на котором приведены графики изменений ледовитости, их суммарная спектральная плотность и соответствующие вейвлет-спектры ледовитости упомянутых регионов, а также суммарной площади морского ледяного покрова морей Евразийской Арктики. Как видно, в западном регионе и в целом для всех морей четко выделяется значимый полувековой цикл, тогда как для восточного региона «пики» энергии колебаний с периодами более 5 лет не достигают уровня 95 % значимости. Следует отметить, что 100-летние циклы, выделяющиеся на всех графиках спектральной плотности, являются артефактами, вызванными краевыми искажениями из-за конечности преобразуемого ряда [18].

На рис. 2 показаны, согласно [28], изменения среднегодовой ПТВ в течение XX– начала XXI вв. в зоне 62–85° с.ш. и средней глобальной ПТВ [31]. Заметим, что коэффициент корреляции связи ПТВ в указанной зоне и в регионе Арктики (севернее 70° с.ш.) составляет 0,86. Обращает на себя внимание тот факт, что размах межгодовых изменений глобальной ПТВ был в 4 раза (для сглаженных величин — в 2,5 раза) меньше, чем в Арктике. Другое различие заключается в том, что многолетние изменения ПТВ в Арктике фиксируют примерно равновеликие значения потеплений во время первой (1930–1955 гг.) и второй (1985–2000 гг.) теплых эпох. Однако в изменениях глобальной ПТВ второй период оказывается намного теплее первого.

Чтобы выяснить причину отмеченных различий, в работе [21] было проанализировано распределение разностей ПТВ на полушарии между упомянутыми эпохами за зимнее и летнее полугодия. Как оказалось, от первой эпохи ко второй значительно (до 3 °C и более) *повысилась* ПТВ зимой в регионах, где обычно в это время располагаются антициклоны Гренландский, Сибирский, Канадский и Ар-



Рис. 2. Изменения средних годовых аномалий температуры воздуха в зоне севернее 62° с.ш и в Северном полушарии (показаны также соответствующие аппроксимации полиномом 6-й степени)

ктический. При этом ПТВ существенно *понижилась* в Северной Атлантике и на значительной части Северного Ледовитого океана, включая области, прилежащие к морю Баффина, и арктические моря евразийского шельфа от Баренцева до Восточно-Сибирского моря. *Понижение* ПТВ сопровождалось *увеличением* ледовитости Баренцева моря зимой, которое составило (в среднем за октябрь–февраль) около 130 тыс. км<sup>2</sup> за 50 лет.

Непосредственная причина таких изменений состояла в усилении зональных потоков в атмосфере, переносящих тепло и влагу с океанов на материки, и смещении этих потоков из высоких в умеренные широты [1, 4, 16, 36]. Немаловажное значение при этом имело увеличение облачности, зависящей от типа барических систем. Зимой это воздействие особенно велико в областях, где обычно располагаются антициклоны. Ослабление антициклонов приводит к увеличению облачности и повышению ПТВ. В регионах, где термические условия находились под влиянием тыла барических депрессий (море Баффина, Северная Атлантика, Баренцево море), ПТВ понижилась.

С другой стороны, поскольку площадь Арктики намного меньше площади пояса умеренных широт, где в течение второй эпохи отмечалось потепление, вклад последнего в глобальную ПТВ был более значительным. Этим, на наш взгляд, в основном объясняется упомянутое выше отличие в ходе температуры воздуха в Арктике от изменений глобальной температуры.

Зависимость величины и характера изменений климата от широты представляет большой научный и практический интерес. Несмотря на выявленные отличия в ходе ПТВ полярных регионов, полушарий и Земли в целом, между ними существует определенная сопряженность. Как показано в работе [19], значения коэффициентов корреляции между среднегодовыми величинами ПТВ в Арктике и в

Таблица 1

Характеристики изменений среднегодовой температуры воздуха в трех зонах Северного полушария Земли в XX в.

Область	СКО	Коэфф. тренда (°/год)	Средняя амплитуда 60-летнего цикла	Вклад тренда в дисперсию	Вклад 60-летнего цикла в дисперсию
70–85° с.ш.	0,78°	0,0097	0,65°	13 %	39 %
40–65° с.ш.	0,34°	0,0048	0,25°	17 %	27 %
20–35° с.ш.	0,26°	0,0064	0,15°	59 %	17 %

Северном полушарии достаточно высоки: 0,59 (1900–2003 гг.) и 0,70 (1971–2003 гг.). В табл. 1 сопоставлены характеристики линейных трендов и 60-летних циклов в трех широтных поясах Северного полушария в XX в. Из этой таблицы следует, что изменчивость ПТВ и двух основных климатических ее компонент в арктической области заметно выше, чем в зонах умеренных и низких широт. При этом вклад линейного тренда в дисперсию среднегодовой температуры, осредненной по соответствующей области, возрастает с уменьшением широты, а вклад 60-летнего цикла, наоборот, сокращается. Следовательно, 60-летний цикл климатических колебаний – явление преимущественно *высокоширотное*.

Отмеченные изменения циркуляции атмосферы соответствуют климатическим вариациям состояния северного полярного вихря [9]. Этот вихрь углубляется в теплые эпохи и частично заполняется в холодные. В масштабе 200-летнего цикла, помимо углубления (заполнения) этого вихря, происходит его расширение (сокращение). Углубление и расширение полярного вихря сопровождается понижением поверхностного атмосферного давления в Арктике и в соседних с ней регионах, ослаблением Арктического антициклона и усилением зонального потока в атмосфере умеренных широт. Это находит отражение в ходе известных индексов – Североатлантического колебания – САК, Арктического колебания, Высокоширотной зональности. Им соответствуют изменения индекса зональности (средняя разность атмосферного давления между параллелями 40 и 65° с.ш.), рассмотренные в работе [19].

Возможными причинами изменений состояния циркуляционных вихрей могут служить как внешние, так и внутренние факторы. Из внутренних факторов большинство климатологов до последнего времени основное значение придавали эффекту накопления в атмосфере Земли парниковых газов (главным образом CO<sub>2</sub>) антропогенного происхождения. Мы не будем останавливаться на критических высказываниях видных отечественных и зарубежных климатологов относительно «парниковой теории». Их краткий обзор дан в книге [19]. Заметим, что за последние годы количество ученых, отвергающих решающее значение «парниковой теории» в климатических изменениях, заметно увеличилось [31 и др.].

В качестве альтернативы «парниковой теории» в понимании основных причин климатических изменений XX–начала XXI вв. наибольшее внимание привлекает воздействие на атмосферу Земли изменений общей лучистой энергии Солнца (Total Solar Irradiance – TSI). Это понятие включает электромагнитные волны разной длины, солнечную активность (СА), формирующую корпускулярные потоки (солнечный ветер), и космические лучи, регулируемые межпланетными магнитными полями. Обзоры исследований по этой проблеме имеются в книге [19] и статье [17]. Косвенно воздействие СА на климат выражается в совпадении средней продолжительности циклов, выявленных в ходе температуры воздуха, ледовитости и СА: цикл Швабе (11 лет), Хейла (22 года) и Фритца (около 60 лет), а также «200-летний» цикл [6, 30].

На рис. 3 изменения годовых аномалий ПТВ в зоне севернее 62° с.ш. сопоставлены с величинами TSI, полученными в результате композиции наблюдений за солнечными пятнами и общей радиацией Солнца [22], а также содержанием CO<sub>2</sub> в атмосфере (1875–2000 гг.) [33]. Графики хода температуры и TSI довольно согласованно подтверждают как наличие векового положительного тренда, так и присутствие квазистецидесятилетних циклических колебаний на его фоне, чего нельзя сказать о ходе содержания CO<sub>2</sub>. Из рисунка следует, что размах изменений полной энергии Солнца достигает 4,0 ватт/м<sup>2</sup>, (0,3 % от величины солнечной постоянной). Корреляционный анализ связей аномалий ПТВ в Арктике ( $\Delta T_a$ ), сглаженных по 11-летиям с величинами TSI и CO<sub>2</sub>, позволил получить уравнение регрессии:

$\Delta T_a = 0,431(TSI) - 0,0038(CO_2) - 589,5$  (общий коэффициент корреляции  $R = 0,87$ ), а по нему рассчитать долю соответствующих дисперсий в общей изменчивости  $T_a$ : 83,5 % и 2,4 % соответственно. Следовательно, не углекислый газ, а приходящая к

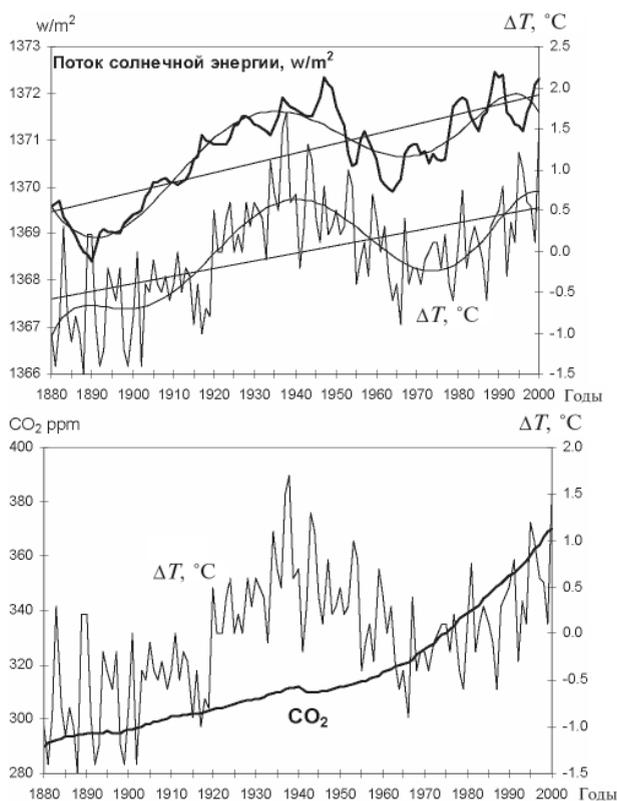


Рис. 3. Сопоставление (вверху) изменений потоков солнечной энергии (TSI) и средних годовых аномалий температуры воздуха ( $\Delta T_g$ ) в зоне севернее  $62^\circ$  с.ш. (показаны соответствующие линейные тренды и аппроксимации полиномом 6-й степени); изменения содержания в атмосфере углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и температуры воздуха (внизу) [33]

Земле солнечная энергия, включающая энергию солнечной активности, должна рассматриваться как основная причина климатических изменений в Арктике.

Использование изотопных анализов радионуклидов космического происхождения ( $^{14}\text{C}$  и  $^{10}\text{Be}$ ) в кернах льда из ледников Антарктиды и Гренландии позволило реконструировать числа Вольфа с достаточно высокой точностью вплоть до середины IX в. н. э. [32, 34]. Графики разных вариантов такой реконструкции, различаясь количественно, показывают аналогичное изменение во времени реконструированных величин. Они удивительно напоминают реконструкции температурных аномалий земного климата, получивших название «хоккейной клюшки» [24].

На рис. 4 приведены графики осредненных (по разным реконструкциям) величин аномалий среднегодовой ПТВ Северного полушария и чисел Вольфа за последние 1100–1200 лет, а также их многолетние изменения, аппроксимированные многочленом третьей степени. Коэффициент корреляции связи между последними находится в пределах от 0,84 до 0,95 (при сдвигах «температура после СА» на 0–60 лет). Оба рисунка не только указывают на исключительно интенсивный рост ПТВ и СА в XX в., подобного которому не обнаружено за два предшествующих тысячелетия, но и на характерные особенности изменений климата в историческое время — от теплой «эпохи викингов» в X–XII вв. до «малой ледниковой эпохи» XV–XIX вв.

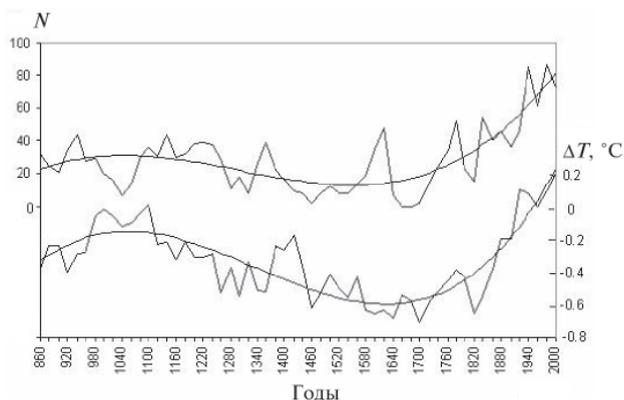


Рис. 4. Осредненные (по разным реконструкциям [24, 32, 34]) величины аномалий средней температуры воздуха Северного полушария (внизу) и чисел Вольфа ( $N$ ) за последние 1100–1200 лет (вверху); сглаженные линии – линии, соответствующие аппроксимации многочленом 3-й степени

Заметим, что в статье [8] для объяснения линейного тренда изменений климата Арктики в XX в. приведен соответствующий положительный линейный тренд СА (чисел Вольфа), возможно связанный с наличием 200-летнего цикла. Предполагается, что причина этого «тройственного» периода связана с особенностями движения Солнца вокруг центра масс [18]. Что касается 60-летнего цикла, то его существование, по всей вероятности, обусловлено влиянием «диссимметрии солнечной системы». Это понятие обозначает смещение центра Солнца относительно центра масс солнечной системы под влиянием планет (главным образом, Юпитера и Сатурна) [5, 10, 12, 16]. Ее воздействие на земную атмосферу может осуществляться как через СА, так и вследствие изменений расстояния между Землей и Солнцем, связанных с явлением «диссимметрии» [8]. Обнаружение 60-летнего цикла в изменениях общей энергии Солнца может свидетельствовать в пользу этой теории, которая к тому же дает основание для объяснения обнаруженного увеличения роли 60-летних циклов с широтой и оппозиции их влияния на климатические изменения в Арктике и Антарктике (из-за противоположных знаков соответствующих аномалий в моменты перигелия и афелия).

В заключение приведем краткие выводы настоящего исследования.

Климат Земли изменяется во времени и пространстве. Изменения во времени носят полициклический характер и имеют определенные региональные особенности. Наиболее энергоемкими в масштабе десятилетий являются циклы средней продолжительностью около 60 и около 200 лет. Их относительная роль изменяется в пространстве в зависимости от широты и особенностей общей циркуляции атмосферы (ОЦА), связанных с распределением океанов и морей и поступающей солнечной энергией. Особенности ОЦА проявляются в эволюции состояния полярных вихрей (в их глубине и горизонтальных размерах). Основными причинами климатических изменений являются естественные внешние факторы – колебания общего количества энергии Солнца, вследствие изменений расстояния до него от Земли, а также солнечной активности. Повышение концентрации в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения в изменениях климата Земли играет второстепенную роль.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.В. Современные изменения климата в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. Вып. 72. С. 42–71.

2. *Алексеев Г.В.* Исследование изменений климата Арктики в XX столетии // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–21.
3. *Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Анискина О.Г., Харланенкова Н.Е.* Естественные и антропогенные составляющие изменений приповерхностной температуры воздуха в Арктике в XX веке по данным наблюдений и моделирования // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 22–30.
4. *Алексеев Г.В.* Формирование и динамика современного климата. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 266 с.
5. *Байдал М.Х.* О временной сопряженности некоторых климатических характеристик с внешними факторами // Тр. ВНИИГМИ МЦД. 1987. Вып. 141. С. 23–28.
6. *Башкирцев В.С., Машнич Г.П.* Переменность Солнца и климат Земли // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 6. С. 135–137.
7. *Гриббин Дж., Лэм Г.Г.* Изменение климата за исторический период // Изменения климата. Л.: Гидрометеоздат, 1980. С. 102–121.
8. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е.* Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, Евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–14.
9. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е.* Изменения морского ледяного покрова и других составляющих климатической системы в Арктике и Антарктике в связи с эволюцией полярных вихрей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 78. С. 48–57.
10. *Дмитриев А.А.* Изменчивость атмосферных процессов Арктики и ее учет в долгосрочных прогнозах. Л.: Гидрометеоздат, 1994. 207 с.
11. *Екайкин А.А., Липенков В.Я., Пети Ж.Р., Массон-Дельмотт В.* Пятидесятилетний цикл в изменениях аккумуляции и изотопного состава снега на станции Восток // Мат-лы гляциол. исследований. 2003. Вып. 94. С. 163–173.
12. *Завалишин Н.Н., Виноградова Г.М.* О связи аномалий месячных температур воздуха с циклом Хейла и динамикой расстояния Солнце-Земля // Тр. СибНИГМИ. 1990. Вып. 93. С. 25–32.
13. *Захаров В.Ф.* Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 213 с.
14. *Карклин В.П., Юлин А.В., Карелин И.Д., Иванов В.В.* Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа // Труды ААНИИ. 2001. Т. 443. С. 5–11.
15. *Клименко В.В.* Климатическая сенсация. Что нас ожидает в ближайшем и отдаленном будущем? (Лекция проекта «Публичные лекции «Полит.ру».) URL: [www.polit.ru/lectures/2007/02/15/klimenko.html](http://www.polit.ru/lectures/2007/02/15/klimenko.html) (дата обращения 15.02.2009)
16. *Коваленко В.Д., Кизим Л.Д., Пашестюк А.М.* Анализ вариаций погоды и климата: Сб. научн. тр. СО ВАСХНИЛ. Новосибирск, 1987. 103 с.
17. *Лукьянова Р.Ю.* Современные исследования по проблеме влияния солнечной активности на изменчивость климата // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 210–226.
18. *Монин А.С., Сонечкин Д.М.* Колебания климата по данным наблюдений. М.: Наука. 2005. 192 с.
19. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
20. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
21. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* 60-летняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // Материалы гляциологических исследований, 2009 (в печати).
22. *Hoyle D.V., Schatten K.H.* A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700–1992 // J. Geophys. Res. 98. 1993. P. 18895–18906.
23. IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T.Houghton, Y.Ding, D.J.Griggs, M.Noguer, P.J. van der Linden, X.Dai, K.Maskell, C.A.Johnson, eds. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press, 881 p.
24. *Mann M.E., Zhang Z, Hughes M.K., Bradley R.S., Miller S.K., Rutherford S, Ni F.* Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two

- millennia // The National Academy of Sciences of the USA. Sept. 9, 2008. Vol. 105. № 36. P. 13252–13257.
25. *McIntyre S., McKittrick R.* Corrections to the Mann et al. Proxy Data Base and Northern Hemispheric Average Temperature Series // *Energy and Environment*. 2003. Vol. 14, № 6. P. 751–771.
26. *Minobe S.A.* 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America // *Geophys. Res. Lett.*, 1997. № 24. P. 683–686.
27. *Polyakov I.V., Johnson M.A.* Arctic decadal and interdecadal variability // *Geophys. Res. Lett.* 2000. № 24. P. 4097–4100.
28. *Polyakov I.V. et al.* Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 18752000 // *J. of Climate*. 2003. Vol. 16. P. 2067–2077.
29. *Proshutinsky A.Y., Johnson M.A.* Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1997. № 102. P. 12,493–12,514.
30. *Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolstrom T.* Hale Cyclicity of Solar Activity and its relation to climate variability // *Solar Physics*. 2004. Vol. 224. P. 455–463.
31. *Singer S.F. et al.* Nature, Not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policymakers of the Report of Nongovernmental International Panel on Climate Change, Chicago, IL; The Heartland Institute. 2008. 40 p.
32. *Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schussler M., Beer J.* Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years // *Nature*. 28 Oct. 2004. Vol. 431. P. 1084–1087.
33. *Soon W.W.-H.* Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations in the Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L16712–L16712–5. doi:10.1029/2005GL023429
34. *Usoskin I.G., Solanki S.K., Schussler M., Mursula K., Alanko K.* Millennium-Scale Sunspot Number Reconstruction: Evidence for an Unusually Active Sun since the 1940s // *Physical Review Letters*, 21 Nov. 2003. Vol. 91. № 21. P. 211101–1211101–4.
35. *Vinje T.* Anomalies and trends of sea ice extends and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998 // *Journal of Climate*. December 2000. 21 p.
36. *Westbrook G.* After Kyoto, Science still probes global warming causes // *Oil and Gas J.* 1998. Vol. 96. № 3. P. 40–42.
37. *Wallace J.M., Zhang Y., Renwick J.A.* Dynamic contribution to hemispheric mean temperature trends // *Science*. 1995. Vol. 270. P.780–783.

Z.M.GUDKOVICH, V.P.KARKLIN,  
V.M.SMOLYANITSKY, I.E.FROLOV

## ON THE CHARACTER AND CAUSES OF THE EARTH'S CLIMATE CHANGES

*Typical peculiarities of climate changes of the Arctic and some other Earth's regions with scales ranging from decades to centuries are considered. Data of observations allowed revealing a polycyclic character of climatic changes that have occurred from the end of the 19<sup>th</sup> to the beginning of the 21<sup>st</sup> centuries. The 60-year cycles to which alternation of warm and cold epochs is related, had the largest amplitude in the Arctic. Similar cycles were also revealed in the other regions of the planet. The amplitudes of such oscillations and their contribution to the total climate variability decrease with latitude and are different in different regions. Such oscillations occur at the background of longer changes, which are usually expressed by linear trends. There is ground to believe that they manifest a cycle with duration of about 200 years. Its influence creates inter-epochal differences in the character of climatic changes. Their direct cause is displacement of the zonal transport belt in the atmosphere of the northern hemisphere from high to temperate latitudes. This is in agreement with climatic variations of the state of the northern polar vortex. Their possible cause is changes of full energy coming to the Earth from the Sun including solar activity energy. On the basis of reconstructed changes of this energy made by scientists and the actual and reconstructed data on the air temperature in the Arctic and in the northern hemisphere, it is shown that the climatic changes at the scales under consideration are created by natural causes.*

**Keywords:** Climate changes, polycyclic character, polar vortex, zonal transport belt in the atmosphere, Solar Activity, Total Solar Irradiance, natural causes

## МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА РАЙОНА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ТИКСИ

науч. сотр. Н.Е.ИВАНОВ<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук А.П.МАКШТАС<sup>1</sup>,  
канд. физ.-мат. наук С.В.ШУТИЛИН<sup>1</sup>, нач. отдела Р.М.ГУНН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@ari.nw.ru

<sup>2</sup> Тиксинский филиал Якутского УГМС, г. Тикси, e-mail: meteo\_gun@mail.ru

*Приведено описание созданного ААНИИ и Тиксинским филиалом Якутского УГМС электронного архива всех доступных данных стандартных метеорологических наблюдений на полярной станции Тикси с августа 1932 г. по декабрь 2007 г. Обоснован поддиапазонный подход к анализу изменчивости характеристик климата, приведены статистические оценки межгодовой изменчивости, годового хода, изменчивости синоптического масштаба и суточного хода. Высказано предположение о влиянии синоптических систем на многолетние тренды температуры воздуха. Выявлена согласованность трендов температуры воздуха и балла общей облачности в летний и зимний сезоны.*

*Ключевые слова:* гидрометеорологическая обсерватория Тикси, электронный архив, изменчивость климата, диапазоны изменчивости, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, облачность.

### ВВЕДЕНИЕ

В 2005 г. в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) были подготовлены предложения по организации проекта Международного полярного года (МПГ) «Создание атмосферной обсерватории климатического мониторинга в Тикси», которые впоследствии были интегрированы в Кластер МПГ № 196 «International Arctic Systems for Observing the Atmosphere» (Международная система наблюдений атмосферы в Арктике). В 2006 г. окончательное решение о создании в Тикси современной гидрометеорологической обсерватории (ГМО) было принято на первом официальном совещании делегаций Национальной океанической и атмосферной администрации (НОАА) Министерства торговли США и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Росгидромет), состоявшемся в Москве в рамках Меморандума по сотрудничеству в области метеорологии, гидрологии и океанографии.

Одной из основных задач создаваемой ГМО было определено проведение исследований, ориентированных на выявление причин и последствий изменений климата Арктики с особым вниманием к комплексным исследованиям, направленным на понимание взаимосвязанных составляющих арктической климатической системы, включая атмосферные и гидрологические процессы; изменения химического состава атмосферы, таяние вечной мерзлоты, береговую эрозию, радиационный баланс, воздействие облачности и аэрозольной составляющей атмосферы на радиационные процессы, а также процессы газо- и массообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой.

Выбор гидрометеорологической станции (ГМС) «Полярка», расположенной в 7 км от поселка Тикси, в качестве основы будущей ГМО был обусловлен следующими обстоятельствами. Наблюдения на станции проводятся непрерывно с 1932 г., что позволяет исследовать многолетнюю изменчивость климата одного из ключевых регионов Арктики. ГМС расположена в зоне влияния на атмосферные процессы как Атлантического, так и Тихого океанов, в районе значительных климатических изменений. ГМС расположена вблизи устья реки Лены, занимающей второе место (после Енисея) по объему пресных вод, сбрасываемых в Северный Ледовитый океан. Кроме того, организация ГМО в Тикси, на одном из стратегических участков Северного морского пути, позволит существенно улучшить качество прогнозов ледовой обстановки для навигации, в значительной степени утраченное в последние годы.

ГМС «Полярка» была открыта 12 августа 1932 г. С 1936 г. на станции выполнялись четырехразовые (с 1932 по 1935 гг. — трехразовые), а с 1970 г. — восьмиразовые измерения атмосферного давления; температуры и влажности воздуха; интенсивности выпадения осадков; высоты снежного покрова; продолжительности солнечного сияния; направления и скорости ветра; температуры поверхности почвы; визуальные определения дальности видимости, количества и форм облачности. Стандартные метеорологические наблюдения на ГМС продолжаются до настоящего времени с помощью практически идентичного комплекса датчиков. Такие наблюдения являются обязательным элементом программы всех полярных станций. Их необходимость как для прогностических, так и для исследовательских задач обусловлена тем, что вплоть до настоящего времени они являются уникальным источником наиболее достоверной информации о состоянии приповерхностного слоя атмосферы в наименее освещенном метеорологическими данными регионе земного шара. Несмотря на развитие в последние десятилетия дистанционных методов получения метеорологической информации с помощью системы автоматических станций, качество такой информации, как и состав наблюдаемых параметров, далеко уступают информации, полученной путем стандартных метеорологических наблюдений, выполненных опытным наблюдателем. Это обусловлено как недостаточной репрезентативностью данных необслуживаемых станций вследствие, например, обледенения или радиационного нагрева датчиков, так и ограниченным набором параметров, измеряемых современными автоматическими станциями. Что касается измерений со спутников, то основная трудность состоит в интерпретации полученных с их помощью данных. Более того, данные стандартных наблюдений служат одним из основных источников для совершенствования алгоритмов обработки спутниковой информации.

Многолетние ряды стандартных метеорологических данных позволяют описывать межгодовую изменчивость, годовую ритмику, изменчивость синоптического масштаба и суточную ритмику. Такой поддиапазонный подход предполагает не только оценку характеристик изменчивости в каждом из диапазонов, но и учет междиапазонного взаимодействия. Ключевым звеном этого взаимодействия является годовая ритмика, которая, с одной стороны, модулирована в диапазоне межгодовой изменчивости, а с другой стороны, сама модулирует процессы синоптического масштаба и суточную ритмику. Таким образом, годовая ритмика не сводима к среднему многолетнему годовому ходу. Термином «годовая ритмика» мы будем обозначать всевозможные проявления процессов с годовой периодичностью во всех диапазонах изменчивости. В рамках поддиапазонного подхода на основе созданного электронного архива метеорологических данных получены оценки большого количества характеристик изменчивости климата. Поскольку полный их анализ в одной публикации не представляется возможным, в настоящей статье дано описание характеристик изменчивости, наиболее информативных для описания основных свойств многолетней изменчивости и наиболее актуальных для организации работы создаваемой ГМО.

## ДАННЫЕ

### Описание архива метеорологических данных

Основой созданного электронного архива данных срочных метеорологических наблюдений послужили имеющиеся в Фондах ААНИИ и в архиве Тиксинского филиала ЯУГМС рукописные таблицы ТМ-1 и ТГМ-1, а также, начиная с 1970-х гг., электронные таблицы ТМС. Всего архив содержит данные срочных наблюдений за более чем 27000 дней (864 месяца) с августа 1932 г. по 31 декабря 2007 г. Поскольку восьмиразовые измерения были начаты на станции в 1971 г., а до 1936 г. измерения были трехразовыми, в настоящей статье для анализа многолетней изменчивости были использованы ряды четырехразовых наблюдений за период 1936–2007 гг. Статистический анализ был выполнен для следующих метеорологических параметров: температура воздуха на высоте 2 м ( $T$ ), приземное атмосферное давление ( $P$ ), абсолютная влажность воздуха ( $A$ ), скорость ветра ( $\bar{V}$ ) и балл общей облачности ( $N$ ).

Полнота созданного архива может быть представлена следующими характеристиками. Количество месяцев с наличием данных менее чем за 25 дней составляет лишь 5 – для  $T$  и  $P$ , 4 – для  $N$ , 3 – для  $\bar{V}$ . Количество месяцев с отдельными пропусками также не велико. Это означает, что в статистическом анализе не использованы данные лишь за 0,5 % от числа месяцев, содержащихся в архиве, по такому жесткому критерию, как наличие информации за все 4 срока за 25 и более дней в каждом месяце. Количество пропусков больше только для  $A$  (22 месяца с данными менее чем за 25 дней) и для  $N$  (по отдельным пропускам без нарушения критерия 25 дней).

### Процедуры коррекции архива

Создание столь масштабного электронного архива данных, содержащего более 1,23 млн значений параметров, занесенных с бумажного носителя, часто низкого качества, с большим количеством исправлений, в принципе невозможно без ошибок. Для их коррекции данные были сгруппированы по метеорологическим элементам, по одноименным месяцам (календарным и многолетним) и срокам. К этим рядам была применена последовательность аналитических процедур и экспертных (в том числе визуально-графических) методов. Поскольку так идентифицируются как сомнительные только отскакивающие значения, дополнительно были проанализированы ряды первой производной, что позволило выявить сомнительные значения по критерию аномального изменения от срока к сроку.

### МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА

Распределение дисперсии по диапазонам представлено оценками дисперсии данных годового, сезонного, месячного, суточного и срочного разрешения и оценками спектральной плотности в стационарном приближении  $S(\omega)$ . Дисперсию в полосе частот  $(\omega_1, \omega_2)$  определяет спектральная функция:

$$F(\omega) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega. \quad (1)$$

В настоящей статье основное внимание уделено оценкам, полученным по данным, сгруппированным по месяцам на основе моделей случайной величины и стационарного случайного процесса. Распределение вероятностей  $f(x)$  представлено таблицами повторяемости и гистограммами, оценками моментов – среднего значения  $m$ , дисперсии  $D$ , среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma \equiv D^{0.5}$ , асимметрии  $A$ , эксцесса  $E$  и экстремумов  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ . Приведены также квантили распределения  $X_p$  порядка  $p$ , определенные как корень уравнения

$$F(X_p) = p, \quad (2)$$

где  $F(X)$  – функция распределения.

Наибольший интерес представляют 5 квантилей – минимум  $X_{\min}$ , нижняя квартиль  $X_{0,25}$ , медиана  $Me \equiv X_{0,5}$ , верхняя квартиль  $X_{0,75}$ , максимум  $X_{\max}$ , которые удобно представить графически в виде так называемого «ящика с усами» [8]. Верхняя и нижняя крышки «ящика» задают положение квартилей  $X_{0,25}$ ,  $X_{0,75}$  и определяют область 50 % значений вокруг центра распределения. Положение медианы (линия внутри «ящика») относительно крышек определяет асимметрию без учета аномальных значений. Верхний и нижний «усы» ( $X_{\min} - X_{0,25}$ ,  $X_{0,75} - X_{\max}$ ) определяют по 50 % наиболее сильных отрицательных и положительных аномалий  $X_{0,25}$ ,  $X_{0,75}$ . Квантили можно использовать в частности для оценивания моментов распределения без учета аномалий малой обеспеченности. Так, асимметрия определяется как

$$A_p = (X_{1-p} + X_p - 2X_{0,5}) / (X_{1-p} - X_p). \quad (3)$$

Совмещение на одном рисунке годового хода «ящиков» по срочным и среднемесячным данным позволяет наглядно представить основные особенности годового хода с учетом роли синоптических процессов.

Линейный тренд определен по регрессионной модели [4]

$$\zeta(t_i) = \bar{\zeta} + at_i + b + \varepsilon(t_i). \quad (4)$$

Для более подробного описания годового хода среднемесячных значений, процессов синоптического масштаба и суточного хода использованы модели периодически коррелированного случайного процесса (ПКСП) и модель случайного импульсного процесса. Модель ПКСП позволяет, в частности, представить многолетний ряд среднемесячных значений  $\zeta(t_j)$ ,  $i = 1936, 2007$  – год («медленное» время),  $j = 1, 12$  – месяц («быстрое» время) в виде:

$$\zeta(t_j) = \bar{\zeta} + \bar{\zeta}_j + m(t_j) + \varepsilon(t_j), \quad (5)$$

где  $\bar{\zeta}$  – норма,  $\bar{\zeta}_j$  – ряд среднегодовых значений значений,  $m(t_j)$  – среднее многолетний годовой ход среднемесячных значений,  $\varepsilon(t_j)$  – остаток. Компоненты  $\bar{\zeta}_j$  и  $\varepsilon(t_j)$  названы в [2] аддитивной (АС) и модуляционной (МС) составляющими межгодовой изменчивости. Модель (5) позволяет оценить вклады  $D_{AC}$ ,  $D_{m(t)}$  и  $D_{MC}$  в общую дисперсию.

Методы оценивания вероятностных характеристик изменчивости изложены в работах [5–7]. Таблицы, приведенные в работе [3], использованы для проверки статистических гипотез о значимости коэффициентов асимметрии, эксцесса, трендов и т.д.

Специфика анализа ветра обусловлена тем, что скорость ветра является векторной величиной. Для ее анализа использован векторно-алгебраический метод, базирующийся на модели евклидова вектора  $\vec{V}$  с модулем  $V$  и направлением  $\varphi$  [1]. Распределение  $\vec{V}$  по градациям  $\varphi$  и  $V$  представлено таблицами двумерной повторяемости и розами ветров, а квантили – диаграммами квантилей  $V$  по 8 румбам.

В наиболее компактной форме распределение вероятностей повторяемости скорости ветра можно представить моментами распределения. Математическое ожидание скорости ветра есть вектор  $\vec{m}_V$ , а СКО – тензор  $\sigma_V$ , инвариантами которого являются числа  $\lambda_{1,2}$ . Последние можно интерпретировать как длины полуосей эллипса рассеяния, развернутого на угол  $\alpha$  относительно направления на север. Линейный инвариант  $I_1 = \lambda_1 + \lambda_2$  характеризует общую изменчивость скорости независимо от того, изменяются ли  $V$  или  $\varphi$ . Как следствие, сопоставление  $I_1$  с дисперсией  $D_V$  модуля скорости  $V$  как скалярной величины можно использовать для оценки вклада вращения. Инвариант  $\chi = \lambda_2/\lambda_1$  характеризует вытянутость эллипса дисперсии. При  $\chi = 0$  происходят только реверсивные изменения скорости, а при  $\chi = 1$  интенсивность изменчивости по всем направлениям одинакова.

Тренд во временных рядах скорости ветра  $\bar{\mathbf{a}}$  определен как

$$\bar{\mathbf{V}}(t) = \bar{\mathbf{m}}_{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{a}}t + \bar{\mathbf{b}} + \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(t). \quad (6)$$

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Общая характеристика поддиапазонной изменчивости

В настоящем разделе выполнен анализ распределения дисперсии по диапазонам изменчивости. В табл. 1 приведены оценки дисперсии в зависимости от масштаба осреднения, при этом для скорости ветра использован линейный инвариант тензора дисперсии. Из таблицы следует, что наиболее сильное уменьшение величины дисперсии происходит при переходе от суточного осреднения к месячному (сезонному) и (или) от месячного (сезонного) к годовому. Резкое ослабление дисперсии среднегодовых значений температуры и влажности относительно среднемесячных и среднесезонных свидетельствует о преобладающей роли годового хода среднемесячных данных и сезонной изменчивости. Резкое ослабление дисперсии среднесуточных значений давления, ветра и облачности относительно среднемесячных свидетельствует о преобладающей роли процессов синоптического масштаба. Вклад суточного хода в дисперсию для всех элементов, за исключением облачности, относительно мал. Заметное уменьшение дисперсии среднесуточных значений скорости ветра по сравнению с дисперсией срочных данных является формальным следствием высокочастотной изменчивости направления ветра.

Таблица 1

Уменьшение дисперсии (%) при увеличении масштаба осреднения исходных данных

Элемент	Масштаб осреднения				
	Срочные	Сутки	Месяц	Сезон	Год
<i>T</i>	100	98	87	68	<b>0,7</b>
<i>P</i>	100	95	<b>35</b>	20	2,0
<b>V</b>	100	79	<b>19</b>	12	1,4
<i>A</i>	100	97	80	67	<b>0,6</b>
<i>N</i>	100	64	<b>14</b>	9	1,3

Примечание. Жирным шрифтом выделен масштаб с максимальным ослаблением дисперсии

Графики оценок спектральной плотности в стационарном приближении на рис. 1 подтверждают этот вывод. В спектрах доминирует годовой ход – квазилинейчатые пики на частоте годового колебания и его обертонов, а также внутрисезонные и синоптические колебания – широкополосный спектр с квазимонотонным уменьшением  $S(\omega)$  по частоте. У всех метеорологических элементов, кроме температуры воздуха, заметен красный шум и особенности в низкочастотной области. Несмотря на небольшой вклад суточного хода в общую дисперсию, квазилинейчатый пик на соответствующей частоте присутствует во всех спектрах, кроме спектра давления.

Оценки спектральной функции (табл. 2) придают графикам  $S(\omega)$  количественную определенность. В таблице приведены распределения дисперсии по диапазонам межгодовой изменчивости, годового хода и внутригодовой изменчивости с выделением 11 поддиапазонов. Из табл. 2 следует, что 90 % и более дисперсии объясняют годовые и высокочастотные колебания. Распределение дисперсии между ними не одинаково – в спектре *T* и *A* явно преобладает годовой ход, а в спектрах *P*, **V**, *N* преобладают высокочастотные нерегулярные колебания. В годовом ходе *A* и *N* заметна роль  $1/2$ -годового и  $1/3$ -годового обертонов, а в диапазоне высокочастотных колебаний доминируют процессы внутримесячного и синоптического масштабов.

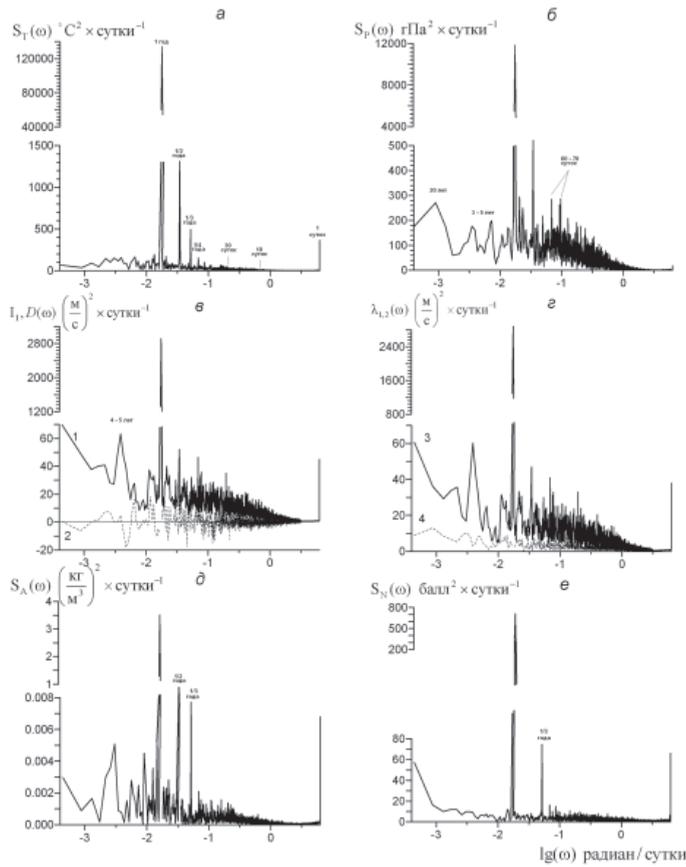


Рис. 1. Оценки спектральной плотности температуры воздуха (а), атмосферного давления (б), скорости ветра (в, г), абсолютной влажности (д), общей облачности (е).

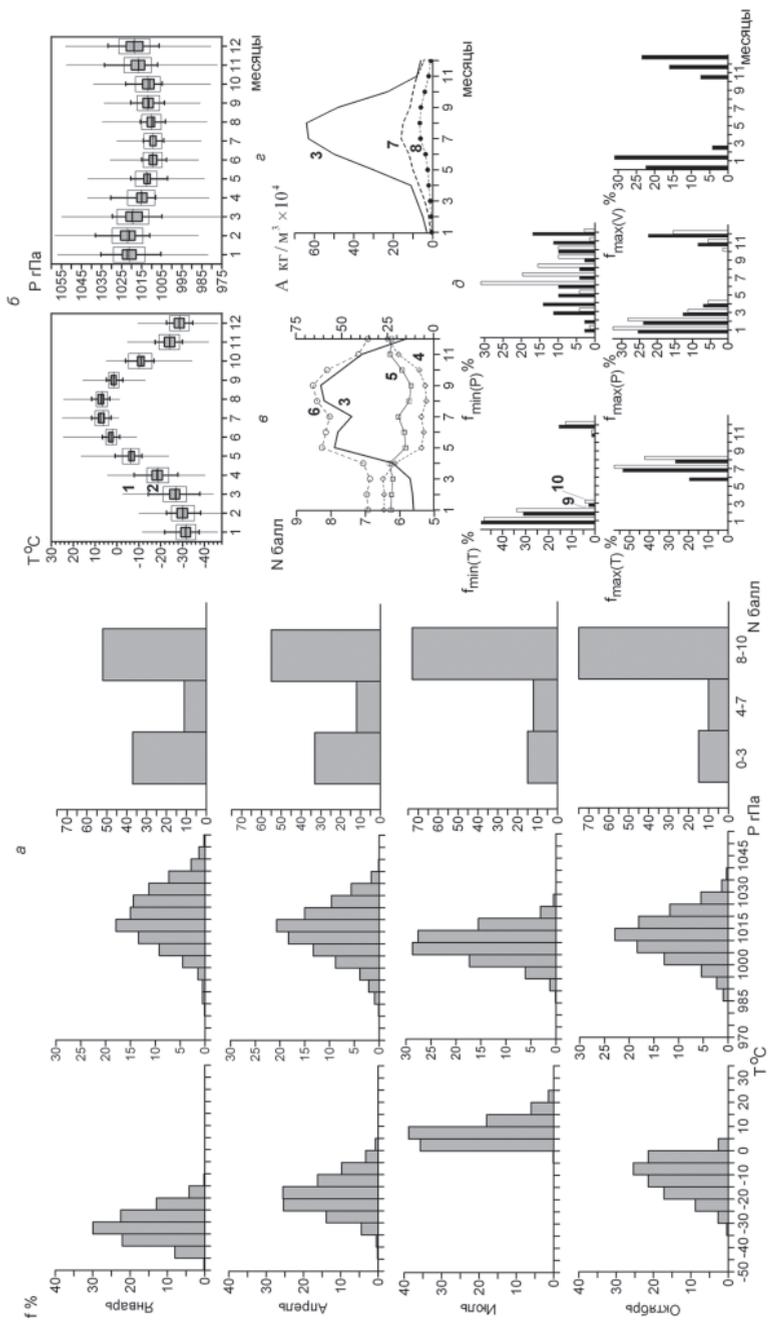
Цифры на графиках – периоды колебаний. Инварианты спектрального тензора: 1 – линейный  $I_1(\omega)$ , 2 – индикатор вращения  $D(\omega)$ , 3, 4 – большая и малая оси эллипса рассеяния  $\lambda_{1,2}(\omega)$

Таблица 2

Распределение дисперсии по частотным диапазонам (%)

Элемент	Частотные диапазоны, период										Суточный ход
	Межгодовой		Головой ход				Внутригодовой				
	> 10	2–10	1 год	1/2 года	1/3 года	1/4 года	90–360 суток	30–90 суток	10–30 суток	2–10 суток	
$T$	0,7		<b>83</b>				16				< 0,1
	0,1	0,6	<b>81</b>	1,4	0,4	0,2	3	3	6	4	
$P$	2,0		22				<b>76</b>				< 0,1
	0,5	1,5	18	1,4	0,5	1,1	10	20	<b>28</b>	18	
$\vec{V}$	2,2		15				<b>82</b>				0,1
	0,8	1,4	13	0,5	0,5	1,0	3	10	20	<b>49</b>	
$A$	0,5		<b>84</b>				16				0,3
	0,1	0,4	<b>76</b>	7	0,7	0,3	2	2	4	8	
$N$	4		12				<b>84</b>				0,1
	1,7	2,3	10	0,3	1,1	0,6	6	10	22	<b>46</b>	

Примечание. Жирным шрифтом выделен диапазон с максимумом дисперсии



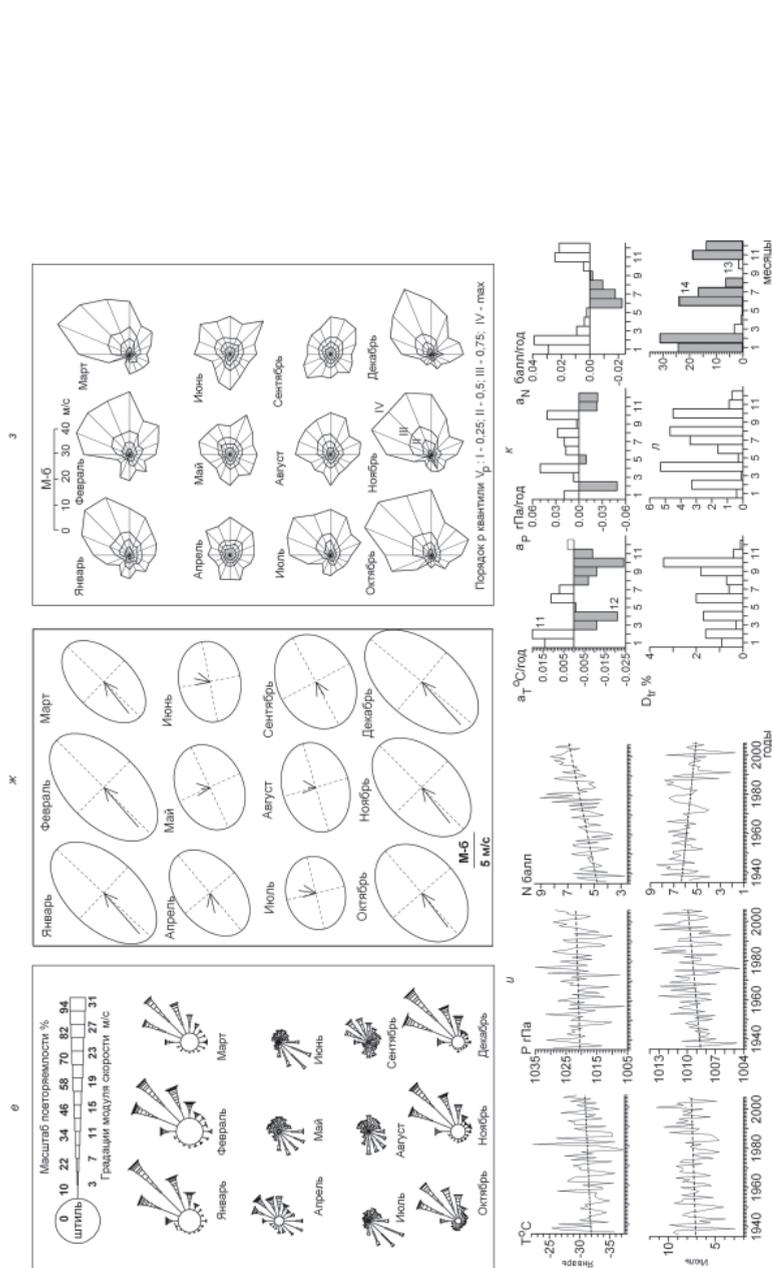


Рис. 2. Оценки характеристик межгодовой изменчивости и годового хода вероятностных характеристик метеорологических величин: *a* – розеттограммы (*b*) повторяемости температуры, давления, облачности в центральной части южного полушария (3) и повторяемости ясного (4) и пасмурного (5) и пасмурного (6) неба; *г* – годовой ход среднемесячной влажности с СКО по срочным (7) и среднемесячным (8) данным; *д* – повторяемость годовых экстремумов срочных (9) и среднемесячных (10) значений температуры, давления и скорости ветра по месяцам; *е*, *ж*, *з* – годовой ход роз повторяемости скорости ветра, совмещенных векторов среднего переноса и эллипсов рассеяния и квантильных диаграмм; *и* – ряды среднемесячных значений температуры, давления, облачности для января и июля и их аппроксимация трендом; *к*, *л* – годовой ход коэффициента (*a*) и дисперсионного вклада (*D<sub>т</sub>*) тренда температуры, давления и облачности (тренд положительный и отрицательный 11, 12, незначительный и значимый на 95 % уровне 13, 14)

В дальнейшем описанные результаты дисперсионного анализа будут уточнены, поскольку стационарное приближение не позволяет учесть как межгодовую модуляцию годового хода, так и сезонную модуляцию синоптических процессов.

### Межгодовая изменчивость и годовой ход

В настоящем разделе межгодовая изменчивость проанализирована по данным, обобщенным за одноименные месяцы. Годовой ход описывают 12 последовательностей вероятностных характеристик. Поскольку использованы не только среднемесячные, но и срочные данные, полученные характеристики относятся также и к масштабу синоптической изменчивости.

Распределение вероятностей  $T$ ,  $P$ ,  $N$  представлено на рис. 2 а гистограммами для центральных месяцев календарных сезонов. Для облачности  $N$  с учетом погрешности визуального определения принято 3 градации: «ясно» – 0–3 балла, «полужасно» – 4–7 баллов, «пасмурно» – 8–10 баллов. Годовой ход для  $T$ ,  $P$  представлен в табл. 3, 4 повторяемостью по градациям за все месяцы. В табл. 5 приве-

Таблица 3

Годовой ход повторяемости среднесуточной температуры воздуха (%)

Месяц	Градации температуры («от», «до»), °С														
	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
1	0,2	8,0	22,1	29,9	22,5	12,9	4,2	0,2	—	—	—	—	—	—	—
2	0,9	7,7	18,5	23,8	23,8	17,1	7,0	1,2	—	—	—	—	—	—	—
3	—	1,6	11,3	21,7	25,0	18,6	12,0	6,8	2,8	0,1	—	—	—	—	—
4	—	0,1	0,5	4,5	13,9	25,4	25,5	16,2	9,8	3,3	0,7	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	0,7	6,8	18,9	32,3	29,2	10,7	1,1	0,2	0,1	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	1,6	21,9	50,6	18,6	5,0	1,8	0,4
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1	35,7	38,8	17,9	6,0	1,4
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4	30,6	47,1	16,8	4,5	0,6
9	—	—	—	—	—	—	—	0,1	4,5	28,0	49,9	15,8	1,7	0,1	—
10	—	—	—	0,4	2,7	8,8	17,2	21,4	25,4	21,4	2,6	—	—	—	—
11	—	0,1	4,0	14,6	26,0	26,2	20,4	6,9	1,7	—	—	—	—	—	—
12	—	2,9	13,0	25,9	28,3	19,4	8,7	1,7	0,1	—	—	—	—	—	—

Таблица 4

Годовой ход повторяемости среднесуточного атмосферного давления (%)

Месяц	Градации давления («от» – «до»), гПа																
	975–980	980–985	985–990	990–995	995–1000	1000–1005	1005–1010	1010–1015	1015–1020	1020–1025	1025–1030	1030–1035	1035–1040	1040–1045	1045–1050	1050–1055	1055–1060
1	—	0,1	0,5	0,5	1,4	4,5	9,2	13,4	17,9	15,0	14,4	11,3	7,3	2,8	1,2	0,2	0,2
2	—	—	0,3	0,6	2,3	4,2	6,5	12,7	15,7	17,4	15,7	11,4	8,4	3,2	1,1	0,4	0,2
3	—	0,2	0,5	1,5	2,7	5,6	10,5	14,2	16,5	16,6	15,2	10,3	4,2	1,3	0,4	—	—
4	—	0,1	0,9	2,1	3,9	8,8	13,3	18,3	20,7	15,0	9,6	5,6	1,6	0,1	—	—	—
5	—	—	0,4	2,0	4,0	10,3	20,5	24,3	20,8	12,2	4,5	0,8	—	0,1	—	—	—
6	—	—	0,5	2,0	6,9	16,4	27,2	25,1	15,7	5,4	0,7	—	—	—	—	—	—
7	—	—	0,1	1,2	6,1	17,3	28,7	27,6	15,5	3,1	0,5	—	—	—	—	—	—
8	—	—	0,2	1,2	5,7	16,0	25,1	25,8	16,2	7,4	1,5	0,2	—	—	—	—	—
9	—	—	0,4	1,3	6,0	13,1	20,1	22,4	21,0	11,0	4,0	0,8	—	—	—	—	—
10	—	—	1,0	2,3	5,4	12,9	18,4	22,9	18,1	11,8	5,5	1,3	0,3	—	—	—	—
11	0,0	0,2	0,4	1,2	2,5	6,8	13,3	17,8	19,4	16,8	11,6	6,4	2,3	0,8	0,2	—	—
12	—	0,2	0,7	1,4	3,4	6,0	10,6	14,5	18,1	16,3	12,5	8,3	4,8	2,0	0,9	0,3	—

Годовой ход моментов и экстремумов распределения среднесуточных и среднемесячных значений температуры и давления

Параметр	Месяц												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$T, ^\circ\text{C}$													
$m$	-31,4	-30,1	-26,3	-18,6	-6,5	2,9	7,3	7,3	1,5	-11,0	-24,0	-28,4	
Среднесуточные данные													
$\sigma$	6,3	7,1	7,8	7,3	5,7	4,5	4,5	3,9	3,8	7,1	6,5	6,4	
$A$	<b>0,21</b>	0,04	<b>0,37</b>	<b>0,22</b>	-0,07	<b>1,04</b>	<b>0,94</b>	<b>0,90</b>	0,02	<b>-0,44</b>	0,09	<b>0,11</b>	
$E$	<b>-0,52</b>	<b>-0,64</b>	<b>-0,37</b>	<b>-0,21</b>	-0,01	<b>1,95</b>	<b>0,61</b>	<b>0,78</b>	<b>0,39</b>	<b>-0,44</b>	<b>-0,40</b>	<b>-0,39</b>	
min	-46,0	-47,9	-44,0	-40,2	-23,7	-9,0	-0,8	-1,2	-12,9	-34,3	-41,9	-46,1	
max	-11,6	-10,2	-2,7	4,3	16,4	24,5	24,9	24,4	15,6	4,8	-4,8	-9,6	
Среднемесячные данные													
$\sigma$	3,1	3,3	4,3	3,4	2,2	1,6	1,7	1,7	1,6	2,6	3,1	3,0	
$A$	0,35	-0,21	0,14	0,09	<b>0,54</b>	0,04	-0,29	0,22	-0,16	0,22	-0,04	-0,09	
$E$	-0,26	-0,51	0,49	0,27	0,77	-0,39	-0,55	-0,60	-0,58	-0,14	<b>-0,94</b>	<b>-0,93</b>	
$P, \text{гПа}$													
$m$	1021,2	1021,9	1018,9	1015,2	1012,3	1009,2	1009,2	1010,1	1011,7	1011,9	1016,9	1018,5	
Среднесуточные данные													
$\sigma$	11,3	11,3	11,2	10,1	8,1	7,0	6,3	7,1	8,1	8,9	10,1	11,5	
$A$	-0,05	-0,08	<b>-0,26</b>	<b>-0,22</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,13</b>	-0,02	<b>-0,11</b>	<b>-0,11</b>	-0,08	-0,06	
$E$	-0,04	-0,17	-0,01	-0,15	03,17	-0,12	-0,12	-0,08	<b>-0,25</b>	-0,08	0,17	0,02	
min	972,0	983,5	975,1	970,0	977,7	981,0	982,5	979,7	981,6	979,5	974,6	974,1	
max	1059,3	1059,7	1059,4	1043,8	1042,4	1031,7	1028,8	1035,7	1034,3	1043,4	1053,5	1055,7	
Среднемесячные данные													
$\sigma$	6,0	5,6	5,3	4,4	3,0	2,8	2,1	2,7	3,7	3,9	5,1	5,9	
$A$	-0,27	<b>0,54</b>	-0,33	<b>0,67</b>	0,12	-0,08	0,06	<b>-0,18</b>	0,08	<b>0,43</b>	<b>0,42</b>	<b>0,26</b>	
$E$	-0,17	0,23	-0,32	0,5	<b>1,44</b>	-0,60	-0,51	-0,58	-0,71	-0,45	0,21	-0,66	

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимо не нулевые коэффициенты асимметрии и эксцесса

ден годовой ход оценок моментов и экстремумов распределений по срочным и среднемесячным данным. Во все месяцы и сроки распределения – одномодальные. Характеристики распределений – мода, ширина диапазона изменчивости, асимметричность, заостренность – заметно изменяются от месяца к месяцу. Годовой ход четко проявляется у  $P$  и  $T$  как в среднем, так и в дисперсии.

В табл. 5 выделены ячейки, для которых распределение отличается от нормального по критериям  $A \neq 0$ ,  $E \neq 0$ . Как видно из таблицы, распределения среднесуточной температуры воздуха в большинстве месяцев имеют положительную асимметрию, наибольшие по модулю значения  $A$ ,  $E$  отмечаются летом. Распределение среднемесячных значений в большинстве случаев близко к нормальному.

На рис. 2 б годовой ход и межгодовая изменчивость  $T$  и  $P$  представлены квантилями распределения среднесуточных, среднемесячных и среднесезонных данных. Совместное представление квантилей суточного и месячного разрешения в форме «ящиков с усами» демонстрирует большой вклад в изменчивость процессов синоптического масштаба. Из него видно, что годовой ход проявляется не только в среднем, но и в параметрах масштаба распределения (в высоте «ящика» и в длине «усов» для данных как суточного, так и месячного разрешения). Следует отметить, что по этим показателям годовой ход давления проявляется столь же ярко, как и температуры. Заметим также, что для данных суточного разрешения отношение длины «усов» к высоте «ящика» заметно больше, чем для данных месячного разрешения. Соотношение длин верхнего и нижнего усов в «ящиках» срочных значений температуры летом позволяет утверждать, что особенности коэффициентов  $A$ ,  $E$  в табл. 5 связаны с квантилями очень высокого и очень низкого порядков. Действительно, рассчитанные по формуле (3) оценки коэффициента асимметрии, приведенные в табл. 6, показывают, что левая асимметрия обусловлена положительными аномалиями обеспеченностью менее 0,1.

Таблица 6

**Квантильные оценки коэффициента асимметрии среднесуточной температуры в июне**

$p$	min	0,01	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$A_p$	1,04	0,74	0,56	0,31	0,26	0,24	0,21

Годовой ход характеристик облачности представлен на рис. 2 в кривыми годового хода среднемесячного многолетнего балла облачности  $N$  и повторяемостями ясного, полужасного и пасмурного неба. Балл общей облачности имеет наименьшие значения в холодное время года и демонстрирует тенденцию к увеличению – в теплое. Отчетливо выражены 2 максимума – в мае и в августе–сентябре. Такой же годовой ход у повторяемости пасмурного неба, а годовой ход ясного и полужасного неба находится в противофазе (максимум – зимой и минимум – летом) и имеет существенно меньший размах. Для влажности на рис. 2 г годовой ход представлен графиками  $m(t)$ ,  $\sigma(t)$  (5) по срочным и среднемесячным данным. Как видно из рисунка, влажность резко увеличена в теплый сезон, поскольку  $m(t) > \sigma(t)$ . При этом для нее, как и для температуры воздуха, характерен значительный вклад в дисперсию регулярного годового хода.

Еще одной характеристикой годового хода является распределение годовых экстремумов по месяцам – рис. 2 д. Наиболее сосредоточенным является распределение  $\max(T)$ , самое размытое распределение имеет  $\min(P)$ . Максимум  $V$  отмечается с октября по март, с максимумом повторяемости в декабре–феврале.

Годовой ход и межгодовая изменчивость скорости ветра представлены графиками роз ветров, векторов  $\vec{m}_v$ , эллипсами  $\sigma_v$  и квантильными диаграммами по месяцам – рис. 2 е–ж. В табл. 7 приведены в инвариантной форме оценки моментов, экстремумов распределений и тренды.

Годовой ход модуля скорости ветра, вектора средней скорости ветра, инварианты тензора СКО по среднесуточным данным, вектора максимальной скорости ветра по срочным данным и параметры векторного тренда по среднемесячным данным

Месяц	$V$				$\bar{m}_V$		$(I_1^{(D)})^{0,5}$	$\sigma_V$				$a_V$	
	$m_V$	$\sigma_V$	$\max_V$	$\varphi_{\max}$	$m$	$\varphi$		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\chi$	$\alpha$	$a$	$\varphi_a$
	м/с	м/с	м/с	румб	м/с	град.	м/с	м/с	—	град.	м/с×год <sup>-1</sup>	град.	
1	5,2	5,2	40	ЗЮЗ	4,3	229	6,0	5,2	2,9	0,55	43	0,02	119
2	5,2	5,4	38	ЮЮЗ	4,2	229	6,2	5,4	3,0	0,55	45	0,01	139
3	4,3	3,9	40	ЗЮЗ	3,2	232	4,8	4,1	2,4	0,57	44	0,01	151
4	3,6	3,6	34	ЮЗ	1,6	257	4,8	4,0	2,6	0,64	50	0,02	107
5	3,7	2,6	24	ЮЗ	0,7	352	4,5	3,6	2,7	0,74	65	0,01	204
6	3,8	2,2	23	ЗЮЗ	1,3	13	4,2	3,3	2,5	0,76	79	0,02	240
7	3,6	2,0	26	ЮЗ	1,4	9	3,9	3,0	2,4	0,79	77	<0,01	74
8	4,0	2,4	28	ЗСЗ	0,6	3	4,6	3,7	2,7	0,73	74	0,01	64
9	4,4	2,8	34	ЮЗ	1,3	240	5,1	4,0	3,1	0,75	62	0,01	53
10	5,0	4,0	34	З	3,4	233	5,5	4,5	3,1	0,68	49	0,02	107
11	4,8	4,6	37	ЮЗ	3,6	232	5,6	4,8	3,0	0,61	45	0,01	114
12	5,6	5,3	40	ЮЮЗ	4,6	228	6,2	5,4	3,1	0,56	40	0,03	182

Анализ роз ветра показывает, что в холодный сезон преобладают Ю–ЮЗ–З ветры, а в теплый сезон – ветры С–СВ направлений, при этом в холодный сезон распределение по румбам сосредоточено, а в теплый сезон оно ближе к равномерному. В холодный сезон сильные ветры наблюдаются только для преобладающих направлений, а в теплый – почти всех направлений. В холодный сезон повторяемость штиля в несколько раз больше, чем в теплый. Таким образом, в холодный сезон усилена контрастность – максимальный модуль скорости больше, чем в теплый сезон, но при этом велика также повторяемость штиля и слабых ветров  $V < 3$  м/с. В теплый сезон более выражена повторяемость слабых и умеренных ветров со скоростью  $V = 3–7$  м/с.

Оценки годового хода векторов средней скорости и параметров эллипсов СКО показывают, что в холодный сезон средняя скорость направлена с ЮЮЗ на ССВ, а в теплый сезон – в противоположном направлении. Увеличение модуля средней скорости в холодный сезон по сравнению с теплым в значительной степени связано с большим разбросом направлений ветра в теплый сезон. Направление и модуль СКО более стабильно в течение года, однако и здесь наблюдается годовой ход, проявляющийся в зимнем усилении изменчивости (инвариант  $I_1$  в холодный сезон составляет 5,5–6,2 м/с, в теплый – 4–5 м/с). Форма эллипса СКО в течение года изменяется: в холодный сезон он вытянут и ориентирован примерно в направлении среднего переноса, а в теплый сезон становится близким к окружности.

Изменчивость ветра обусловлена не только усилением или ослаблением, но и вращением. Одной из характеристик вклада вращения в общую дисперсию является отношение  $\nu = D_V/I_1$ . В холодный сезон  $\nu = 0,70–0,75$ , а в теплый сезон  $\nu = 0,25–0,30$ , что подтверждает вывод о том, что летом относительная роль вращения возрастает.

Подчеркнем, что сильные и штормовые ветры ( $V > 15$  м/с) сосредоточены в относительно узком секторе – от Ю до З, причем штормовые ветры (более 25–30 м/с) – только в ЮЮЗ–ЮЗ секторах. Самые сильные ветры (до 40 м/с) имеют место в холодный сезон.

На рис. 2 и приведены графики среднемесячных значений  $T$ ,  $P$  и  $N$  и их аппроксимация трендом, на рис. 2  $\kappa$  – годовой ход коэффициента тренда и его вклад в дисперсию. Для  $T$ ,  $P$  знак коэффициента тренда изменяется от месяца к месяцу, во все месяцы тренд слабый, незначимый на 95 % уровне значимости и

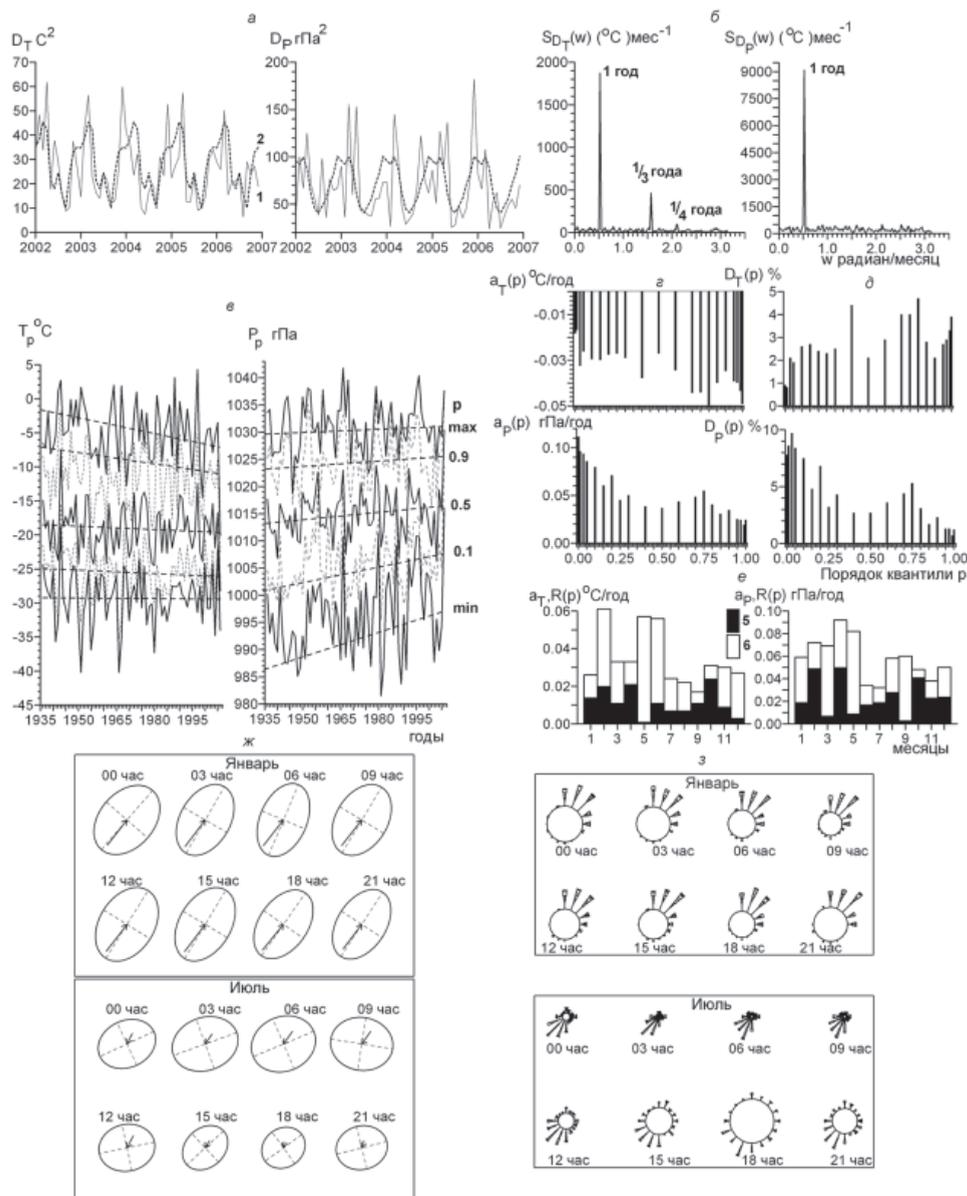


Рис. 3. Оценки характеристик синоптической изменчивости и суточного хода температуры, давления (а–е) и скорости ветра (ж–з):

а – ряды внутримесячной дисперсии (1) и средний многолетний годовой ход (2); б – спектральная плотность внутримесячной дисперсии; в – квантильные трассы (3) и их аппроксимация трендом в апреле; г – зависимости коэффициента тренда от порядка квантили и дисперсии, объясняемой трендом, – д; е – годовой ход коэффициента тренда среднемесячных значений (5) и размаха  $R_p$  коэффициентов тренда квантильных трасс (6);  $R_p = a_{\min} - a_{\max}$ ; ж – суточный ход в январе и апреле средней скорости ветра и эллипсов СКО и роз повторяемости скорости ветра – з

объясняет не более 4–6 % дисперсии. Отметим сильные тренды балла облачности, положительные зимой и отрицательные летом, описывающие до 30 % дисперсии. В эти сезоны тренды значимы. Следует обратить внимание на согласованность знаков трендов  $T$  и  $N$  в основные сезоны.

Тренд скорости ветра, согласно табл. 7, во все месяцы года слабый и статистически незначимый. В большинстве месяцев обнаружена слабая тенденция усиления южной составляющей скорости ветра.

### Изменчивость синоптического масштаба и суточный ход

Приведенные выше оценки показывают большой вклад процессов синоптического масштаба в климатическую изменчивость. В предыдущем разделе этот диапазон был проанализирован по данным, сгруппированным по одноименным месяцам. В данном разделе уточнен вклад в общую дисперсию годовой ритмики с учетом сезонной модуляции процессов синоптического масштаба и предпринята попытка оценить роль синоптических процессов в формировании многолетних трендов. Наиболее компактную оценку интенсивности синоптической изменчивости с учетом низкочастотной модуляции можно получить по рядам  $D(t)_j$  внутримесячной дисперсии среднесуточных данных, центрированных на среднегодовые значения и годовой ход. Графики отрезков временных рядов  $D(t)_j$  для  $T$  и  $P$ , приведенные на рис. 3 а и оценки спектров  $S_p(\omega)$  – на рис. 3 б, указывают на сильный годовой ход, модулированный в диапазоне межгодовой изменчивости.

Ряд  $D(t)_p$  наряду с рядами среднемесячных значений  $\zeta(t)_j$ , можно рассматривать как ПКСП. Модель (5) позволяет уточнить вклад годовой ритмики в общую дисперсию. Годовой ход  $\zeta(t)_j$  давления объясняет всего лишь 36 % дисперсии – колонка 1 в табл. 8. Этот вывод согласуется с оценками, полученными в стационарном приближении, в табл. 1, 2 и на рис. 1. Оценки в колонке 2 табл. 8 показывают, что без учета сезонной модуляции синоптических процессов дисперсия годовой ритмики остается недооцененной более чем на 50 %. Таким образом, полный вклад годовой ритмики в дисперсию велик не только для  $T$  (95 %), но и для  $P$  (75 %). К аналогичному результату приводит анализ и других метеоэлементов –  $A$ ,  $N$ ,  $V$ . Это подтверждает правомерность расширенной трактовки годовой ритмики как совокупности процессов с годовой периодичностью во всех диапазонах от межгодового до внутрисуточного.

Для оценки роли процессов синоптического масштаба в формировании тенденций многолетней изменчивости рассмотрим квантильные трассы  $X_p(t)$ , представляющие многолетние ряды одноименных квантилей  $X_p$  внутримесячного (одноименный месяц) распределения среднесуточных данных. Их анализ показывает вклад положительных и отрицательных аномалий различной обеспеченности в формирование трендов и тенденций межгодовой изменчивости. Графики квантильных трасс  $T$  и  $P$  и их аппроксимация трендом для апреля приведены на рис. 3 в.

Таблица 8

Вклад в общую дисперсию годовой ритмики температуры и давления без учета (1) и с учетом (2) сезонной модуляции синоптических процессов (%). Регулярный годовой ход  $m(t)$  и его межгодовая модуляция  $\epsilon(t)$

Элемент	1 – среднемесячные значения		2 – сезонная модуляция синоптических процессов		Всего
	$D_m$	$D_\epsilon$	$D_m$	$D_\epsilon$	
$T$	87		8		95
	82	5	7	1	
$P$	36		40		75
	18	18	14	26	

Оценки коэффициентов тренда  $a_p$  квантильных грасс

Порядок $p$ квантили $X_p$	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Температура воздуха, °C/год											
min	-0,002	0,003	0,003	-0,018	0,003	-0,005	0,012	-0,006	-0,017	0,013	0,003	0,011
0,05	0,019	0,018	-0,019	-0,026	-0,002	-0,015	0,007	-0,002	-0,010	-0,010	-0,000	-0,007
0,10	0,024	0,006	-0,027	-0,029	-0,003	-0,010	0,006	-0,004	-0,011	-0,011	0,001	-0,008
0,25	0,011	0,020	-0,025	-0,027	-0,004	-0,001	0,011	-0,006	-0,000	-0,013	-0,014	0,001
0,50	0,019	0,034	-0,027	-0,27	-0,009	0,005	0,011	-0,005	-0,004	-0,008	-0,010	0,003
0,75	0,016	0,037	-0,009	-0,044	-0,006	0,005	0,002	-0,016	-0,007	-0,014	-0,000	0,020
0,90	0,007	0,033	-0,020	-0,034	-0,007	0,013	-0,006	-0,006	-0,007	-0,019	0,003	0,012
0,95	0,002	0,040	-0,012	-0,039	-0,005	0,011	-0,004	-0,004	-0,005	-0,019	-0,003	0,008
max	0,015	<b>0,064</b>	0,003	-0,049	<b>-0,050</b>	0,27	-0,014	0,006	-0,014	-0,004	0,002	0,006
$R$	0,026	0,061	0,33	0,033	0,057	0,056	0,024	0,022	0,017	0,031	0,030	0,027
$a$	0,014	0,020	-0,011	-0,021	0,001	0,011	0,007	-0,007	-0,011	-0,024	-0,009	0,003
Размах годового хода среднемесячной температуры – 0,044 °C/год												

Порядок $p$ квантили $X_p$	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Атмосферное давление, гПа/год											
min	0,056	-0,026	0,003	<b>0,111</b>	-0,007	0,015	0,024	<b>0,070</b>	0,022	0,050	-0,055	-0,007
0,05	0,012	-0,022	0,000	<b>0,085</b>	-0,043	0,028	0,014	<b>0,035</b>	0,030	0,053	-0,030	-0,004
0,10	0,008	-0,030	0,004	<b>0,079</b>	-0,030	0,019	0,019	0,034	0,025	0,055	-0,029	-0,013
0,25	-0,001	-0,54	0,10	0,045	-0,028	0,020	0,017	0,029	0,017	0,029	-0,024	-0,010
0,50	0,000	-0,067	0,23	0,036	-0,019	0,011	0,020	0,033	-0,001	0,018	-0,021	-0,033
0,75	0,023	-0,63	0,06	<b>0,055</b>	-0,007	0,019	0,014	0,022	-0,009	0,039	-0,025	-0,033
0,90	0,031	-0,063	-0,005	0,034	0,009	0,027	0,008	0,014	-0,011	0,031	-0,023	-0,023
0,95	0,032	-0,041	-0,005	0,025	0,010	0,028	0,012	0,017	-0,016	0,028	-0,023	-0,018
max	0,050	-0,044	<b>-0,031</b>	0,024	0,025	0,041	-0,004	0,012	-0,006	0,046	-0,047	-0,021
$R$	0,059	0,072	0,069	0,092	0,082	0,034	0,032	0,058	0,060	0,48	0,038	0,050
$a$	0,019	-0,049	0,007	0,050	-0,009	0,017	0,019	0,028	0,003	0,041	-0,023	-0,024
Размах годового хода среднемесячного давления – 0,090 гПа/год												

Примечание. Значимые на 95 % уровне тренды выделены жирным шрифтом

На рис. 3 г, д приведены диаграммы коэффициентов тренда  $a_p$  и дисперсии, объясняемой трендом  $D_p$  для 21-й квантили. Оценки  $a_p$  по месяцам приведены в табл. 9. Для облегчения интерпретации там же приведен размах  $R = \max(a_p) - \min(a_p)$  и оценка коэффициента тренда  $a$  среднемесячных значений. Сезонная изменчивость значений  $a$  и  $R$  представлена на рис. 3 е.

Основной вывод состоит в том, что  $a_p$  сильно зависит от порядка квантили  $p$ . Внутримесячный размах  $R$  оценки  $a_p$  соизмерим с годовым размахом оценки  $a$  тренда среднемесячных и многократно превосходит саму оценку  $a$  для данного месяца. В ряде случаев тренды квантильных трасс  $a_p \gg a$  и значимы на 95 % уровне, например, положительные аномалии давления в апреле обеспеченностью  $p \geq 0,2$ . Оценки тренда медианы  $a_{0,5}$  и среднемесячных значений  $a$  совпадают по знаку и близки по величине. Особо отметим, что оценки  $a_p$  могут быть знакопеременными, что указывает на определенные тенденции межгодовой изменчивости внутримесячных контрастов. Так, в июне отрицательные аномалии температуры воздуха имеют тенденцию к углублению, а положительные аномалии – к усилению, т.е. внутримесячные контрасты усиливаются. Отсюда следует вывод о значительной роли синоптических процессов в формировании тенденций межгодовой изменчивости. Появляется возможность формулировать гипотезы о механизме формирования этих тенденций. Например, температура воздуха в апреле характеризуется значительными контрастами. В период 1936–2007 гг. минимальная среднесуточная температура изменялась от  $-40,2$  °С до  $-18,8$  °С, а максимальная от  $-20,1$  °С до  $+2,7$  °С. Отрицательные аномалии температуры часто связаны с Сибирским антициклоном, а положительные с Алеутским циклоном. Согласно табл. 9 слабый и незначимый тренд среднемесячной температуры обусловлен в основном ослаблением положительных аномалий, а слабый положительный тренд давления – существенными трендами отрицательных аномалий. Таким образом, многолетнюю тенденцию к понижению температуры в апреле можно гипотетически связать с ослабляющимся тепляющим воздействием Алеутского минимума.

Суточный ход наиболее заметен у  $T$  и  $\bar{V}$ . В табл. 10 приведены оценки суточного размаха средних значений, СКО и экстремумов температуры по данным четырехразовых измерений с 1936 по 2007 г. по месяцам. Размах суточного хода изменяется в среднем от 3,7 до 7,0 °С, главный максимум приходится на апрель, вторичный максимум – на июль, минимум – на сентябрь. Межгодовая изменчивость усилена с марта по август, максимум дисперсии отмечен в июле. Во все месяцы отмечаются ситуации с почти нулевым суточным ходом. Максимальный размах суточного хода в зависимости от месяца изменяется от 16 до 31 °С. Годовой ход максимума и среднего значения согласованы, но имеют некоторые индивидуальные особенности. Так, наибольший максимум отмечается в марте, а второе увеличение приходится на май–июнь.

Суточный ход скорости ветра рассмотрен для периода, когда проводились восьмисрочные наблюдения. На рис. 3 ж, з представлен суточный ход векторов средней скорости, эллипсов СКО и роз ветра для января и июля. Как видно из

Таблица 10

Годовой ход моментов распределения размаха суточного хода температуры воздуха

	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$m$	4,3	4,5	5,9	7,0	5,0	4,2	5,2	4,3	3,7	4,0	4,4	4,2
$\sigma$	2,8	2,9	3,2	3,4	3,3	3,6	4,1	3,3	2,6	2,6	2,9	2,7
min	0,3	0,2	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1
max	23,3	21,2	31,2	23,9	28,4	28,6	25,9	19,1	16,1	16,9	21,4	18,6

**Годовой ход размаха суточного хода средней скорости ветра  
и линейного инварианта тензора СКО**

	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{V}$	0,1	0,1	0,6	1,0	1,3	1,4	1,9	1,7	1,3	0,2	0,1	0,1
$I_{\bar{V}}^{0,5}$	0,3	0,2	0,4	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,4	0,3	0,1	0,1

рисунков, зимой суточный ход почти не заметен, в то время как летом он хорошо выражен и проявляется в основном в изменениях модуля средней скорости, интенсивности изменчивости и повторяемости штиля. Годовой ход суточного размаха средней (скалярной) скорости и линейного инварианта тензора СКО в табл. 11 показывает заметный суточный ход с апреля по сентябрь. Это подтверждает и годовой ход суточного размаха повторяемости штиля.

### ВЫВОДЫ

На основе статистического анализа электронного архива всех доступных данных стандартных метеорологических наблюдений, проведенных на полярной станции Тикси с августа 1932 г. по декабрь 2007 г., получены оценки характеристик климатической изменчивости температуры воздуха, атмосферного давления, влажности, скорости ветра в диапазонах межгодовой изменчивости, годового хода, изменчивости синоптического масштаба и суточного хода.

Установлено, что наиболее существенным компонентом многолетней изменчивости метеорологических элементов является годовая ритмика. Важнейшими ее элементами, наряду с регулярным годовым ходом, являются межгодовая изменчивость годового хода среднемесячных и сезонная изменчивость синоптических процессов. Это подтверждает правомерность расширенной трактовки годовой ритмики как совокупности процессов с годовой периодичностью в диапазонах от межгодового до внутрисуточного.

Выявлена согласованность слабых положительных трендов температуры воздуха и сильных трендов балла общей облачности, положительных зимой и отрицательных летом.

Высказано предположение о влиянии синоптических образований на многолетние тренды температуры воздуха. Так, в апреле тенденция к понижению среднемесячной температуры обусловлена в основном ослаблением положительных аномалий, что может быть вызвано ослаблением циклонической деятельности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 264 с.
2. *Боков В.Н., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Оценки межгодовой изменчивости скорости ветра над морем // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 3. С. 253–289.
3. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: ВЦ АН СССР, 1968. 474 с.
4. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. Т. 1. 366 с.
5. *Ван дер Варден Б.Л.* Математическая статистика. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 434 с.
6. *Рожков В.А.* Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Прогресс-Погода. 1997. 559 с.

7. Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 2001, 340 с.
8. Тьюки Д. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. М.: Мир, 1981. 693 с.

N.E.IVANOV, A.P.MAKSHTAS, S.V.SHUTILIN, R.M.GUN

## **LONG-TERM VARIABILITY OF CLIMATE CHARACTERISTICS IN THE AREA OF TIKSI HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATORY**

*The description of the electronic archive of all available data of standard meteorological observations at polar station Tiksi since August 1932 until December 2007, created in the Arctic and Antarctic Research Institute and Tiksi Branch of Yakutian Administration of Hydrometeorological Service, is presented. The sub-range approach to analysis of climate variability is substantiated. The statistical estimates in ranges of interannual variability, annual course, synoptic scale variability and diurnal course are shown. The assumption about influence of synoptic systems on long-term air temperature trends is stated. The consistency of air temperature and total cloudiness trends during summer and winter seasons is revealed.*

*Key words:* Tiksi hydrometeorological observatory, electronic archive, climate variability, ranges of variability, air temperature and humidity, atmospheric pressure, wind speed, cloudiness.

## ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ СЛОЯ СКАЧКА ПЛОТНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

канд. геогр. наук В.Ю.БЕНЗЕМАН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@aari.nw.ru

*Описаны эксперименты по лазерному зондированию с помощью самолетного лидара поверхностного слоя воды в арктических морях в августе–сентябре 1988–1989 гг. В основу экспериментов положена проверка идеи И.Е.Фролова и автора данной статьи о возможности фиксации глубины залегания слоя скачка плотности воды лазерным излучением с самолета.*

*Ключевые слова:* слой скачка плотности, лазерное зондирование

Применение лазеров для зондирования окружающей среды является многосторонним. Лазеры:

- используются для измерения концентраций основных и малых составляющих атмосферы и, следовательно, хорошо подходят для контроля загрязнений;
- позволяют измерить термические, структурные и динамические характеристики как атмосферы, так и гидросферы;
- дают возможность регистрировать пороговые концентрации определенных составляющих, что требуется в некоторых системах аварийного предупреждения о загрязнениях;
- позволяют картографировать рассеивание сточных шлейфов;
- делают возможным распознавание спектральных образов таких объектов зондирования, как нефтяные пятна.

В 1988–1989 гг. (август–сентябрь) проводились эксперименты по лазерному зондированию верхнего (0–35 м) слоя океана на самолете-лаборатории ИЛ-18 с целью измерения глубины залегания слоя скачка плотности в арктических морях.

В 1988 г. район эксперимента был выбран в Карском море, которое характеризуется значительной переслоенностью вод. В августе в Карском море обычно наблюдается ярко выраженный слой скачка по температуре и солености. В период с 22 августа по 2 сентября 1988 г. НИС «Профессор Мультиановский» выполняло гидрологическую съемку свободной ото льдов части Карского моря. Совместная работа самолета и судна производилась в центральной и юго-западной частях моря. Такой эксперимент проводился впервые. Зондирование осуществлялось с высот 110–230 м. Посылка импульса лидара («выстрел») производилась от 6 раз в секунду, т.е. примерно через каждые 15 м пути.

На рис. 1 показаны осредненные за 10-секундные интервалы времени значения всплесков на эхо-сигналах деполяризации, которые хорошо коррелируют с глубиной залегания нижней границы слоя скачка плотности по данным зондирования гидрозондом с НИС «Профессор Мультиановский».

Луч лазера фиксирует лишь взвешенные частицы в воде (гидрозоли) при размерах, близких к длине волны излучения, тогда происходит всплеск интенсивности на эхо-сигнале деполяризации. Если размеры частиц, попавших под луч лазе-

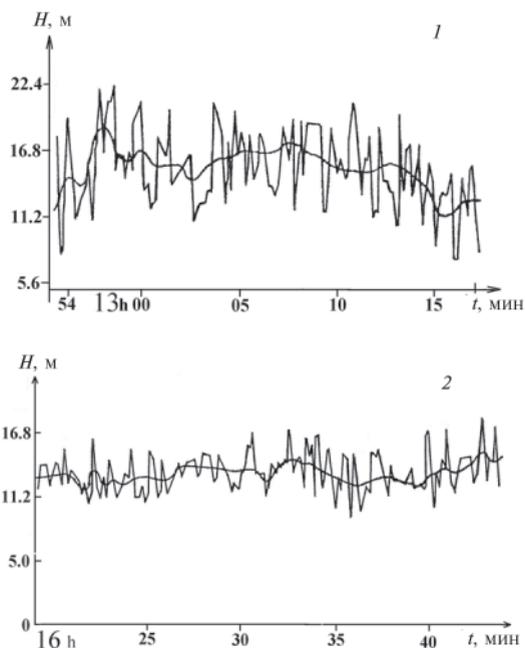


Рис. 1. Фрагменты записи зондирования глубины залегания слоя скачка плотности в центре юго-западной части Карского моря 26.08.1988 с помощью лазера как результат рассеяния от фитопланктона (нанопланктона):

1 –  $73^{\circ}05'$  с.ш.,  $62^{\circ}50'$  в.д.,  $H = 65$  м; 2 –  $73^{\circ}00'$  с.ш.,  $61^{\circ}50'$  в.д.,  $H = 55$  м

ра, намного больше длины волны излучения, то всплеск появится у сигнала поляризации, что и используется при поиске косяков рыб в море. Запас плавучести указанных частиц фитопланктона из-за их размеров (нанометры) и плотности удерживает их именно на нижней границе слоя пикноклина, и они четко фиксируются в этом пограничном слое из-за больших градиентов  $\sigma_t$ .

На рис. 1 хорошо заметны внутренние волны с длиной волны порядка 1000–1500 м на фоне более длинных (около 5 км) волн. Амплитуды волн при этом у второй реализации примерно в два раза меньше, хотя районы зондирования достаточно близки. Чтобы ответить на вопрос, связано это с природной физикой или же с неустойчивостью работы лазерной техники, — нужны дальнейшие натурные исследования. Однако необходимо отметить, что частотные спектры колебаний в обоих случаях близки.

Лазерное зондирование осуществлялось на скорости 350 км/ч. В предыдущем эксперименте (Карское море, август 1988 г.) в определенной степени было подтверждено предположение, что глубина залегания слоя гидрозолей в морской воде соответствует глубине залегания нижней границы слоя раздела поверхностных и подповерхностных вод, идентифицируемого как нижняя граница слоя скачка плотности воды.

Другой подобный эксперимент производился в августе–сентябре 1989 г. Общая схема полетов над арктическими морями была спланирована так, чтобы максимально обеспечить выполнение всех разделов программы всеми видами наблюдений и измерений с помощью дистанционных комплексов. В целом все маршруты полетов были спланированы так, чтобы зондирование свободной ото льда ак-

ватории морей, то есть полет самолета, проходило по линии стандартных разрезов и по сетке станций, выполняемых традиционно научно-исследовательскими судами «Ледовый патруль» института. Во время проведения полетов на самолете ИЛ-18 в Карском море проходили экспедиции на НИЛ «Отто Шмидт» и НИС «Академик Шулейкин». В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском гидрологическая съемка проводилась на НИС «Мезень». В Чукотском море в августе–сентябре работали научно-исследовательские суда «Профессор Хромов» и г/с «Дмитрий Лаптев», гидрологические данные которых тоже использовались для сравнения с лидарными измерениями с самолета.

Методика проведения частных экспериментов по калибровке самолетных измерительных комплексов, а также микромасштабные полигоны в районе айсбергов проводились по крестообразной схеме размерами примерно 10×10 км с облетами на 5–7 высотах от 30 до 200 м с центром – объект эксперимента. При этом на судах выполнялись согласно программе две (одна за другой) гидрологические станции с учащенными горизонтами.

В научных отчетах об испытании лидара [1, 2] автором данной статьи и И.Е.Фроловым была выдвинута гипотеза о фиксации лазером оптических неоднородностей в верхних слоях воды в арктических морях на уровне нижней границы слоя скачка плотности. Этими оптическими неоднородностями по той же гипотезе могут выступать взвешенные в воде частицы, которые, по-видимому, являются частицами фитопланктона. Отраженная составляющая волны когерентного излучения лазера, проходящего через верхний 35-метровый слой воды, принимается бортовым комплексом лидара, фиксируется распределение особого вида фитопланктона – нанопланктона, т.е. фиксируется глубина самых малых частиц фитопланктона и крупных бактерий размерами 3–50 мкм.

Уравнение лазерного зондирования с обобщенным учетом многократного рассеяния  $P(r)$  выглядит следующим образом:

$$P(r) = Ar^{-2}\sigma_{\pi}e^{-2\sigma(r-H_0)}[1 + \delta(r - H_0)],$$

где  $r$  – радиус рассеяния;  $\sigma_{\pi}$  – коэффициент обратного рассеяния воды;  $\sigma$  – коэффициент ослабления излучения водой;  $H_0$  – расстояние от самолета до воды;  $\delta$  ~ добавка-вклад многократного рассеяния;  $A$  – постоянная лазера.

На измерении соотношения поляризованного  $P//(r)$  и деполаризованного  $P\#(r)$  сигналов на приемнике и построено лазерное зондирование аномалий (подводных оптических неоднородностей – ПОН – или гидрозолей) в морской воде.

Степень деполаризации эхо-сигнала с глубиной возрастает хотя оба компонента  $P//(r)$  и деполаризованного  $P\#(r)$  по интенсивности сигнала монотонно убывают с глубиной.

В первом приближении для идентификации сигналов используется знак контраста степени деполаризации. Отрицательный – отражение от зеркальной поверхности, положительный – от шероховатой, диффузной.

На первом этапе обработки данных о глубинах залегания оптических неоднородностей (ПОН) определялись средние значения глубин по различным интервалам скользящего осреднения за интервал в 5–10 мин, и рассчитывалась гистограмма этих выбранных автоматически стационарных интервалов.

Остановимся на проблеме подготовки данных измерений для дальнейшего анализа, например, по описанным выше технологиям.

Это важно в связи с получением огромного количества измерений – десятки и даже сотни тысяч единиц, как, например, при дистанционном лазерном зондировании поверхностного слоя океана с самолета-лаборатории. Импульсный лазер выдает по десять «выстрелов» в секунду. В связи с этим измерения имеют стохастический характер отраженного от подводных оптических неоднородностей (гидрозолей) – обычно это фитопланктон (нанопланктон) – оптического сигнала.

Функции пропускания атмосферы, шумы в электронном тракте, частотные и фазовые искажения при передаче наносекундных импульсов по электрическим цепям — все эти факторы обуславливают необходимость применения статистических методов для анализа временных рядов измеряемых глубин оптических неоднородностей, которые связываются с глубиной залегания слоя скачка плотности.

В условиях априорной неопределенности вида функции распределения сигналов лазера и ее параметров использовались непараметрические методы теории статистических решений. Непараметрической статистикой называют некоторую функцию случайной величины с неизвестным распределением. Выбирается некоторая функция, которая обладает некоторым известным распределением, свойства которой некоторым образом характеризуют свойства неизвестного распределения исходной случайной величины. Зная распределение непараметрической статистики, можно с его помощью проверить гипотезы о некоторых свойствах неизвестных распределений. К таким свойствам, в частности, относится нормальность, стационарность, наличие выпадающих (сбойных) точек, независимость или коррелированность наблюдений и т.п.

Одной из самых мощных статистик является статистика Кендала (обобщенная инверсия второго порядка) [4]:

$$T^{2\Sigma} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n u(y_i - y_k), \quad (1)$$

где  $u(y_i, y_k) = 1$ , если  $y_i \geq y_k$  и  $u(y_i, y_k) = 0$ , если  $y_i < y_k$ . Это элементарная инверсия.

Распределение статистики Кендала является биномиальным с объемом выборки  $n(n-1)$ .

Среди наиболее употребляемых непараметрических статистик выделяются знаковые, ранговые, порядковые и различные комбинации на их основе. Статистику Кендала можно использовать для проверки гипотез о вероятностных способах нестационарных наблюдений.

Ввиду отсутствия априорной информации первая задача, которая решается, — это классификация и разделение данных на статистически однородные интервалы квазистационарности. Знание стационарных свойств данных измерений и длительности интервалов стационарности имеет важнейшее значение, т.к. эти интервалы являются интервалами сжатия данных, сглаживания и обработки.

С использованием  $T_i^{2\Sigma}$ -статистики производится деление данных на временные интервалы, для которых с наперед заданной вероятностью  $\alpha$  оценки средних значений и дисперсии постоянны. Помимо задач классификации и разделения данных с использованием инверсионных методов, производится контроль и идентификация трендов на каждом из интервалов квазистационарности (возрастание и убывание трендов на интервале: вогнутый, выпуклый, колебательный и т.п.).

Метод позволяет за один цикл обработки обнаружить и выделить разнородные интервалы, объединив их в две группы однородных по некоторым признакам интервалов — группы стационарных и нестационарных интервалов.

Метод основан на последовательной процедуре проверки статистических гипотез с вычислением текущих обобщенных инверсий второго порядка  $T_i^{2\Sigma}$  и

допустимых границ  $T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]$  и  $T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right]$ . Границы интервалов стационарности определяются абсциссой  $nk_{cm}$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , соответствующей объему выборки данных измерений в точке пересечения линии текущих суммарных инверсий  $T_i^{2\Sigma}$  с допустимыми кривыми  $T_{\max, \min}^{2\Sigma} \left[ i; \alpha \right]$ , определяющими область  $G_0$  (рис. 2) принятия гипотезы  $H_0$  стационарности.

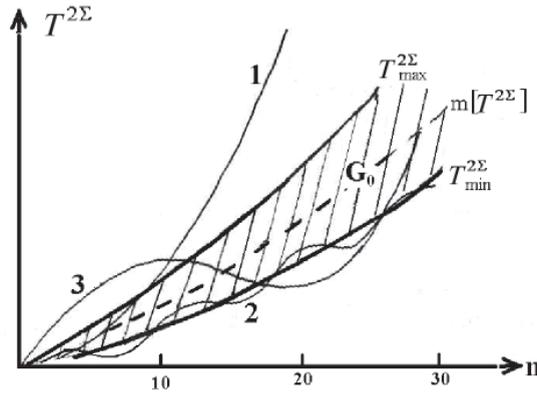


Рис. 2. Связь типов трендов с поведением обобщенных инверсий:

*A* – кривая 1 обобщенных инверсий пересекает только одну из допустимых границ  $T_{\max}^{2\Sigma}$  или  $T_{\min}^{2\Sigma}$  и только однажды; *B* – кривая 2 пересекает постоянно одну из допустимых границ  $T_{\max}^{2\Sigma}$  или  $T_{\min}^{2\Sigma}$ ; *Б* – кривая 3 пересекает последовательно каждую из допустимых границ  $T_{\max}^{2\Sigma}$  или  $T_{\min}^{2\Sigma}$

При проверке гипотезы  $H_0$  можно получить характерные случаи из комбинаций пересечений  $T_i^{2\Sigma}$  с  $T_{\max, \min}^{2\Sigma} [i; \alpha]$ , как это показано на рис. 2.

Каждой из комбинаций  $T_i^{2\Sigma}$  соответствуют типы временных рядов (или трендов). Так, для случая *A* (рис. 2) характерны монотонно возрастающие и убывающие временные ряды данных; для случая *B* (рис. 2) – ряды с периодическими трендами, симметричными относительно своего математического ожидания. Случай *Б* (рис. 2) соответствует временным рядам со смешанными трендами, составляющими аддитивную смесь из двух упомянутых типов трендов.

Алгоритм реализует критерий нестационарности, заданный выражением

$$T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right] < T_i^{2\Sigma} < T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right].$$

При поступлении из блока ввода исходных данных текущих измерений  $y_i$  в схему сравнения отсчетов в ней формируются, в соответствии с решающим правилом (1), последовательности элементарных инверсий. Последние служат для вычисления вспомогательных рядов обобщенных инверсий  $T_i^{2\Sigma}$ .

Одновременно для заданной величины уровня значимости  $\alpha$  в соответствии с методикой вычисления допустимых границ находятся  $T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right]$  и  $T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]$ .

Значения  $T_i^{2\Sigma}$  и  $T_{\max, \min}^{2\Sigma} [i; \alpha]$  сравниваются в блоках сравнения, в которых проверяется выполнение простых неравенств – критерия стационарности:

$$T_i^{2\Sigma} \leq T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right], \quad T_i^{2\Sigma} \geq T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (2)$$

И двух неравенств – критерия нестационарности:

$$T_i^{2\Sigma} > T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right], \quad T_i^{2\Sigma} < T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (3)$$

Критерий нестационарности принимается, если выполняются неравенства

$$T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right] \geq T_i^{2\Sigma} < T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right] \quad (4)$$

или

$$T_{\max}^{2\Sigma} \left[ i; \frac{\alpha}{2} \right] < T_i^{2\Sigma} \geq T_{\min}^{2\Sigma} \left[ i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (5)$$

Параллельно поступает информация о типе тренда и о числе однородных интервалов, принадлежащих к одному множеству.

Формирование интервалов  $n_{нест}$  прекращается в момент нарушения неравенств (4) или (5), т.е. линия инверсий  $T_i^{2\Sigma}$  вновь возвращается в область  $G_0$ , для которой справедливы неравенства (2) и т.д.

Таким образом, применяя метод последовательных пересечений, можно получить результаты обработки временного ряда, удовлетворяющие критериям однородности по различным статистическим параметрам. В этом случае ряд будет представлен совокупностью трех типов однородных множеств, состоящих из интервалов: стационарности, нестационарности с выпуклым трендом, с вогнутым трендом и т.п.

Как уже указывалось, калибрация лидарного комплекса производилась с помощью научно-исследовательских судов ААНИИ.

Возвращаясь к анализу калибрации лазера к западу от полуострова Ямал, необходимо отметить одно очень важное обстоятельство: по измерениям с судна максимальный вертикальный градиент плотности воды в слое скачка в этом рай-

$$\text{оне велик и равен } \left( \frac{\partial \sigma_t}{\partial z} \right)_{\max} \approx 0,6.$$

Ниже этого слоя расположен нижний пограничный слой слоя скачка плотности, который зафиксировал лидар многократными устойчивыми всплесками на деполаризованных эхо-сигналах с отклонением от измерений с судна на 3–4 м ( $\Delta = 3-4$  м). С учетом точности фиксации горизонтов на станциях на волнении 2–3 м это почти полное совпадение.

Из большого числа гидрологических станций, выполненных судами, с маршрутами полетов совпали по месту около 140 станций. Они были использованы для сравнения с данными лидарного зондирования.

Эхо-сигналы лазера были обработаны на ЭВМ по алгоритмам непараметрических методов теории принятия решений.

Затем эти данные, по отдельности для поляризованного и деполаризованного каналов, были нанесены на карты соответственно маршрутам полетов.

На эти карты глубин залегания нижней границы слоя скачка, полученных по лидарным данным, были нанесены те же глубины нижней границы слоя скачка, полученные независимо по данным вертикального распределения плотности воды на гидрологических станциях, выполненных указанными научно-исследовательскими судами.

На основе этих карт, считая гидрологические данные реперными, несмотря на большие отклонения по времени (10–20 дней) некоторых гидрологических измерений от лидарного зондирования, были построены карты отклонений – ошибок. Эти карты представлены на рис. 3.

На карты нанесены только те маршруты полетов, где были выполнены гидрологические станции. Полностью зачерненные части маршрута – это места, где глубины залегания нижней границы слоя скачка плотности, измеренные лидарным зондированием с самолета, практически полностью совпадают ( $\Delta = 0-5$  м), с точнос-

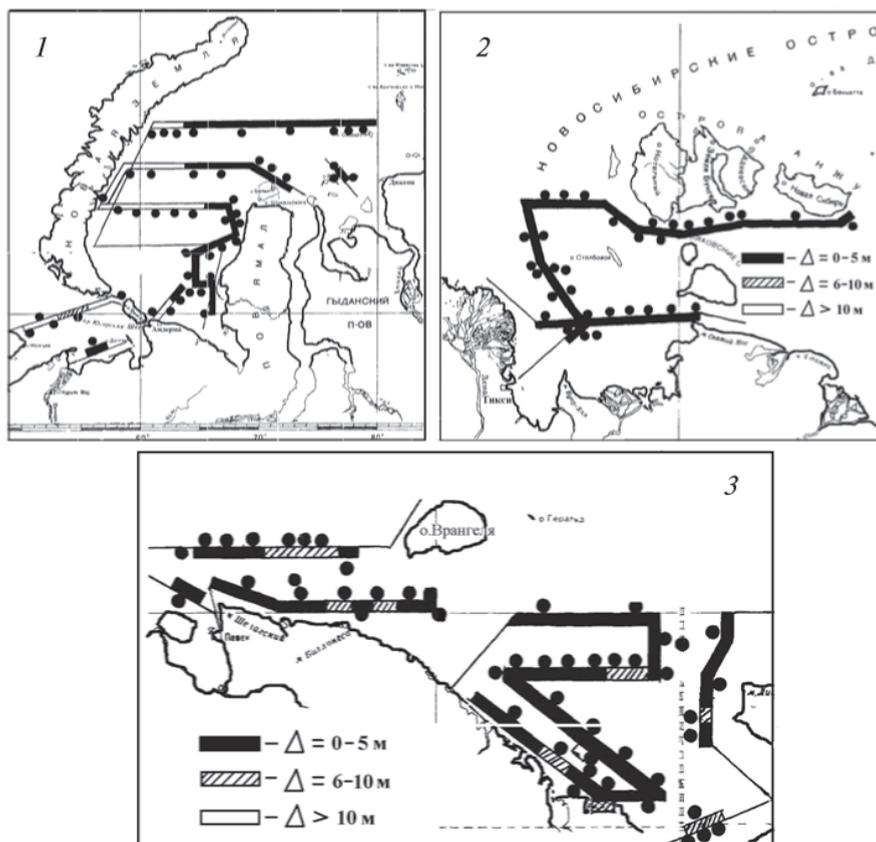


Рис. 3. Отклонения значений глубин слоя скачка плотности  $\Delta$ , измеренных лидаром, от прямых измерений с судна в Карском море (1), Лаптевых и Восточно-Сибирском (2) и Чукотском (3) в августе 1989 г.

тью до ошибок фиксации горизонтов, с такими же характеристиками по гидрологическим станциям. Заштрихованные косой линейкой части маршрута обозначают места, где  $\Delta = 5-10$  м.

На этих же картах черными кружочками указаны места выполнения гидрологических станций судами, с которыми производилось сравнение. По картам отклонений  $\Delta$  хорошо видна география точности фиксации лидаром в некоторых районах нижней границы слоя скачка плотности.

Достаточно резко выделяется район западной части Карского моря, где велики ( $\Delta > 10$  м) отклонения лидарных и гидрологических данных. Далее на восток совпадение полное, а в районах Восточно-Сибирского и Чукотского морей местами видны отклонения  $\Delta = 5-10$  м, в остальном же здесь тоже полное совпадение.

Необходимо указать, что для этого района характерна большая разница по времени выполнения лидарного зондирования и многих гидрологических станций.

Из табл. 1 видно, что с большими отклонениями  $\Delta > 10$  м – всего 13 % гидрологических станций. Остальные 87 % гидрологических станций (116 станций) в целом подтверждают измерения лидаром в районе этих станций. При этом хорошо заметно четкое разделение отклонений  $\Delta$  по районам, которое, как мы

**Отклонения глубин скачка плотности, измеренных лидаром  
и по данным гидрологических станций, выполненных судами  
по маршрутам, нанесенным на рис. 3**

Отклонения $\Delta$ (м)	0–5	5–10	> 10
Карское море (карта 1)			
Число станций	34	10	15
%	58	17	25
Море Лаптевых и Восточно-Сибирское море (карта 2)			
Число станций	49	23	2
%	66	31	3
Восточно-Сибирское и Чукотское моря (карта 3)			
Число станций	83	33	17
%	62	25	13

увидим далее, связано с особенностями водных масс, находящихся в различных районах. Они по своим оптическим свойствам, точнее, наличию подводных оптических неоднородностей (ПОН) в морской воде, определяют физику прохождения лазерного излучения в среде и ошибки в измерениях максимальных градиентов плотности. Необходимо отметить, что в статистику для сравнения с лидарными данными не вошли гидрологические станции, выполненные с борта НИЛ «Отто Шмидт» в северо-западной части Карского моря, поскольку по результатам калибровки лидара в этом районе и самими гидрологическими станциями видно, что сравнение их в этом районе невозможно. Попытаемся объяснить, с чем связаны указанные отклонения  $\Delta$ . Возвращаясь к предыдущему разделу, обратим внимание на то, что из трех калибровок на двух (около Ямала – НИС «Академик Шулейкин» и в Чукотском море – г/с «Дмитрий Лаптев») было полное совпадение при больших значениях максимальной величины вертикального градиента

плотности воды  $\left(\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}\right)_{\max} > 0,2$ .

При третьей калибровке к северу от мыса Желания, выполняемой совместно с ледоколом «Отто Шмидт», отклонение лидарных от гидрологических данных по слою скачка плотности очень велики  $\Delta \sim 20$  м, если это можно считать слоем

скачка, поскольку величина максимального градиента очень мала  $\left(\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}\right)_{\max} \approx 0,02$ .

Заметна тенденция: при малых значениях градиента плотности воды в слое скачка отклонение велико, а при больших градиентах – совпадение практически полное.

Для точного выяснения вопроса были вычислены величины максимальных градиентов плотности воды для семидесяти гидрологических станций из числа использованных для сравнения с лидарными данными, в основном западного сектора Арктики.

На рис. 4 представлен график распределения этих градиентов плотности по станциям в зависимости от величин отклонений глубин залегания нижней границы слоя скачка плотности воды по лидарным измерениям и гидрологическим станциям. Заметна концентрация небольших отклонений ( $\Delta < 5$  м) в пределах

$\left(\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}\right)_{\max} = 0,15 - 0,55$  (ед/м) – условных единиц плотности на один метр. Резко и обособленно расположены на графике большие отклонения ( $\Delta < 14$  м) при малых

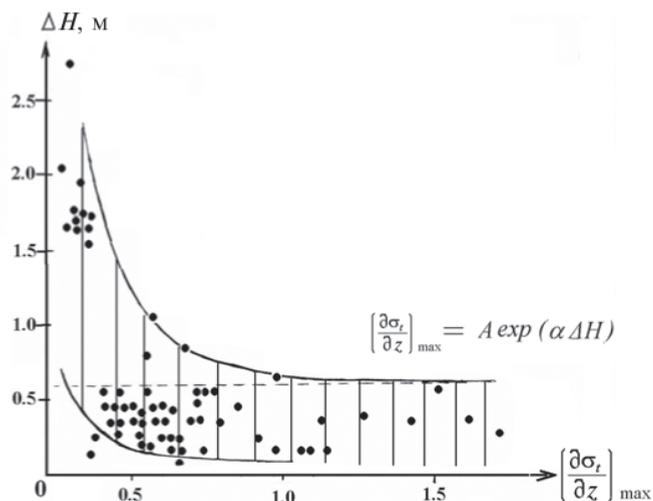


Рис. 4. Распределение отклонений  $\Delta H$  нижней границы слоя скачка плотности воды по контактными измерениям (гидрологические станции) и дистанционного зондирования (лазером с самолета) в зависимости от максимального градиента плотности воды  $\left(\frac{\partial \sigma_t}{\partial z}\right)_{\max}$

значениях градиента  $< 0,15$  (ед/м). Приблизительно зависимость ошибки  $\Delta$  определения по лидару глубины слоя скачка от величины градиента плотности воды можно выразить как

$$\Delta = f\left(1/\frac{\partial \sigma_t}{\partial z}\right) \text{ или } \Delta = K\left(1/\frac{\partial \sigma_e}{\partial z}\right), \text{ где } K = Ae^{-\lambda_2}e^{\lambda_1}.$$

Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – декрименты затухания функции,  $A$  – коэффициент, зависящий от глубины залегания слоя скачка плотности.

В дальнейшем возможно уточнение параметров зависимости  $\Delta$  от  $\frac{\partial \sigma_t}{\partial z}$  при наличии большего числа калибровок, а также новых гидрологических съемок в морях при параллельном дистанционном зондировании верхнего слоя воды арктических морей. В заключение необходимо отметить, что запись профиля нижней границы слоя скачка плотности воды, измеренной с помощью лидара, идет практически непрерывно, с дискретностью 0,5–1 с. Это дает возможность исследовать мезоструктуру и даже микроструктуру этой условной поверхности на больших акваториях, при этом с очень большой скоростью в различных масштабах ее пространственного распределения в арктических морях от микро до синоптических.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бензман В.Ю., Фролов И.Е., Гутниченко В.И. Научно-технический отчет о работе на самолете-лаборатории ИЛ-18, август 1988 г. Фонды ААНИИ. О-3689. 1988. 25 с.
2. Бензман В.Ю. Научно-технический отчет о работе на самолете-лаборатории ИЛ-18, июнь 1989 г. Фонды ААНИИ. О-3690. 1989. 12 с.
3. Бензман В.Ю. Научно-технический отчет о работе на самолете-лаборатории ИЛ-18, август–сентябрь 1989 г. Фонды ААНИИ. О-3691. 1989. 86 с.
4. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 899 с.
5. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 551 с.

6. Benzeman V.Yu. Mezostructure of water density maximal gradients boundary layer relied in arctic seas by lidar sensing data. Rapport Nr. 97. Norsk PolarInstitutt, Oslo, 1997. P. 92–95.

V.YU.BENZEMAN

## MEASURING THE DEPTH OF DENSITY MAXIMAL GRADIENTS LAYER BY LIDAR SENSING DATA

*The paper describes the experiments on laser sounding of the water upper layer in the Arctic seas in August-September, 1988–1989, using the air-borne lidar device. The experiments are based on verifying the idea of I.Ye.Frolov and the author of the present paper on the possibility to register the depth of density maximal gradients layer using the laser sounding from board the air-plane.*

*Key words:* density maximal gradient layer, laser sounding

## СВЯЗЬ МЕЖДУ СПЕКТРОМ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ И АМПЛИТУДОЙ ВАРИАЦИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ТИПА ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

науч. сотр. В.А.УЛЬЕВ, вед. инж. И.В.МОСКВИН

<sup>1</sup> ГНЦ РФ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

Рассмотрены экспериментальные вариации изменения поглощения коротких радиоволн в ионосфере над ст. Диксон во время нескольких явлений возрастания поглощения коротких радиоволн в ионосфере полярных широт (поглощения типа полярной шапки – ППШ). Эти явления ППШ обусловлены потоками солнечных протонов (ПП) различного спектра от очень мягкого (с относительным преобладанием низкоэнергичных протонов) до очень жесткого (с относительным преобладанием высокоэнергичных протонов).

Во время всех ППШ наблюдается спад поглощения в дневные часы, т.е. эффект полуденного восстановления (ПВ), и спад поглощения в ночные часы, т.е. эффект день–ночь вариации (ДНВ). Амплитуды спада поглощения во время ПВ и ДНВ сопоставлены со спектрами ПП. Установлена следующая тенденция: чем мягче спектр, тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ.

**Ключевые слова:** ППШ, спектр потоков солнечных протонов, амплитуды эффектов полуденного восстановления и день–ночь вариации.

### ВВЕДЕНИЕ

После мощных солнечных вспышек в нижнюю ионосферу высоких широт проникают потоки протонов солнечных космических лучей, которые вызывают дополнительную ионизацию, возрастание электронной концентрации и поглощения коротких радиоволн (поглощение типа полярной шапки). Основным прибором, регистрирующим ППШ, является риометр. Риометр измеряет суммарное поглощение во всем столбе ионосферы над пунктом наблюдения. Если ППШ произошло в летний (зимний) период, то вариация поглощения подобна временному ходу изменения потоков солнечных протонов (ПП) с энергией около 10 МэВ (5 МэВ). Если ППШ произошло весной или осенью, то временной ход риометрического поглощения имеет суточную вариацию (день–ночь вариацию ДНВ) с максимумом в дневной период и минимумом в ночной. Эта вариация обусловлена сменой освещенности ионосферы над пунктом наблюдения.

Во время некоторых явлений ППШ на станциях авроральной зоны риометрическое поглощение имеет спад в часы, близкие к местному полдню. Этот спад, называемый эффектом полуденного восстановления (ПВ), обусловлен суточной вариацией жесткости геомагнитного обрезания на авроральных широтах [1]. В представленной работе анализируется связь между амплитудой ПВ (ДНВ) и спектром потоков протонов, вызывающих данное ППШ.

В предшествующих работах эта связь была установлена по данным наблюдений на нескольких риометрах, настроенных на различные частоты [1]. Уста-

новление этой связи по характеру вариации поглощения на одном риометре может иметь важное практическое применение в системе контроля по наземным данным за изменением радиации в атмосфере после солнечных вспышек, так как сеть одночастотных риометров гораздо более обширная, чем многочастотных.

### АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

**Экспериментальные данные.** На рис. 1 (a1, б1, в1, г1) представлены (зачерненные кружки) экспериментальные вариации поглощения на ст. Диксон во время

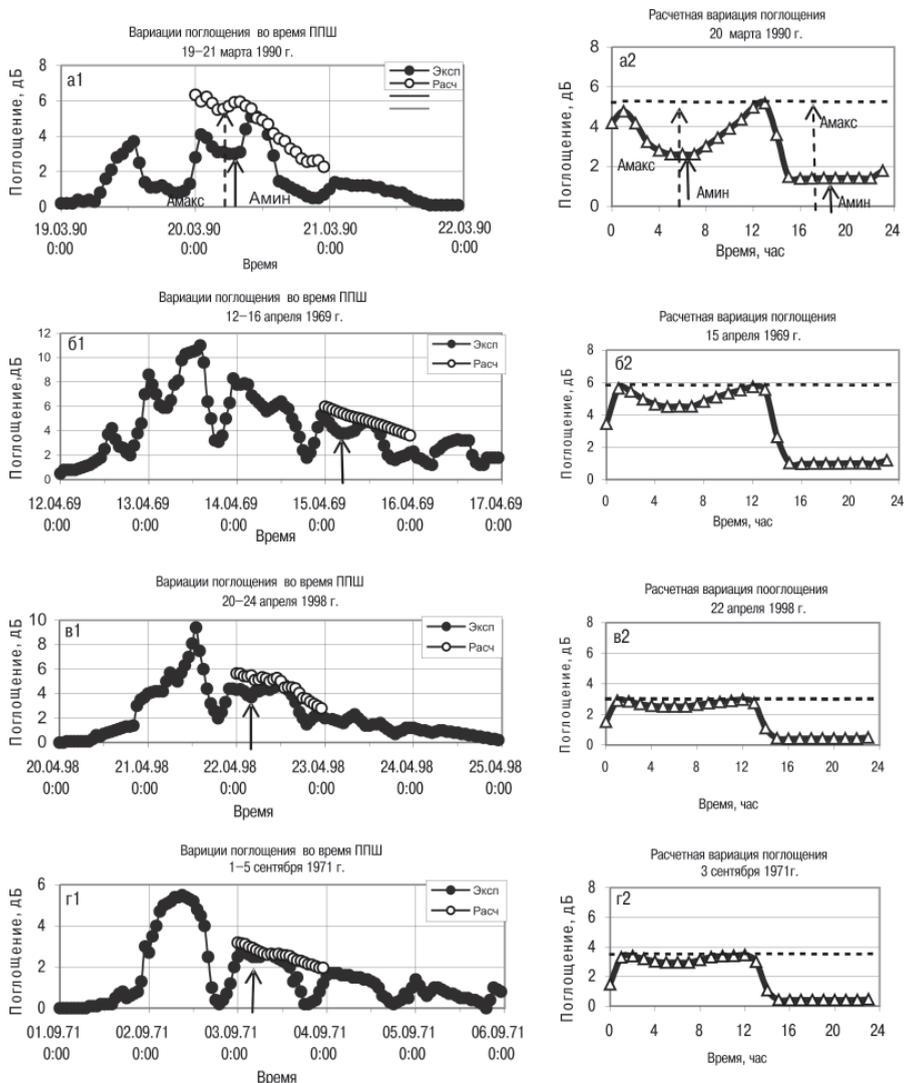


Рис. 1. Вариации поглощения на ст. Диксон во время ППШ

a1, б1, в1, г1 – экспериментальные [•] вариации в течение всего ППШ; a1, б1, в1, г1 – экспериментально-расчетные [o] вариации в течение 1 дня ППШ; a2, б2, в2, г2 – расчетные вариации при наличии ПВ и ДНВ [Δ] в течение 1 дня ППШ; a2, б2, в2, г2 – расчетные вариации при отсутствии ПВ и ДНВ [—] в течение 1 дня ППШ. Стрелками показаны моменты минимального поглощения во время ПВ (сплошная стрелка) и максимального поглощения при отсутствии ПВ (прерывистая стрелка)

4-х явлений ППШ: 19–22 марта 1990 г., 12–16 апреля 1969 г., 20–24 апреля 1998 г. и 1–5 сентября 1971 г. В каждом ППШ выбран день, во время которого в часы, близкие полудню и полночи, наблюдаются соответственно эффекты полуденного восстановления и день–ночь вариации (20 марта 1990 г., 15 апреля 1969 г., 22 апреля 1998 г. и 3 сентября 1971 г.). Кроме того были рассмотрены еще 2 дня ППШ (не приведенные на рис. 1): 18 марта 1989 г. и 30 сентября 1989 г. В течение всех рассматриваемых дней уровень магнитной активности был низким ( $K_p < 3.0$ ). В табл. 1 приведена характеристика спектра потоков протонов (ПП), зарегистрированных вне магнитосферы в 12 час UT каждых выбранных суток: показатель степенной функции ( $\gamma$ ) интегрального энергетического спектра ПП вида  $J(> E) = KE^{-\gamma}$  в диапазоне энергий, близких к 10 МэВ (5–50 МэВ).

Амплитуды эффектов полуденного восстановления (ПВ) и день–ночь вариации (ДНВ) рассчитывались по следующим формулам:

$$M_{\text{ПВ}} = 1 - A_{\text{мин}}/A_{\text{макс}}, \quad (1)$$

$$M_{\text{ДНВ}} = 1 - A_{\text{мин}}/A_{\text{макс}}, \quad (2)$$

где  $A_{\text{мин}}$  – поглощение в минимуме ПВ или ДНВ,  $A_{\text{макс}}$  – предполагаемое поглощение при отсутствии ПВ или ДНВ.

Для получения  $A_{\text{макс}}$  были проведены модельные расчеты поглощения на станции Диксон в рассматриваемые сутки при условии отсутствия в этот день эффектов ПВ и ДНВ, т.е. рассчитана так называемая 0-вариация поглощения (см. рис. 1 ( $a1, b1, c1, d1$ )). Для этого в модели в каждый час суток величины жесткости геомагнитного обреза приняты равными 0, а величины коэффициентов рекомбинации – равными дневным значениям. Интенсивность и спектр ПП в эти дни соответствовали реальным значениям. Далее из точки минимума эффекта ПВ (около 05 UT для ст. Диксон) или ДНВ (около 19 UT для ст. Диксон) экспериментальной вариации поглощения восстанавливался перпендикуляр до пересечения с расчетной 0-вариацией. Ордината точки пересечения рассматривалась как величина  $A_{\text{макс}}$ . Определив  $A_{\text{макс}}$  и  $A_{\text{мин}}$ , по формулам (1) и (2) были вычислены  $M_{\text{ПВ}}$  и  $M_{\text{ДНВ}}$ .

Эти экспериментально-расчетные значения  $M_{\text{ПВ}}$  и  $M_{\text{ДНВ}}$  в каждый из рассматриваемых дней ППШ указаны в табл. 1 (3-й и 4-й столбцы) и представлены на рис. 2 в зависимости от  $\gamma$ . Очевидна следующая тенденция: чем мягче спектр ПП (больше  $\gamma$ ), тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ. Аналитические выражения этой тенденции следующие ( $R^2$  – достоверность аппроксимации):

$$M_{\text{ПВ}} = -0,1\gamma + 0,07, \quad R^2 = 0,6; \quad (3)$$

$$M_{\text{ДНВ}} = 0,02\gamma + 0,08, \quad R^2 = 0,3. \quad (4)$$

Таблица 1

Значения спектра ПП,  $M_{\text{ПВ}}$  и  $M_{\text{ДНВ}}$  на ст. Диксон во время ППШ

Дата	Показатель степен. спектра	Амплитуды эффектов ПВ и ДНВ			
		Эксп.-расчетные		Расчетные	
	$\gamma$	$M_{\text{ПВ}}$	$M_{\text{ДНВ}}$	$M_{\text{ПВ}}$	$M_{\text{ДНВ}}$
	12 UT	05 UT	19UT	05 UT	19UT
15.04.1969	2	0,24	0,58	0,23	0,83
22.04.1998	1,6	0,18	0,58	0,16	0,86
20.03.1990	3,7	0,48	0,79	0,44	0,70
03.09.1971	1	0,09	0,91	0,16	0,88
18.03.1989	2,7	0,29	0,71	0,29	0,80
30.09.1989	0,89	0,30	0,83	0,09	0,88

**Расчетные данные.** Для более точного определения формул связи между спектром ПП и амплитудой ПВ и ДНВ проведены модельные расчеты поглощения в указанные дни ППШ при следующих условиях. (1) В каждый расчетный час вводились одинаковые ПП, с интенсивностью и спектром, реально зарегистрированными в 12 час UT рассматриваемых суток. Таким образом исключалось влияние на амплитуду ПВ и ДНВ изменения интенсивности и спектра ПП в течение суток в реальных явлениях ППШ. (2) В каждый из выбранных дней вводились одинаковые атмосферные параметры, соответствующие 20 марта 1990 г. Таким образом исключалось влияние сезонного изменения параметров атмосферы на амплитуду ПВ и ДНВ. Расчеты производились в двух вариантах: с имитацией эффектов ПВ и ДНВ (в течение суток изменялись значения жесткости геомагнитного обреза и коэффициента рекомбинации) и без этих эффектов по методике получения 0-вариации (см. выше). На рис. 1 (а2, б2, в2, г2) эти варианты представлены соответственно непрерывной и штриховой линиями. Для каждой расчетной вариации определены  $A_{\text{мин}}$  и  $A_{\text{макс}}$  и по формулам (2) и (3) вычислены амплитуды эффектов полуденного восстановления и день–ночь вариации (см. табл. 1).

На рис. 2 представлены графики зависимости расчетных величин амплитуды ПВ и ДНВ от показателя степенного энергетического спектра ПП ( $\gamma$ ) (рис. 2 б)

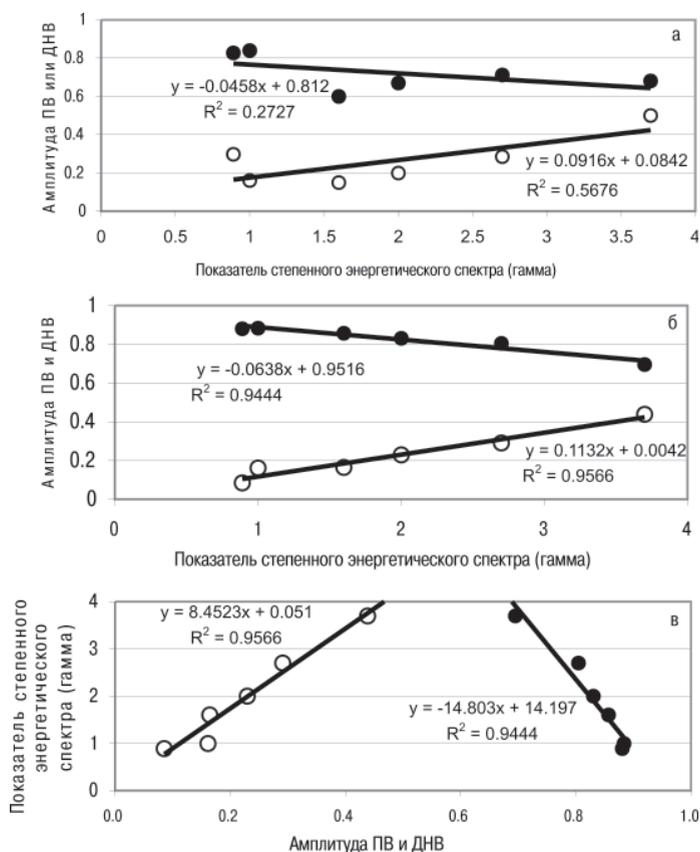


Рис. 2. Связь между спектром потоков протонов и амплитудой эффектов ПВ и ДНВ на станции Диксон: а – зависимость  $M_{\text{пв}}$  [o] и  $M_{\text{днв}}$  [•] от  $\gamma$  по экспериментальным данным; б – зависимость  $M_{\text{пв}}$  [o] и  $M_{\text{днв}}$  [•] от  $\gamma$  по расчетным данным; в – зависимость  $\gamma$  от  $M_{\text{пв}}$  [o] и  $M_{\text{днв}}$  [•] по расчетным данным

и зависимости  $\gamma$  от амплитуды ПВ и ДНВ (рис. 2 в). Очевидны следующие тенденции:

- чем мягче спектр (больше  $\gamma$ ), тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ и наоборот;
- чем больше (меньше) амплитуда ПВ (ДНВ), тем больше  $\gamma$ , т.е. мягче спектр ПП.

Аналитические формулы связывающие  $\gamma$  и  $M_{\text{пв}}$  и  $M_{\text{днв}}$  имеют следующий вид ( $R^2$  – достоверность аппроксимации):

$$M_{\text{пв}} = 0,11\gamma, R^2 = 0,96 \quad (5)$$

$$M_{\text{днв}} = -0,06\gamma + 0,95, R^2 = 0,94 \quad (6)$$

$$\gamma = 8,45M_{\text{пв}} + 0,05, R^2 = 0,96 \quad (7)$$

$$\gamma = -14,82M_{\text{днв}} + 14,2, R^2 = 0,94 \quad (8)$$

Аналитические формулы (5)–(8), полученные по расчетным данным, имеют большую достоверность, чем по экспериментальным (формулы 3, 4). Это связано с выбором двух указанных условий при проведении модельных расчетов поглощения.

**Физическое обоснование.** Для выявления причины влияния спектра ПП на амплитуду ПВ и ДНВ проведены модельные расчеты высотно-временной вариации скорости ионизации ( $Q$ ), электронной концентрации ( $Ne$ ) и поглощения ( $A$ ) для двух дней ППШ, которые были обусловлены потоками протонов с очень мягким и очень жестким спектром (соответственно 20 марта 1990 г. и 3 сентября 1971 г.). На рис. 3 ( $a1$ ,  $b1$ ,  $v1$ ) представлены вариации  $Q$ ,  $Ne$  и  $A$  в период 20 марта 1990 г., а на рис. 3 ( $a2$ ,  $b2$ ,  $v2$ ) в период 3 сентября 1971 г.

Сопоставление изменения  $Q$ ,  $Ne$  и  $A$  в эти сутки показывает следующее. Скорость ионизации при мягком спектре (рис. 3  $a1$ ) возрастает в основном на больших высотах (выше 70 км), а при жестком (рис. 3  $a2$ ) – на малых (в диапазоне 50–70 км). В том и другом случае в полуденные часы наблюдается уменьшение  $Q$  на больших высотах, которое очень существенно при мягком спектре (рис. 3  $a1$ ) и несущественно при жестком (рис. 3  $a2$ ).

Электронная концентрация (рис. 3  $b1$  и 3  $b2$ ) возрастает в обоих случаях на больших высотах. Однако при жестком спектре (рис. 3  $b2$ ) наблюдается также заметное возрастание электронной концентрации в дневной период на малых высотах.

Поглощение в дневной период возрастает при мягком спектре на больших высотах с глубоким провалом в полуденные часы (рис. 3  $v1$ ), а при жестком спектре (рис. 3  $v2$ ) – возрастает на малых высотах с незначительным уменьшением в полуденные часы. В ночной период при мягком спектре наблюдается поглощение на малых высотах, а при жестком спектре поглощение в ночной период практически отсутствует.

Таким образом, с учетом данных рис. 1 и 3 можно следующим образом объяснить зависимость амплитуды ПВ и ДНВ от спектра ПП. Амплитуда ПВ и ДНВ зависит от соотношения в спектре низкоэнергичных и высокоэнергичных ПП (ППнэ и ППвэ). В дневные часы во время ПВ возрастает ЖГО и из процесса ионизации исключаются ППнэ. Если спектр ПП мягкий (жесткий), т.е. относительно много (мало) ППнэ, то исключение ППнэ в дневной период существенно (не существенно) уменьшает  $Q$ , а следовательно существенно (не существенно) уменьшаются  $Ne$  и  $A$ . Поэтому при мягком спектре потоков протонов спад поглощения в полуденные часы (амплитуда ПВ) больше, чем при жестком.

В ночной период во время ДНВ возрастает скорость рекомбинационных процессов, особенно на малых высотах (50–70 км), куда проникают ППвэ и не проникают ППнэ. Поэтому в ночных условиях ППвэ вызывают незначительное увеличение электронной концентрации и вносят малый вклад в общее поглоще-

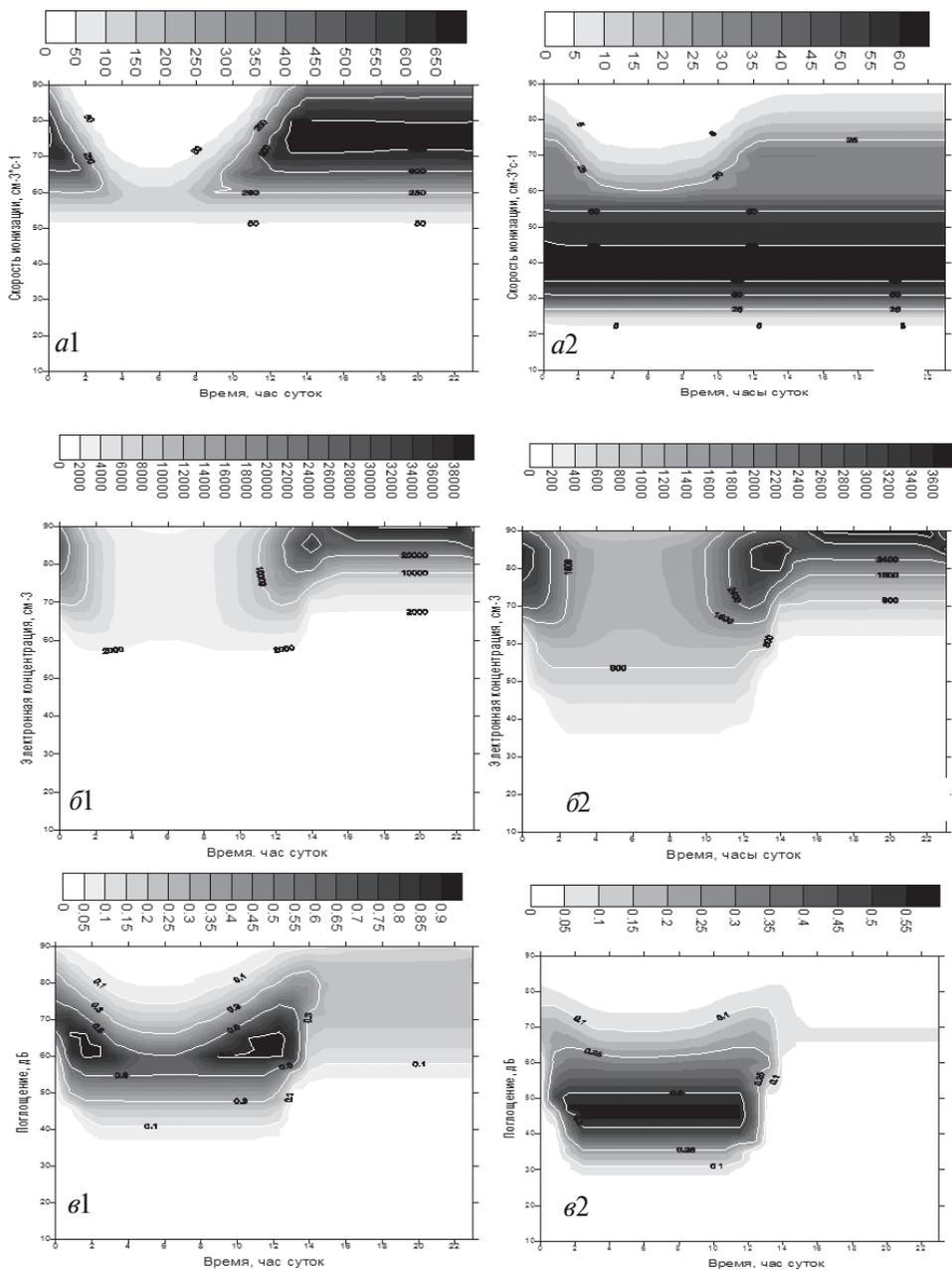


Рис. 3. Высотно-временные вариации скорости ионизации ( $Q$ ), электронной концентрации ( $N_e$ ) и поглощения ( $A$ ) во время дней ППШ 20 марта 1990 г. (*a1*, *б1*, *в1*), и 3 сентября 1971 г. (*a2*, *б2*, *в2*)

ние. Если спектр ПП жесткий (относительно много ППвэ), тогда исключение ППвэ из процесса дополнительного образования электронов в ночных условиях приведет к существенному уменьшению ночного поглощения и к большой разнице поглощения в дневные часы и в полночь, т.е. к большой амплитуде ДНВ.

Если спектр ПП мягкий (относительно мало ППвэ), тогда разница между дневным и ночным поглощением незначительна, т.е. амплитуда ДНВ малая.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных вариаций поглощения и расчетных вариаций скорости ионизации, электронной концентрации и поглощения во время нескольких ППШ с эффектами ПВ и ДНВ на ст. Диксон позволяет сделать следующие выводы.

1. Амплитуда ПВ выше во время ППШ, обусловленных потоками протонов с более мягким спектром, чем с более жестким; причина этой тенденции — в существенном уменьшении скорости ионизации вследствие повышения жесткости геомагнитного обрезания в дневные часы и исключения из процесса ионизации потоков протонов малых энергий.

2. Амплитуда ДНВ выше во время ППШ, обусловленных потоками протонов с более жестким спектром, чем с более мягким; причина этой тенденции — в существенном уменьшении электронной концентрации вследствие возрастания скорости рекомбинации в ночные часы на малых высотах и исключения из процесса образования электронов потоков протонов больших энергий, проникающих на малые высоты.

3. Полученные расчетные формулы связи спектра потоков протонов и амплитуды ПВ (или ДНВ) позволяют определить характер спектра ПП по данным вариации поглощения только одного риометра.

Таким образом, одночастотные риометрические наблюдения за явлениями ППШ могут дать важный параметр (спектр ионизирующего ПП) для проведения модельных расчетов распределения электронной концентрации и поглощения в ионосфере высоких широт. С другой стороны, амплитуды ПВ и ДНВ можно рассматривать как показатели радиационной активности ПП после мощной солнечной вспышки. С этой точки зрения риометрические наблюдения могут быть использованы как наземное звено в системе контроля радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 223 с.

V.A.ULYEV, I.V.MOSKVIN

### ON CONNECTION BETWEEN SOLAR PROTON SPECTRUM AND AMPLITUDES OF ABSORPTION VARIATIONS DURING POLAR CAP ABSORPTION

*Experimental variations of absorption on the Dickson station are considered during some PCA events which are caused by solar proton fluxes of a various spectrum from very soft to very rigid. During all PCA absorption recovery at noon, i.e. effect of midday recovery (MDR), and absorption recovery at night, i.e. effect day-night variation (DNV) are observed. Amplitudes of recoveries of absorption during MDR and DNV are compared with proton spectra. The following tendency is established: the more softly the spectrum, the more amplitude MDR and less amplitude DMV.*

*Computational modelling experiments are made. Calculations have confirmed the revealed experimental dependence of amplitude MDR and DNV from proton spectrum. The physical explanation of this dependence is presented. Formulas of calculation of a proton spectrum from amplitude MDR and DNV are received. The revealed connections between a solar proton spectrum and amplitude MDR and DNV allow to use variations of absorption during PCA for an estimation of a solar proton spectrum in interplanetary space.*

*Keywords:* PCA, a spectrum of solar protons, amplitudes of midday recovery and day-night variation effects.

## ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КАТЕГОРИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА НА ОСНОВЕ ДИСТРИБУТИВНОГО ПОДХОДА

канд. техн. наук В.Г.ДМИТРИЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: v\_dmitriev@aari.nw.ru

*В статье рассматривается возможность вероятностной интерпретации и оценки достоверности прогностических направлений ветра на основе дистрибутивного подхода. Критерий оценки представляет собой вероятностную характеристику, позволяющую использовать ее в оптимизационных методах принятия решений на основе прогностических данных. Дистрибутивный подход дает возможность перевода категорической формы прогноза в вероятностный вид, при этом создаются условия для наглядного представления и визуализации вероятных направлений ветра для данного категорического прогноза. Предложенный подход предоставляет широкие возможности для детального анализа точности индивидуальных прогнозов для различных условий. Показано, что для целого ряда индивидуальных прогнозов направления ветра распределение фактических данных мультимодально. Для аппроксимации закона распределения использовано модифицированное распределение Мизеса. Все расчеты выполнены на основе фактических данных.*

*Ключевые слова:* категорический прогноз, вероятностная интерпретация, направление ветра, дистрибутивный подход.

### ВВЕДЕНИЕ

Вероятностная интерпретация категорических прогнозов представляет определенный интерес как для принятия управленческих решений, так и для оценки достоверности прогностических значений.

«Классический» способ вероятностной интерпретации категорических прогнозов основан на концепции «статистики результатов модели Model Output Statistics (MOS)» и состоит в построении матриц сопряженности для прогностических и фактических градаций параметров погоды, что отвечает традиционной форме составления прогнозов [1, 9].

Известно, что в соответствии с действующим в настоящее время Наставлением по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения [7] «при оценке оправдываемости прогноза ветра направление ветра не оценивают». В то же время оценка достоверности прогностических направлений ветра чрезвычайно важна для планирования действий, особенно в случаях аварийных ситуаций, например связанных с распространением опасных летучих веществ. Кроме того, анализ качества прогнозов направлений ветра позволил бы критически отнестись к применяемым прогностическим методикам.

Критерии оценки прогнозов направления ветра, приведенные в [4, 6], а именно: средняя абсолютная ошибка, систематическая ошибка и оправдываемость – с практической точки зрения не достаточно информативны, поскольку не учитывают характер распределения фактического направления ветра при известных прогностических данных.

С теоретической точки зрения направление ветра как величина не представляет исключения в смысле вероятностно-статистической интерпретации (если рассматривать условные распределения при выбранных ограничениях на скорость).

Как будет показано в настоящей работе, дистрибутивный подход к вероятностной интерпретации категорических прогнозов, интенсивно развивающийся в последние десятилетия [11], предоставляет адекватный инструментарий для применения оптимизационных методов принятия решений на основе прогноза и оценивания достоверности как индивидуальных прогнозов направлений ветра, так и прогнозов в целом.

Приведенные ниже результаты расчетов и выводы основаны на фактических данных и предназначены для иллюстрации и подтверждения правомочности применения дистрибутивного подхода к оценке индивидуальных категорических прогнозов направления ветра (по пункту).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем исходить из того, что выполняется регулярная процедура составления прогнозов направлений ветра, причем число различных вариантов прогноза ограничено и фиксировано. Это предположение полностью соответствует порядку составления прогнозов погоды общего назначения [7].

Введем некоторые обозначения. Пусть  $P_i = [r, s]$  –  $i$ -ая фаза многофазового прогноза направления ветра (в терминологии [8]) для фиксированного района и срока действия прогноза,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – число различных прогностических фаз.

Обозначим через  $\varphi_i^j$  –  $j$ -ое наблюдение фактического направления ветра при  $i$ -ом прогнозе. Совокупность  $\Phi_i = \{\varphi_i^j\}_{j=1,2,\dots,J_i}$  представляет собой множество фактических направлений ветра, наблюдаемых для всех случаев ( $J_i$ ) составления прогноза  $P_i$ . Очевидно, что множество  $\Phi_i$  полностью характеризует точностные свойства прогноза  $P_i$ .

Под задачей вероятностной интерпретации и оценки успешности индивидуального прогноза  $P_i$  в данной работе будет пониматься задача оценки вероятности попадания  $p_i$  фактических направлений ветра в прогностический интервал  $P_i$ . Такая оценка, основанная на архивных данных и представляющая собой апостериорную оценку точности прогноза  $P_i$ , может, в предположении устойчивости внешних условий (климатической устойчивости, неизменности методики прогноза и т.п.), быть принята и в качестве априорной оценки успешности прогноза  $P_i$ . Заметим, что предложенная идеология оценки прогнозов направлений ветра в основном соответствует идеологии проверки качества прогнозов Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим прогнозам Росгидромета.

Решение поставленной задачи позволяет получить точностную характеристику конкретного прогноза, поступающего потребителю для принятия управленческого решения. Вероятностная природа показателя успешности обеспечивает потребителю возможность применения алгоритмов статистической оптимизации при выборе решения.

При формировании множеств фактических наблюдений возможна и желательна, а в ряде случаев и необходима детализация по дополнительным критериям (например, по сезонам, срокам наблюдений, характеру синоптических ситуаций и т.п.). В первую очередь следует учитывать скорость ветра.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

При традиционном подходе к оценке успешности (оправдываемости) прогнозов в качестве приближенного значения величины  $p_i$  принимают повторяемость события  $\varphi_i^j \in P_i$ . При этом, как правило, рассчитывают усредненную повто-

ряемость по всем индивидуальным прогнозам при некоторых дополнительных условиях на идентификацию события  $\varphi_i^j \in P_i$  и ограничениях по периоду осреднения (см. [7]). Однако, как хорошо известно, повторяемость (оправдываемость) не содержит информации о величине погрешности прогноза и представляет собой лишь некоторую качественную оценку, ориентированную на формирование субъективного доверия к прогнозу.

Применение дистрибутивного подхода к оценке величины  $p_i$  состоит в сравнении функции распределения  $F_i$  случайной величины  $\varphi_i$  (фактических значений направления ветра для индивидуального прогноза  $P_i$ ) как наиболее информативной характеристики точностных свойств рассматриваемого индивидуального прогноза с функцией распределения прогностических данных. При наличии плотностей распределений сравнение может выполняться между плотностями (обозначим их  $f_\varphi$  и  $f_T$ , соответственно). По сути, функция  $F_i$  представляет собой непрерывный аналог строки матрицы сопряженности.

Далее для упрощения записей индекс  $i$  будет опускаться во всех случаях, не вызывающих неоднозначного толкования.

Точнее говоря, мерой оценки прогнозов в соответствии с концепцией критерия согласия А.Н.Колмогорова может служить функционал, характеризующий близость функций распределений. Как вариант, качество индивидуального прогноза может быть оценено величиной меры близости между плотностями распределений фактических наблюдений и декларированного категорического прогноза вне прогностического интервала

$$\rho(f_\varphi, f_T) = \int_{x \in P} |f_\varphi(x) - f_T(x)| dx. \quad (1)$$

Такой подход соответствует представлениям о предсказуемости гидрометеорологических величин как о различии априорных и апостериорных распределений [10].

Обычно предполагается, что прогностические данные в случае интервального категорического прогноза  $P = [r, s]$  равномерно распределены внутри прогностического интервала, следовательно, соответствующая плотность  $f_T(x)$  имеет вид:

$$f_T(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [r, s], \\ 1/(s-r), & x \in [r, s]. \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что выражение (1) для функций  $f_T(x)$  и (2) приобретает вид:

$$\rho(f_\varphi, f_T) = 1 - p,$$

где

$$p = \int_r^s f_\varphi(x) dx.$$

Другими словами, успешность категорического прогноза полностью определяется вероятностью попадания фактических данных в прогностический интервал (условной вероятностью попадания фактических данных в означенный интервал при условии данного прогноза).

Для описания распределений направлений ветра обычно применяют распределение Мизеса [5], плотность которого имеет вид:

$$f_M(\theta) = \frac{1}{2\pi J_0(k)} \exp[k \cos(\theta - \theta_0)],$$

где  $J_0$  – функция Бесселя,  $k$  – параметр,  $\theta_0$  – мода,  $\theta \in [0, 2\pi]$ .

В настоящей работе для адекватного описания острых пиков была использована модификация распределения Мизеса:

$$f(\theta) = \frac{1}{\mu} \exp[k \cos(\theta - \theta_0)] \exp\{\exp[k \cos(\theta - \theta_0)]\},$$

где  $\mu$  – нормирующий множитель.

Учитывая то обстоятельство, что условные распределения фактических направлений ветра могут быть многомодальными (что получило экспериментальное подтверждение, см. ниже), для описания искомого распределения  $F$  в настоящей работе применялось распределение с плотностью  $f_\Phi$  как взвешенная сумма локальных распределений:

$$f_\Phi(\theta) = \sum_{s=1}^S g_s f_s(\theta). \quad (3)$$

Здесь  $S$  – число мод распределения,  $f_s$  –  $s$ -ое модифицированное распределение Мизеса,  $s = 1, 2, \dots, S$ ,  $g_s$  – весовой коэффициент ( $g_s \geq 0$ ,  $\sum g_s = 1$ ).

Функция (3), параметры которой определены на основе множества  $\Phi$  фактических наблюдений для прогноза  $P$ , представляет собой вероятностную интерпретацию категорической формы этого прогноза. Другими словами, индивидуальному категорическому прогнозу  $P$  однозначно сопоставлено условное вероятностное распределение фактических значений направления ветра, которые могут иметь место при данном прогнозе. Тем самым объективизирована неопределенность, присущая категорическому прогнозу, что, вообще говоря, необходимо потребителю для принятия решений в случае зависимости результата от будущего состояния среды.

Таким образом, для прогноза направления ветра  $P = [\theta_1, \theta_2]$  искомая оценка успешности  $p$  определяется по формуле

$$p = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f_\Phi(\theta) d\theta. \quad (4)$$

Очевидно, что величина  $p$  неотрицательна и не превышает единицы, при этом чем ближе значение  $p$  к единице, тем точнее прогноз. Более подробно основные свойства показателя успешности  $p$  описаны в работе [3].

Для расчета успешности  $p$  индивидуального прогноза  $P$  необходимо найти оценки значений параметра  $k_s$  для каждого слагаемого в формуле (3), что может быть выполнено обычными методами на основе выборки  $\Phi$ .

Заметим, что если ввести в рассмотрение случайную величину (индикатор индивидуального прогноза)

$$\eta = \begin{cases} 1, & \varphi \in P, \\ 0, & \varphi \notin P; \end{cases}$$

то, поскольку математическое ожидание  $\bar{\eta}$  вычисляется по формуле

$$\bar{\eta} = \int_0^{2\pi} x f_\Phi(x) dx,$$

имеет место соотношение  $\bar{\eta} = p$ .

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для демонстрации возможностей применения формулы (4) к оценке прогнозов направления ветра были использованы суточные прогнозы по г. Мурманску и фактические наблюдения за период с 1 января 2005 г. по 30 сентября 2007 г.

Выбор фактических направлений ветра для индивидуальных прогнозов осуществлялся с учетом дополнительного ограничения на прогностическую скорость ветра, а именно в случаях прогноза «слабого» ветра (0–9 м/с) и «сильного» ветра (5–15 м/с).

Расчеты проводились для ежесуточных прогнозов на день и на ночь, в целом по всему периоду и отдельно для холодных и теплых сезонов (октябрь–март («зима»), апрель–сентябрь («лето»)).

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТОВ

Алгоритм расчетов статистических характеристик прогнозов и фактических данных состоял в следующем: из массива прогностических данных выбирались все случаи одинаковых прогнозов, и в случае, когда выборка имела репрезентативный объем, из массива фактических данных выбирались соответствующие срочные наблюдения. Таким образом, для ряда индивидуальных прогнозов формировались выборки фактических направлений ветра, имевших место при этих прогнозах (фактические данные). Прогнозы, встречающиеся достаточно редко, статистическому анализу не подвергались.

Число и значения мод определялись эмпирически на основе анализа соответствующих гистограмм, причем первые приближения мод определялись на основе взвешенных средних разрядов с наибольшими показателями частот. Для каждой моды формировалась локальная выборка, после чего стандартными методами максимального правдоподобия вычислялись значения параметра  $k_s$  и мод  $\theta_0^s$ . Весовые коэффициенты  $g_s$  также определялись на основе метода максимального правдоподобия с учетом вклада локальных выборок в частотную характеристику всей выборки.

Полученные значения параметров подставлялись в формулу (3), проводился анализ соответствия модельной плотности эмпирическому распределению по критерию  $\chi^2$  и, в случае обеспечения 5-процентного уровня, по формуле (4) вычислялась вероятность  $p$  попадания фактических значений в прогнозируемый интервал (расширенный на 22,5° в обе стороны от прогностических значений). Одновременно подсчитывалась повторяемость  $q$  таких попаданий по выборочным фактическим данным.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Всего было проведено более 80 экспериментальных расчетов по определению распределений  $f_\phi(\theta)$  для различных вариантов прогнозов. Результаты расчетов по срочным наблюдениям приведены в таблице. Все полученные результаты имеют исключительно экспериментальный, демонстрационный характер.

Здесь  $S$  – сезон,  $T$  – срок действия прогноза,  $W$  – ограничения на прогностическую скорость ветра (границы градаций, м/с),  $P$  – прогноз направления ветра (границы градаций, град.),  $H$  – срок наблюдения фактических значений,  $N$  – объем выборки,  $m$  – число мод,  $k_s$  – значения коэффициентов для локальных распределений (слагаемых формулы (3)),  $\chi^2$  – величина критерия согласия,  $p$  – расчетная вероятность попадания фактических данных в прогностический интервал,  $q$  – повторяемость попадания фактических данных в прогностический интервал.

На рис. 1 приводятся типичные примеры аппроксимации эмпирического распределения фактических данных распределением с плотностью (3). Рисунок показывает разнообразие уровня успешности разных индивидуальных прогнозов.

Рис. 2 демонстрирует трехмерное изображение распределения, представленного на рис. 1 а. Видно (см. также таблицу), что условное распределение фактических значений ветра при данном прогнозе может иметь несколько мод.

Рис. 1–2 демонстрируют вероятностную интерпретацию категорических прогнозов направлений ветра.

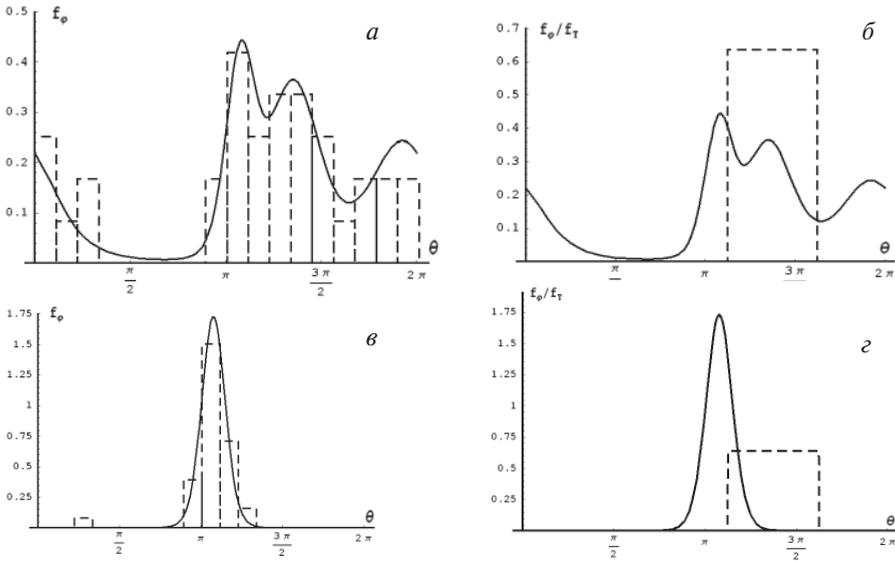


Рис. 1. Пример аппроксимации эмпирического распределения субсеквентных данных распределением с плотностью (2):

*a* – график плотности распределения фактических данных и гистограмма повторяемостей для прогноза 225–270° (день, лето, срок наблюдения – 18 ч,  $p = 0,59$ ); *б* – график плотности распределения фактических данных и плотность распределения прогностических данных для прогноза 225–270° (день, лето, срок наблюдения – 18 ч,  $p = 0,59$ ); *в* – график плотности распределения фактических данных и гистограмма повторяемостей для прогноза 225–270° (ночь, зима, срок наблюдения – 18 ч,  $p = 0,26$ ); *г* – график плотности распределения фактических данных и плотность распределения прогностических данных для прогноза 225–270° (ночь, зима, срок наблюдения – 18 ч,  $p = 0,26$ ). Ограничение на прогноз скорости ветра: 5–15 м/с

На рис. 3 показан пример рассчитанной на основе выражения (3) «розы» наиболее вероятных направлений ветра, которые могут иметь место при данном прогнозе. Длина луча пропорциональна вероятности направления ветра. Такой способ отображения вероятностной интерпретации прогноза направлений ветра может быть полезен, например, для расчетных оценок последствий распределения выброса опасных летучих веществ и выбора направлений для планирования защитных мер в аварийной ситуации на основе текущего прогноза.

Как отмечено в работе [2], функция (3) может быть трансформирована в плотность распределения функционально зависимо от направления ветра технико-экономического параметра  $E = G(\varphi)$ , благодаря чему потребитель на основании конкретного индивидуального прогноза может оперировать более привычными для себя

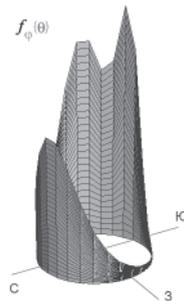


Рис. 2. Трехмерное изображение плотности распределения, представленной на рис. 1 *a*

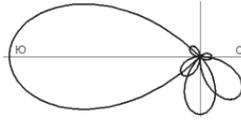


Рис. 3. Пример «розы» наиболее вероятных направлений ветра, которые могут иметь место при прогнозе 270–315° (лето, день,  $p = 0,59$ ).

Длина лепестка пропорциональна вероятности попадания направления ветра в секторы величины  $\pi/4$  с центрами  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$

терминами, получая в распоряжение плотность распределения параметра  $E$  в зависимости от распределения направлений ветра в условиях имеющегося прогноза:

$$f_E(\varphi) = f_\lambda(\lambda(\varphi))|\lambda'(\varphi)|,$$

где  $\lambda$  – функция, обратная к дифференцируемой функции  $G$  (которая здесь для простоты считается монотонной).

Рис. 4 показывает соответствие теоретически вычисленных вероятностей и соответствующих эмпирических повторяемостей осуществления прогнозов. Данные графика демонстрируют принципиальную согласованность оценок. В то же время видно, что вероятности в ряде случаев отличаются от повторяемостей, что вполне понятно, поскольку повторяемость, как уже было сказано, не учитывает величину ошибки прогноза.

Дистрибутивный подход позволяет провести анализ влияния сезонного/суточного фактора на точность прогноза.

Так, рис. 5 показывает значения условных вероятностей осуществления различных вариантов прогнозов направления ветра для холодного и теплого сезонов года (по всем срокам наблюдений). Рисунок показывает, что в ряде случаев успешности прогнозов существенно зависят от сезона.

На рис. 6 представлено сравнение вероятностей осуществления различных вариантов прогнозов направления ветра для прогнозов на день и на ночь (безотносительно к срокам и сезонам). Рисунок показывает, что для 10 из 12 вариантов прогнозов дневные прогнозы успешнее прогнозов на ночь (на 3,4–107,7 %). Так, же видно, что прогнозы направлений при условии прогнозирования «слабых» ветров (варианты 1–4) значительно менее успешны прогнозов направлений при прогнозе «сильного» ветра.

На основе дистрибутивного подхода можно также оценить влияние срока наблюдения на точность прогностических данных (рис. 7). Представленный график показывает, что внутри срока действия прогноза точность оценки направления ветра может сильно варьироваться.

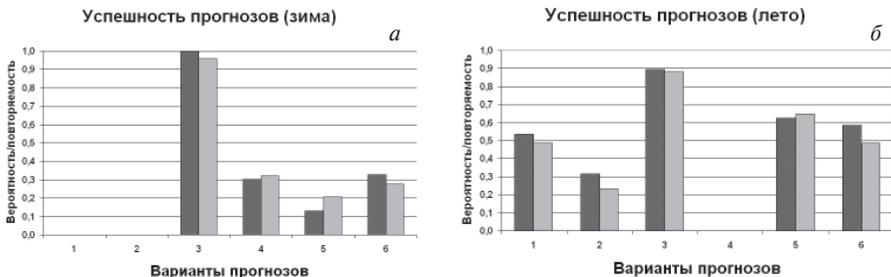


Рис. 4. Примеры соответствия теоретически вычисленных вероятностей (левые столбцы) и соответствующих эмпирических повторяемостей (правые столбцы) осуществления прогнозов. Срок наблюдения – 12 ч. Варианты прогнозов по направлению ветра: 1 – 45–90°, 2 – 90–135°, 3 – 180–225°, 4 – 225–225°, 5 – 225–270°, 6 – 270–315°. Ограничение на прогноз скорости ветра – 5–15 м/с

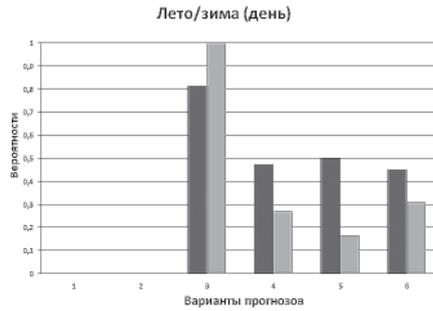


Рис. 5. Сравнение вероятностей осуществления различных вариантов прогнозов направления ветра для прогнозов на день (правые столбцы – прогноз для зимы, левые столбцы – прогноз для лета) безотносительно к срокам

Варианты прогнозов по направлению ветра: 3 – 180–225°, 4 – 225–225°, 5 – 225–270°, 6 – 270–315°. Ограничение на прогноз скорости ветра – 5–15 м/с

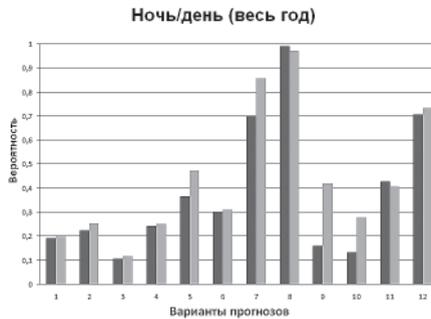


Рис. 6. Сравнение вероятностей осуществления различных вариантов прогнозов направления ветра для прогнозов на день (правые столбцы) и на ночь (левые столбцы) безотносительно к срокам и сезонам

Варианты прогнозов по направлению ветра: 1 – 0–0°, 2 – 45–90°, 3 – 225–225°, 4 – 225–270°, 5 – 45–90°, 6 – 90–135°, 7 – 135–180°, 8 – 180–225°, 9 – 225–225°, 10 – 225–270°, 11 – 270–315°, 12 – 315–360°. Ограничения на прогностическую скорость: для вариантов 1–4 – 0–9 м/с, для вариантов 5–12 – 5–15 м/с

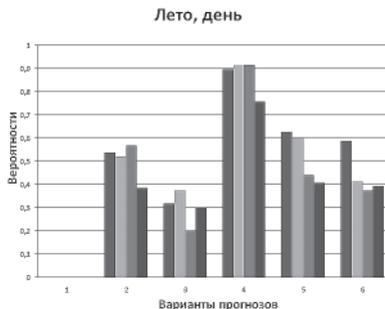


Рис. 7. Сравнение вероятностей осуществления различных вариантов прогнозов направления ветра

Столбцы для каждого варианта прогноза соответствуют срокам наблюдения 12, 15, 18 и 21 ч слева направо). Варианты прогнозов: 2 – 90–135°, 3 – 180–225°, 4 – 225–225°, 5 – 225–270°, 6 – 270–315°. Ограничение на прогноз скорости ветра – 5–15 м/с

## ОЦЕНКА ПРОГНОЗА В ЦЕЛОМ

Рассматривая прогноз в целом как вероятностную смесь  $n$  индивидуальных прогнозов, компоненты которой (фазы прогноза) встречаются с вероятностями  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , успешность (оправдываемость) прогноза в целом можно определить как

$$Q = M \sum_{i=1}^n b_i \eta_i = \sum_{i=1}^n b_i p_i,$$

где  $M$  – символ математического ожидания,  $\eta_i$  – индикатор  $i$ -го индивидуального прогноза,  $p_i$  – успешность  $i$ -го индивидуального прогноза. Заметим, что величина  $Q$ , в целом отвечая традиционным определениям понятия «оправдываемости» прогнозов [7], учитывает частоту появления прогностической фазы (другими словами, величина успешности прогноза в целом, в отличие от традиционной оправдываемости, зависит от распределения прогностических фаз).

Расчет величины  $Q$  может быть выполнен на основе архива прогностических и фактических данных с применением выражения (4). Например, в грубом приближении значения успешности в целом прогноза направления ветра для теплого периода года составляют: на день – 0,305, на ночь – 0,186, однако следует иметь в виду, что эти оценки не в полной мере отвечает реальной успешности вследствие недостаточного объема исходных данных (учтены не все прогностические градации).

Успешность прогноза в целом может представлять интерес в аспекте формирования степени доверия к прогностическим данным.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше теоретические положения и результаты практических расчетов позволяют сделать следующие выводы:

- на основе дистрибутивного подхода возможен перевод категорической формы прогноза в вероятностный вид, при этом создаются условия для наглядного представления и визуализации вероятных направлений ветра для данного категорического прогноза;

- критерий оценки представляет собой вероятностную характеристику, позволяющую использовать ее в оптимизационных методах принятия решений на основе прогностических данных (появляется возможность трансформации неопределенности прогноза в неопределенность зависящих от погоды конечных параметров, которыми оперирует пользователь);

- дистрибутивный подход к оценке прогнозов дает возможность проводить оценку точности прогнозов направления ветра;

- предложенный подход предоставляет широкие возможности для детального анализа точности индивидуальных прогнозов для различных условий (например, в зависимости от сезонов, сроков наблюдения и других ограничений). В частности, можно видеть, что для целого ряда индивидуальных прогнозов направления ветра распределение фактических данных имеет многомодальный характер;

- величина расхождений между вероятностями осуществления прогнозов и повторяемостями служит индикатором ошибок, требующих дополнительного анализа причин их возникновения;

- критерий успешности (4) как условная вероятность осуществления прогноза позволяет сравнивать однотипные индивидуальные прогнозы, составленные различными специалистами, по различным методикам и т.п. При этом при оценке мастерства прогнозиста следует учитывать климатические особенности и другие специфические факторы;

- технология оценки прогнозов на основе дистрибутивного подхода предполагает систематическое архивирование прогностических и фактических данных и

может быть реализована в оперативном режиме с постоянным пополнением архивов и динамическим обновлением расчетных характеристик;  
– предложенная методология применима к любым скалярным прогностическим данным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев В.И., Еникеева В.Д. Вероятностная интерпретация краткосрочного прогноза температуры (на примере Санкт-Петербурга) // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 25–30.
2. Дмитриев В.Г. Вероятностная интерпретация прогноза дат достижения морским льдом толщины 20–25 см в арктических морях // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 45–56.
3. Дмитриев В.Г., Рыбчак Н.В. О возможностях использования совместных статистических характеристик гидрометеорологических прогнозов и фактических данных в прогностической практике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 77. С. 43–55.
4. Информационный сборник № 25. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. СПб.: Гидрометеиздат. 1999. 119 с.
5. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
6. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Госгидромет, 1991. 151 с.
7. РД 52.88.629 2002. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: Росгидромет, 2002. 22 с.
8. Хандожко Л.А. Экономическая метеорология. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 479 с.
9. Brooks H.E., Doswell III C.A. A comparison of measures-oriented and distributions oriented approaches to forecast verification // Weather and forecasting. 1996. Vol. 11. № 3. P. 288–303.
10. DelSole T. Predictability and Information Theory. Part I: Measures of Predictability // J. Atmos. Sciences. 2004. Vol. 61 (20). P. 2425–2440.
11. Joliffe I.T., Stephenson D.B. (Ed.) Forecast Verification: A practitioner's Guide in Atmospheric Science. Wiley, 2003. 240 p.

V.G.DMITRIEV

#### **ABOUT THE POSSIBILITY OF CATEGORICAL WIND DIRECTION FORECAST PROBABILISTIC REPRESENTATION AND ESTIMATION BASED ON THE DISTRIBUTION-ORIENTED APPROACH**

*The paper is concerned with theoretical base and practical results of categorical wind direction forecast probabilistic representation and estimation. The estimation method based on the distribution-oriented approach and can be applied to individual forecasts as well as to forecast in general. Explicit formula for probabilistic density of real data observed when forecast is given is proposed. It based on Von Mises distribution with some modifications. It was found that distributions of real wind directions in some cases are multimodal. All calculations were made with real forecast and observed data.*

*Key words:* categorical forecast, probabilistic representation, wind direction, distribution-oriented approach.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

д-р техн. наук А.В.БОГОРОДСКИЙ<sup>1</sup>,  
д-р физ.-мат. наук Г.А.ЛЕБЕДЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург, e-mail: mfr@mail.wplus.net

<sup>2</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: lebedev@aari.nw.ru

*Выполнен анализ существующих гидроакустических средств (ГАС), которые могут быть использованы для обнаружения и оценки морфометрических характеристик подводных частей опасных ледяных образований (ОЛО) типа айсбергов, стамух, торосов, взаимодействие которых с морскими сооружениями может привести к повреждению или разрушению последних. Показано, что для мелководных районов шельфовой зоны, при установке ГАС непосредственно на гидротехнических сооружениях, дальность обнаружения ОЛО и оценки их подводных частей принципиально ограничены 2,5–3,0 км, что не обеспечивает требуемую зону безопасности (в радиусе не менее 100 км).*

*Для мониторинга ОЛО в пределах зоны безопасности определена структура использования ГАС, входящих в систему гидроакустического канала получения информации об ОЛО, включающая: рубежную систему дальнего (более 100 км) обнаружения ОЛО и систему ГАС, устанавливаемых на автономных необитаемых подводных носителях.*

*Ключевые слова:* гидроакустические системы, ледяные образования, мониторинг, гидротехнические сооружения, безопасность, система наблюдения.

Успешное освоение углеводородных ресурсов шельфовой зоны замерзающих морей требует создания новых технологий, технических средств и сооружений в морском ледостойком исполнении; разработки новых технологий обнаружения, слежения, прогнозирования и воздействия на опасные ледяные образования (ОЛО) — айсберги, стамухи, торосы, т.е. такие, взаимодействие которых с морскими сооружениями может привести к повреждению или разрушению последних. Не подлежит сомнению, что для обеспечения своевременного обнаружения и последующего получения непрерывной и достоверной информации о характеристиках ОЛО целесообразно комплексно использовать вместе с уже традиционными (аэрокосмическими) каналами получения информации об ОЛО, также и гидроакустический канал. От того, насколько полной и достоверной окажется информация, поступающая по этим каналам, в конечном счете будет зависеть снижение риска эксплуатации морских сооружений, экологическая безопасность районов работ и безопасность жизни людей. Для этого необходимо, чтобы при работе на месторождении была организована в радиусе не менее 100 км от гидротехнического сооружения система наблюдений за движением ОЛО, их размерами и массой.

Следует отметить, что указанные основные задачи, решение которых должны обеспечивать гидроакустические средства (ГАС), входящие в состав гидроакустического канала получения информации об ОЛО, не являются принципиально новыми. К настоящему времени прикладной гидроакустикой накоплен значительный научно-технический опыт, позволяющий создавать гидроакустические средства освещения ледовой обстановки из-под воды применительно к подводным обитаемым носителям (подводным лодкам и подводным аппаратам), которые в известной степени обеспечивают решение названных задач в интересах подледной навигации. В этой связи при исследовании возможности использования гидроакустических средств для обнаружения ОЛО и оценки морфометрических характеристик их подводных частей, применительно к обеспечению безопасности гидротехнических сооружений, целесообразно использовать научно-технический и практический опыт создания и эксплуатации ГАС.

Физические основы для создания специализированных ГАС освещения ледовой обстановки и интерпретации получаемой ими информации заключаются в особенности акустических свойств морского льда на различных стадиях его существования — от тонкого молодого льда на поверхности разводий до многолетних паковых льдов и айсбергов [3].

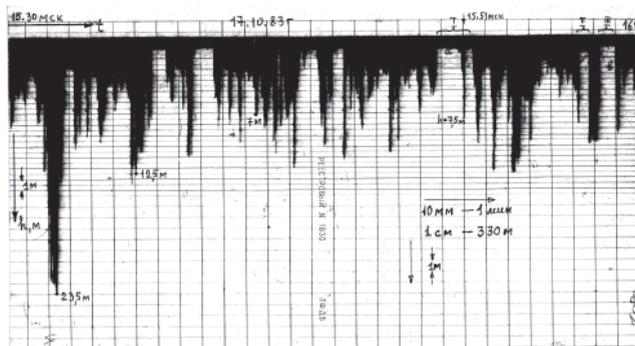


Рис. 1. Фрагмент эхоледограммы

К техническим средствам гидроакустического наблюдения, которые в той или иной мере могут быть использованы для решения задач обнаружения ОЛО и определения их морфометрических характеристик, можно отнести следующие: эхоледомеры (акустогидростатический и гидроакустический); гидроакустические станции бокового и кругового обзора; многолучевые эхолоты; гидроакустические станции обнаружения айсбергов; гидроакустические станции получения трехмерных изображений объектов; радиогидроакустическая система предупреждения об айсбергах. Использование указанных ГАС, при их установке на подводных носителях, позволяет получать рельеф нижней поверхности ледяного покрова и его толщину с достаточно высокой точностью. Фрагмент эхоледограммы, полученной с советского подводного корабля при его плавании по прямолинейному маршруту на глубине 150 м, представлен на рис. 1 [5].

Характеристики подобного рода могут быть получены также при регистрации движения ледяного покрова относительно неподвижного эхоледомера, установленного на дне и имеющего характеристику направленности, ориентированную вертикально вверх [11]. Подобный эхоледомер позволяет вычислять осадку льда  $Z_{ice}$  (здесь и далее под соответствующим параметром льда подразумевается его оценка) в точке, находящейся над его акустической антенной, в соответствии с выражением [2]

$$Z_{ice} = H_{ni} - r_p, \quad (1)$$

где  $H_{ni}$  – глубина погружения  $i$ -ой акустической антенны эхоледомера, вычисленная по результатам оценки глубины погружения некоторой точки корпуса объекта, принятой за точку отсчета;  $r_i$  – кратчайшая дистанция между акустической антенной и границей раздела вода–лед в точке зондирования. Вычисление  $r_i$  осуществляется по формуле

$$r_i = r_i' \cos \theta \cos \psi = \frac{t_i c}{2} \cos \theta \cos \psi, \quad (2)$$

где  $r_i'$  – определенная по времени запаздывания дистанция до нижней кромки льда от  $i$ -ой антенны;  $c$  – значение средней по трассе распространения скорости звука;  $\theta$ ,  $\psi$  – значения углов крена и дифферента объекта в момент зондирования;  $i = 1, 2, \dots$  – номер антенны.

Как следует из выражения (1), осадка льда вычисляется как разность между глубиной погружения акустической антенны гидролокатора, определяемой с помощью преобразователя абсолютного гидростатического давления, и дистанции от антенны до границы раздела вода–лед, определяемой с помощью гидролокатора. Преимущества этого вида эхоледомера – его принципиальная простота и наглядность получаемых данных, а также возможность оценивать осадку льда практически любой толщины.

Большое влияние на точность и достоверность данных об измеряемых расстояниях до исследуемой поверхности при наличии сильной изрезанности ее рельефа оказывает уровень боковых лепестков характеристики направленности антенны эхоледомера, так как амплитуды эхосигналов, принятых боковыми лепестками, могут превысить амплитуду эхосигнала, принятого основным лепестком, что приведет к появлению ложных отметок на индикаторе. Поэтому для таких систем принципиальным является уменьшение уровня боковых лепестков антенны.

Основной источник погрешности акусто-гидростатического эхоледомера – канал измерения абсолютного гидростатического давления, показания которого зависят от изменения атмосферного давления  $p_{ам}$  над поверхностью льда, которое не может измеряться из-под воды в условиях подледного плавания. Это приводит к наличию у этого вида эхоледомеров неустранимой методической погрешности в оценке осадки льда. Погрешности эхолотового канала  $\Delta r_i$  также зависят от внешнего фактора – от точности знания вертикального распределения скорости звука над погруженным объектом. Это вторая существенная, неустраняемая и возрастающая с глубиной погружения объекта составляющая методической погрешности.

Суммарные (инструментальные, методические, внешние) предельные погрешности определения дистанции до нижней поверхности льда  $\Delta r_i$  и глубины погружения антенны  $\Delta H_{ni}$  определяются следующими выражениями [2]:

$$\begin{aligned} \Delta r_i = & \frac{1}{2} (t \Delta c \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi + c \Delta t \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi) - \\ & - \frac{1}{2} (ct \Delta \psi \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi + ct \Delta \theta \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta), \end{aligned} \quad (3)$$

$$|\Delta H_{ni}| = |\rho^{-1} \Delta \rho| + |\rho^{-1} \Delta p_{ам}| + |p \rho^{-2} \Delta \rho| + |p_{ам} \rho^{-2} \Delta \rho| + |\Delta z_i|, \quad (4)$$

где  $\Delta p$ ,  $\Delta \rho$ ,  $\Delta z_i$  – соответственно погрешности определения абсолютного гидростатического давления, плотности морской воды и аппликаты соответствующей антенны эхоледомера относительно уровня, на котором измеряется гидростатическое давление.

Методическая погрешность, обусловленная неточностью знания скорости звука в воде, равна

$$\Delta r = \frac{c_u - c_n}{2} \Delta t, \quad (5)$$

где  $c_u$  – истинное значение скорости звука;  $c_n$  – принятое значение скорости звука.

Для случая линейного изменения скорости звука с глубиной, что можно считать справедливым для условий приповерхностного слоя водных масс Арктического бассейна [1], оценка  $r^*$  с учетом линейной рефракции в среде может быть представлена в виде [7]

$$r^* = \frac{c_0}{2} \Delta t \cdot \cos \theta - \frac{1}{8} G_c c_0 (\Delta t)^2 (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta), \quad (6)$$

где  $c_0$  – скорость звука на горизонте расположения акустической антенны;  $G_c$  – градиент изменения скорости звука по глубине ( $c^{-1}$ );  $\theta$  – угол наклона акустического луча относительно нормали к поверхности.

Так как в реальных условиях закон распределения градиента скорости звука можно считать близким к нормальному закону, то в этом случае плотность распределения вероятности  $r^*$  может быть представлена выражением [7]

$$P(r^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp \left( - \frac{\left( r^* - c_0 \frac{\Delta t}{2} \cos \theta \right)^2}{2\sigma_r^2} \right), \quad (7)$$

где  $\sigma_r^2$  – дисперсия оцениваемого расстояния.

Отсюда средняя квадратическая погрешность определения  $r$  будет

$$\sigma_r = \frac{1}{8} \sigma_{G_c} c_0 (\Delta t)^2 (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta), \quad (8)$$

где  $\sigma_{G_c}$  – средняя квадратическая погрешность определения градиента.

Для достижения приемлемой точности оценки осадки льда суммарная погрешность измерения глубины погружения преобразователем гидростатического давления должна быть не хуже 0,15 % от верхнего предела глубины погружения.

Точность измерения расстояния до нижней поверхности льда и подробность воспроизведения рельефа в решающей степени зависят от рабочей частоты эхоледомера, которая для современных систем лежит в пределах 100...200 кГц. Это обеспечивает их работу с глубин до 500 м при приемлемой точности и разрешающей способности, дающей возможность отображать элементы рельефа протяженностью в несколько десятков метров. Суммарная абсолютная погрешность оценки осадки льда этим типом эхоледомеров может достигать нескольких десятков сантиметров, что для оценки морфометрических характеристик подводных частей ОЛО представляется приемлемым.

Использование эхоледомеров рассмотренного типа может быть весьма перспективным при построении рубежных систем наблюдения, устанавливаемых на направлениях наиболее вероятного появления ОЛО на дальних (до 100 км) подступах к гидротехническому сооружению. Но применение эхоледомеров для исследования рельефа нижней поверхности ледяного покрова далеко не исчерпывает всех практических задач этих исследований, так как наряду с информацией о рельефе вдоль некоторой трассы чрезвычайно важно иметь данные о площадных изменениях неровностей льда. В последние годы для решения этих задач все бо-

лее заметную роль играют гидроакустические системы, построенные на принципах подводного звуковидения, позволяющие получать двумерные гидролокационные изображения звукорассеивающих поверхностей.

Одним из методов формирования акустических изображений, достаточно широко реализуемым в настоящее время для решения исследовательских и практических задач, является разработанный в 1950-е гг. метод бокового и кругового обзора [6]. Это метод пространственно-временной обработки сигналов с фазированной антенной решеткой. При этом изображение формируется не звуковым объективом (по акустическому полю), а диаграммоформирующим устройством в электронных трактах системы, функции которого в гидролокаторе бокового обзора (ГБО) выполняет синфазная эквидистантная антенная решетка, обеспечивающая формирование характеристики направленности, широкой (около  $60^\circ$ ) в вертикальной плоскости и узкой (около  $1,5-3^\circ$ ) в горизонтальной.

Теоретической основой методов формирования акустических изображений служит одночастотное преобразование Фурье—Френеля и принцип обращения пространства.

Если диаграмма направленности акустической антенны определяется выражением

$$R(\theta, \varphi) = R(\theta)R(\varphi), \quad (9)$$

где  $\theta$  — угол, отсчитываемый от геометрической оси антенны в вертикальной плоскости;  $\varphi$  — азимутальный угол, то, полагая, что плоскость углов  $\theta$  перпендикулярна звукорассеивающей поверхности, и считая угол наклона оси характеристики направленности относительно горизонта равным  $\alpha_a$ , можно показать, что интенсивность граничной реверберации ( $I_{rev}$ ) определяется соотношением [10]

$$I_{rev}(\theta) = \frac{m(\theta_0) P_a \eta_n}{16\pi^2 \text{tg}\theta_0} R^4(\theta) \int_{-\pi}^{\pi} R^4(\varphi) d\varphi \int_r^{r+c\tau/2} \frac{10^{-0,2r\beta}}{r^3} dr, \quad (10)$$

где  $\theta_0$  — угол падения акустического луча на поверхность;  $\tau$  — длительность зондирующего импульса;  $m(\theta_0)$  — коэффициент обратного рассеяния;  $r$  — наклонная дальность;  $P_a$  — излучаемая гидролокатором акустическая мощность;  $\theta = 90^\circ - \theta_0 - \alpha_a$ ;  $\eta_n$  — коэффициент, учитывающий влияние направленных свойств излучателя и приемника (коэффициент направленности) на уровень реверберации;  $\beta$  — коэффициент затухания звука в воде;  $c$  — скорость звука в воде.

Для случая равносигнального облучения поверхности и условия  $D \gg \lambda$ , где  $D$  — длина антенны, из (10) получим

$$I_{rev}(\alpha) = m(\alpha) \frac{P_a c \tau R^4(\alpha) \text{ctg} \alpha}{3r^3 \sin \alpha_m \cos \alpha_m} \cdot 10^{-0,2\beta r}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что интенсивность граничной реверберации не зависит от направленности антенны в горизонтальной плоскости. Это обстоятельство весьма существенно, так как антенна ГБО имеет высокую направленность в азимутальной плоскости и измерения  $R(\varphi)$  могут сопровождаться большими ошибками.

Заметим, что выражение (11) служит основой для расчета коэффициента обратного рассеяния  $m(\alpha)$ , так как все величины, входящие в формулу, могут быть найдены путем прямого измерения.

Метод «акустического контраста» дает наилучшие результаты при измерении не абсолютного значения  $m(\alpha)$ , а его относительного усредненного изменения  $\bar{m}(\alpha)$ , вычисляемого как среднее по выделенной области. Изучение пространственно-временной изменчивости  $m(\alpha)$  может служить основой для получения статистических характеристик  $m(\alpha)$  для интересующих районов.

Метод «акустического контраста» был успешно применен в 1965 г. на дрейфующей научно-исследовательской станции «Северный полюс-13» для исследования обратного рассеяния ультразвука морским льдом различного типа: ниласом, однолетним и паковым льдом [4]. При этом использовался так называемый гидролокатор кругового обзора (ГКО), у которого антенна механически вращалась с постоянной угловой скоростью вокруг вертикальной оси, а принимаемые ею эхосигналы воспроизводились на индикаторе в координатах азимут—дальность.

Исследования показали, что среднее значение коэффициента обратного рассеяния  $m(\alpha)$  зависит от толщины льда и возрастает с ее увеличением, а также, что неоднородность обратного рассеяния коррелирует с изменчивостью толщины льда, т.е. с рельефом его нижней поверхности. Последнее позволяет использовать эти особенности для решения задач классификации звукорассеивающих поверхностей по их гидролокационному изображению.

Пример гидролокационного изображения, полученного при использовании ГКО для исследования нижней поверхности ледяного покрова, представлен на рис. 2. Следует отметить, что эффективная полоса (радиус) зоны обзора ГБО и ГКО при обследовании ровных (не подвергавшихся торошению) льдов составляет 6–7 значений отстояния антенны гидролокатора от нижней поверхности льда. При обследовании паковых льдов значение этой основной характеристики ГАС снижается до 3–4 значений отстояния вследствие проявления эффекта самозатенения поверхности элементами рельефа на скользящих углах падения акустического луча. Так, при отстоянии антенны ГБО от нижней кромки льда, равном 100 м, эффективная полоса обзора пакового льда не превышает 300–400 м.

В последнее время в качестве альтернативы ГБО все чаще используются многолучевые эхолоты (МЭЛ) с направленной в сторону нижней поверхности ледяного покрова акустической антенной, обеспечивающей трехмерное отображение особенностей рельефа льда. Эффективная полоса обзора МЭЛ так же, как и при использовании ГБО и ГКО, зависит от характера рельефа обследуемой звукорассеивающей поверхности.

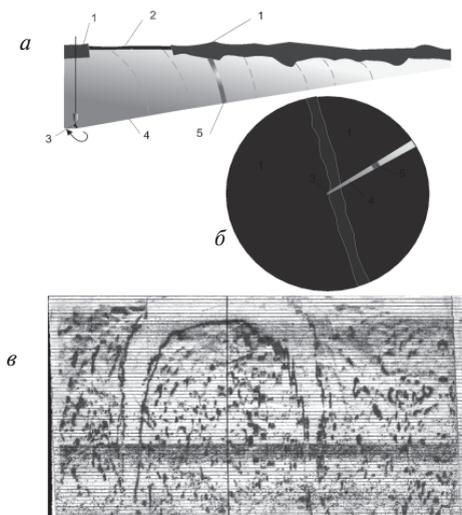


Рис. 2. Пример гидролокационного изображения, полученного при использовании ГКО: *a* — схема эксперимента; *b* — план взаимного расположения участков льда в зоне обзора (обозначения те же); *в* — изображение на самописце нижней границы льда в прямоугольных координатах; 1 — паковые льды; 2 — замерзшее разводье (лед 1,5 м); 3 — антенна, вращаемая в горизонтальной плоскости; 4 — ХН антенны; 5 — текущее положение зондирующего импульса

Для определения морфометрических характеристик ледяного покрова может быть также использована ГАС обнаружения навигационных препятствий по курсу носителя, представляющая собой вперёдсмотрящий 3D-гидролокатор секторного обзора с электронным сканированием характеристик направленности акустических антенн в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В наилучшей степени для этой цели оказались пригодны корабельные ГАС миноискания, которые, как показала практика, способны обнаруживать из-под воды айсберги и другие навигационные препятствия на дальностях до 2500–3000 м. Однако, в силу недостаточной изученности характеристик реальных айсбергов как гидролокационных целей, приведенные данные по дальностям обнаружения айсбергов требуют серьезной экспериментальной проверки. В частности, для энергетического расчета ГАС обнаружения айсбергов и определения энергетической дальности обнаружения необходимо знание  $R_s$ , характерного для айсбергов того или иного типа, так как интенсивность отраженного от гидролокационной цели эхосигнала определяется выражением [7]

$$I_c = P_a \gamma R_s^2 / 16\pi r^4 \cdot 10^{0,2Br}, \quad (12)$$

где  $R_s$  – эквивалентный радиус цели (в данном случае айсберга) на рабочей частоте ГАС;  $\gamma$  – коэффициент осевой концентрации антенны.

В принципе для решения задачи дальнего обнаружения ОЛО, в частности айсбергов, могут быть использованы и корабельные гидроакустические станции с гибкими протяженными буксируемыми антеннами (ГАС с ГПБА), имеющими активный режим работы. Но данные о практическом использовании указанных систем для обнаружения ОЛО отсутствуют. Кроме того, отсутствуют также сведения об акустических характеристиках айсбергов в частотном диапазоне, характерном для работы ГАС с ГПБА.

Для решения аналогичной задачи может быть с успехом использована и радиогидроакустическая система (РГС) предупреждения об айсбергах, которая в свое время была разработана в Канаде для защиты морских нефтепромыслов от воздействия ОЛО [9]. Система является автономной и может устанавливаться в пределах шельфовой зоны контролируемой акватории на дальних подступах к охраняемым от воздействий ОЛО гидротехническим сооружениям (ГС).

Принцип действия такой системы вполне понятен из рис. 3 и предусматривает регистрацию времени распространения сигналов между акустическими антеннами по различным траекториям распространения: по кратчайшему водному лучу, претерпевшему минимальные рефракционные искажения, по отраженному донному и поверхностному лучам.

Минимальное время распространения сигнала в прямом и обратном направлении в пределах существования данных гидрологических условий служит эталоном при последующем анализе подводной обстановки. Если на пути водных лучей окажется препятствие, экранирующее распространение прямого акустического сигнала, суммарное время прохождения акустических сигналов превысит эталонное значение, что будет служить признаком появления в зоне обзора системы крупного объекта, который может с наибольшей вероятностью оказаться ОЛО. Сигнал о наличии такого объекта транслируется через радиобуш на пост анализа гидроакустической информации. По времени существования сигнала о наличии объекта можно судить о протяженности его подводной части.

Расчеты энергетической и геометрической дальности действия системы для гидрологических условий, характерных для Карского моря, показывают, что одна система, построенная по такому принципу, может обеспечить ширину зоны обнаружения айсбергов  $L$  (расстояние между акустическими антеннами 4 на рис. 3) до 5 км при глубине моря более 200 м и заглублинии акустических антенн не

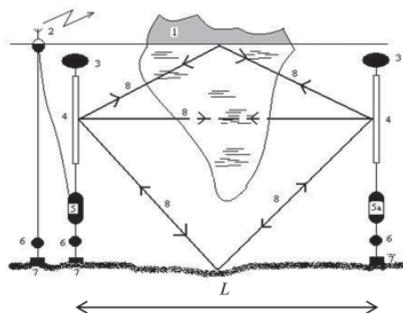


Рис. 3. Радиогидроакустическая система (РГС) предупреждения об айсбергах:

1 – айсберг; 2 – радиобуй; 3 – плавучести; 4 – гидроакустические антенны; 5 – основной контейнер с аппаратурой и источниками электропитания; 5а – контейнер ретранслятора с аппаратурой и источниками электропитания; 6 – гидроакустические разъединители; 7 – якоря; 8 – возможные пути распространения прямых и ретранслируемых акустических сигналов

менее 50 м. Дальность связи по радиоканалу с МБП или береговой станцией практически не ограничена.

Что касается возможности прямого использования ГАС при их установке непосредственно вблизи гидротехнического сооружения, то можно отметить следующее.

Для того чтобы получить достоверную информацию о пространственно-временных характеристиках поля акустического сигнала в слое, необходимо иметь достоверную и оперативную информацию о гидрофизических характеристиках среды по трассе распространения акустического сигнала. Практика показывает, что распределения параметров акустического поля сигнала весьма сложны, так как зависят от множества гидрофизических характеристик среды (в том числе поверхности моря и грунта), имеющих значительную временную и пространственную изменчивость. В этой связи актуальной становится задача оценки геометрической дальности действия ГАС, которая определяется наличием и конфигурацией зон акустической освещенности. В наибольшей степени на протяженность зон акустической освещенности влияет вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) в районе установки ГАС. На рис. 4 и 5 приведены картины пространственного распределения поля акустического сигнала по глубине и дальности (до 10 км), рассчитанные на основании профиля ВРСЗ, снятого в июле 2005 г. в Баренцевом море на изобате 280 м в районе Штокмановского ГКМ. Источник сигнала заглублен на 30 и 130 м от поверхности моря.

Из рис. 4 видно, что в пространственном распределении поля акустического сигнала имеются две зоны акустической тени, расположенные в приповерхностном слое моря на дальностях от 0 до 200 м и примерно от 700 до 1700 м. По конфигурации этих зон можно определить осадку айсбергов, при которой они могут преодолевать эти зоны не будучи обнаруженными системой. Если предположить, что наиболее вероятная осадка айсберга составляет 32,5 м, то такие айсберги, при нахождении их в зонах акустической тени, с большой вероятностью будут пропущены ГАС.

При заглублении антенны ГАС на 130 м и приведенных выше гидрологических условиях появляются три зоны тени, одна из которых – первая весьма глубокая (см. рис. 5), а в приповерхностном слое, начиная со второй зоны освещенности, интенсивность поля сигнала значительно снижена. В этой связи определение оптимальной геометрической дальности действия системы для различных районов ее установки, а следовательно, и ее технического облика (количество и параметры излучающих и приемных каналов, заглубление акустических антенн, их пространственная избирательность и алгоритм обработки информации) требуют

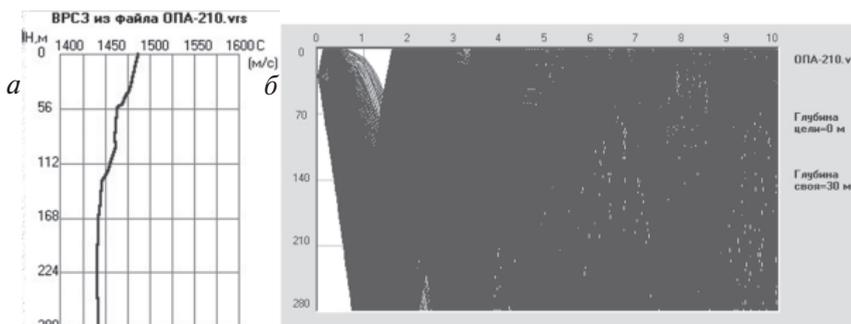


Рис. 4. Вертикальное распределение скорости звука (а) и расчетная картина пространственного распределения акустического поля сигнала по трассе распространения длиной 10 км (б). Заглубление источника сигнала 30 м

проведения целенаправленных исследований. В любом случае ясно, что без развитых и оперативно действующих систем сбора гидрологической информации и гидроакустических расчетов акустического поля построение и надежная работа ГАС, по крайней мере в условиях мелкого моря, невозможны. Можно предположить, что проще всего обеспечить построение ГАС, работающей в пределах первой зоны акустической освещенности антенны. Однако для приведенных выше условий распространения, характерных для Баренцева и Карского морей, которые относятся к категории мелких морей, максимальная протяженность первой зоны акустической освещенности, как это видно из рис. 4 и 5, не превышает 2 км.

Таким образом, представленный выше анализ существующих гидроакустических средств освещения ледовой обстановки из-под воды, разработанных применительно к использованию с обитаемых подводных носителей (типа подводной лодки), свидетельствует о возможности их применения и для решения задачи обнаружения ОЛО и оценки морфометрических характеристик их подводных частей. Но при этом дальность обнаружения ОЛО (айсбергов, тяжелых паковых льдов) и оценки протяженности их подводных частей с помощью ГАС освещения ледовой обстановки, при установке их непосредственно вблизи гидротехнического сооружения, принципиально ограничена значениями 2,5...3,0 км, что не обеспечивает требуемую зону безопасности (порядка 100 км). Исключение составляет радиогидроакустическая система предупреждения об айсбергах, которая может быть использована для обнаружения айсбергов на заданном направлении и передавать информацию о них на расстояния более 100 км. Поэтому рассмотренные методы и средства целесообразно использовать в качестве основы построения рубежных систем обнаружения и классификации при создании технических средств гидроакустического ка-

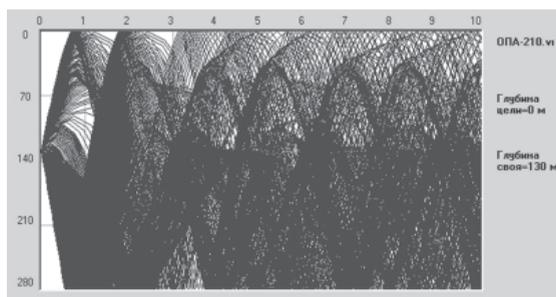


Рис. 5. Расчетная картина распределения акустического поля сигнала по трассе распространения длиной 10 км. Заглубление источника сигнала 130 м

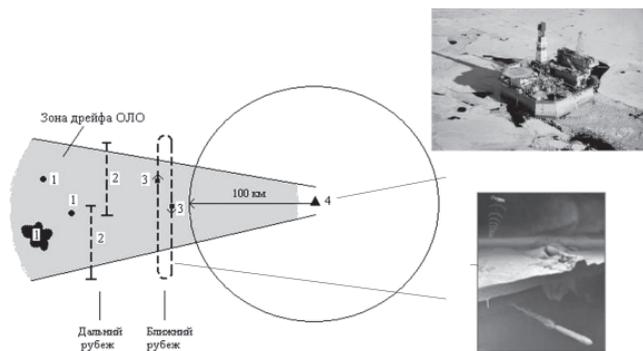


Рис. 6. Схема использования ГАС, входящих в систему гидроакустического канала получения информации об ОЛО:

1 – дрейфующие ОЛО; 2 – радиогидроакустические системы предупреждения об айсбергах; 3 – ГАС освещения ледовой обстановки из-под воды на самоходных подводных носителях; 4 – ГС

нала получения информации об ОЛО, применительно к обеспечению безопасности морских буровых платформ Баренцева и Карского морей.

В этом случае по информации, поступающей по гидроакустическому каналу, можно будет рассчитать зону безопасности и зону риска при появлении ОЛО в радиусе 100 км от ГС.

Предлагаемая схема использования содержит два рубежа получения информации об ОЛО – дальний и ближний (рис. 6), положение которых определяется относительно границ круговой зоны безопасности сооружения радиусом 100 км.

Протяженность рубежей и их ориентация относительно стран света определяются шириной и ориентацией опасной зоны дрейфа ледовых образований. На дальнем рубеже относительно стокилометровой зоны безопасности размещаются радиогидроакустические системы предупреждения об ОЛО и донные гидролокаторы. Они обеспечивают получение и передачу в центр управления первичной информации о появлении в опасной зоне айсбергов. Количество станций на рубеже и заглубление их акустических антенн определяются поперечным сечением перекрываемой станциями опасной зоны и наиболее вероятной осадкой айсбергов, подлежащих обнаружению. Информация об ОЛО, переданная системами предупреждения дальнего рубежа, анализируется центром управления. В случае необходимости центром принимается решение по уточнению информации об ОЛО с помощью ГАС освещения ледовой обстановки, размещенных на самоходных подводных носителях, которые образуют ближний рубеж получения информации об ОЛО. Уточненная информация, как о наличии самих ОЛО, так и о морфометрических характеристиках их подводных частей, анализируется, после чего, к моменту подхода ОЛО к границе стокилометровой зоны, принимается решение о действиях, которые необходимо предпринять для безопасности ГС. Самоходные



Рис. 7. Состав средств гидроакустического канала получения информации об ОЛО

подводные объекты — носители ГАС, в зависимости от их характеристик, доставляются к границам ближнего рубежа специализированным судном или находятся в постоянном дежурстве непосредственно у ГС или у границы рубежа безопасности. При этом гидроакустический канал получения информации об ОЛО состоит из гидроакустических средств, размещаемых как на дне акватории ГС, так и на самоходном подводном носителе. Состав этих средств представлен на рис. 7.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустика океана / Под ред. Л.М.Бреховских. М.: Наука, 1974. 693 с.
2. Богородский А.В. К вопросу о погрешностях оценки осадки морского льда с помощью акустогидростатического эхоледомера // Морская радиоэлектроника. 2005. Вып. 4 (14). С. 52–56.
3. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 384 с.
4. Богородский В.В., Смирнов Г.Е., Смирнов С.А. Поглощение и рассеяние звуковых волн морским льдом // Труды ААНИИ. 1975. Т. 326. С. 128–134.
5. Бушуев А.В., Гаврило В.П., Лебедев Г.А. Информативность различных видов и методов дистанционных ледовых наблюдений // Морской лед. СПб.: Гидрометеиздат. 1997. С. 345–369.
6. Жуков Р.Ф. Гидролокаторы бокового обзора // Судостроение за рубежом. 1968. № 13. С. 27–35.
7. Матвиенко В.Н., Тарасюк В.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1976. 200 с.
8. Мерклин Л.Р., Гасельганц А.А. и др. Приемные устройства в морской сейсмозвездке: Обзор. М.: ВИЭМС. 1973. 265 с.
9. Простаков А.Л. Электронный ключ к океану. Л.: Судостроение, 1986. 180 с.
10. Фарра К.Р., Маром Е., Мюллер Р.К. Система подводного видения, использующая акустическую голографию // Акустическая голография. Л.: Судостроение, 1975. С. 126–211.
11. Hudson R. Annual measurement of sea ice thickness using an upwardlooking sonar // Nature. 1990. Vol. 3(44). № 62. P. 135–137.

*A.V.BOGORODSKY, G.A.LEBEDEV*

#### BASIC PRINCIPLES OF BUILDING-UP THE SYSTEM OF HYDROACOUSTIC MONITORING OF THE DANGEROUS ICE FORMATION AT THE SHELF OF FREEZING SEAS FOR THE ENSURING OF THE SAFE OPERATION OF THE HYDRAULIC FACILITIES

*There has been conducted the analysis of existing hydroacoustic means (HAM), that can be used for detection and assessment of the morphometric features of the dangerous ice formations (DIF) such, as icebergs, grounded hummocks, ice hummocks, the interaction of which with the hydraulic facilities can cause damage and destruction of the latter. There has been demonstrated that for the shallow-water areas of the shelf zone with the help of installation of HAM directly at the hydraulic facilities, the distance of DIF detection and assessment of their underwater sections is limited to 2.5-3.0 km, that does not provide the required safety zone (within a radius of not less than 100 km).*

*For the DIF monitoring within the safety zone there has been identified the structure of usage of HAM, included in the system of hydroacoustic channel of receiving of information about DIF, that includes: the boundary system of early (more then 100 km) detection of DIF and system of HAM, installed at the independent uninhabited submarine carriers.*

*Key words:* the system of hydroacoustic, the ice formation, monitoring, the hydraulic facilities, the safety, the system of information.

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ РАЗРУШЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ НАЛЕДЕЙ ВЗРЫВАМИ

*д-р физ.-мат. наук Г.А.ЛЕБЕДЕВ,  
канд. физ.-мат. наук В.П.ТРИПОЛЬНИКОВ*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@aari.nw.ru*

*Представлены результаты разработки нового способа очистки инженерных сооружений от наледей с использованием взрыва топливозвоздушной смеси (ТВС) и соблюдением условий безопасного применения предлагаемой технологии. Рассмотрены физические и технические основы способа. Дается пример расчета необходимой плотности распределения поджигающих зарядов и их массы, а также массы требуемого топлива, при его полном выгорании в воздухе при сохранении стехиометрической концентрации в облаке заряда ТВС, для удаления налееди со сварной конструкции.*

*Ключевые слова:* способ, технология, разрушение, атмосферные налееди, взрыв, топливо-воздушные смеси.

Обледенение представляет серьезную угрозу работоспособности технических устройств и сооружений и может приводить к аварийным ситуациям, поэтому существует потребность принятия экстренных эффективных мер по очистке сооружений от наледей.

К известным способам борьбы с обледенением относятся различные варианты антиадгезионной обработки поверхности конструкции, например гидрофобными покрытиями [7].

Анализ термодинамических параметров динамики обледенения, рассмотренных в работе [1], свидетельствует, что величина адгезии морского льда к разным поверхностям при различных температурах подложки имеет порядок 0–0,5 МПа и пресноводного льда до 1,5–2,0 МПа. Она определяется методом отрыва или среза льда с поверхности. Еще один аспект физической природы адгезии льда до настоящего времени оставался неисследованным. Дело в том, что при замерзании воды на поверхности материала, на поверхности смачивания появляются дефекты структуры льда, связанные с расширением воды при замерзании. Можно назвать эти дефекты контактными микротрещинами, которые в механизме адгезионного захвата играют ослабляющую роль. Поскольку контактные микротрещины ориентируются вдоль поверхности обледенения, то должно быть существенное различие адгезионной прочности на срез вдоль поверхности подложки и на отрыв, перпендикулярный этой поверхности. Существует простой бесконтактный способ исследования адгезии льда на отрыв.

В условиях охлаждения до известных температур образцов различных пробных материалов проводят намораживание льда на поверхностях этих образцов. Помещают образцы в герметический стеклянный сосуд. Откачивают воздух из сосуда и наблюдают за давлением в нем. Ледяные пластинки отваливаются от под-

ложки образцов в процессе вакуумирования сосуда. Максимальный отрицательный перепад давления в сосуде при этом равен атмосферному давлению (0,1 МПа).

Эксперимент с медной подложкой при температуре жидкого азота показал именно этот результат. Объяснение этому результату пока единственное: трещиностойкость адгезионного контакта льда и подложки имеет решающее значение при удержании наледей. Величина адгезионной прочности на отрыв оказывается весьма мала, поэтому достаточно кратковременного вакуумирования среды, чтобы снять наледь. Данный результат и другие ниже приводимые критические условия навели на идею способа очистки сооружений от наледей в масштабах промышленных конструкций [5].

Радикальным средством ударного воздействия можно считать взрыв, в частности взрыв топливо-воздушной смеси (ТВС). В известном способе разрушения льда из подводного положения [3] в воду погружают оболочку, снаряженную иницирующими зарядами, закачивают в нее газовое топливо и окислитель и подрывают. При реализации этого способа в военном деле [4] объемно-детонирующую ТВС распыляют вышибным зарядом и поджигают вторым зарядом, замедленным относительно первого. В этих способах масса вышибных и иницирующих зарядов не ограничивается требованиями безопасности сооружения. Поэтому применение этих вариантов взрыва ТВС для удаления наледей, образующихся на сооружениях, не является безопасным для этих сооружений и рациональным в отношении использования энергии ТВС.

Суть способа, предложенного нами, направлена на повышение эффективности и снижения трудоемкости очистки сооружений от наледей с соблюдением условий безопасного применения предлагаемой технологии. Физические и технические основы способа заключаются в следующем.

Взрывы ТВС производят ударно-вибрационное воздействие на сооружение. Если облако ТВС примыкает к обледеневшим конструкциям, обволакивая их, то при взрыве ТВС наледь воздействуют: 1) ударная волна, имеющая пик давления порядка 2–3 МПа [4]; 2) волны сжатия, отраженные от границ с невозмущенной средой, которые инвертируются в волны разряжения; 3) волна, образующаяся после выгорания смеси (примерно через 0,1–0,5 с в зависимости от ее объема и состава) в облаке с продуктами сгорания и связанная с отрицательным перепадом давления до уровня ниже атмосферного, который сменяется повторным ударным сжатием облака [8].

Наледи представляют собой сплоченный массив льда – «ледовую шубу» на элементах конструкции. Чтобы отделить «шубу» от конструкции требуется сначала фрагментировать ее, т.е. сделать отверстия или надрезы. Для этого предлагается [5] размещать часть поджигающих зарядов на поверхности льда, причем масса отдельного заряда  $m$  в тротиловом эквиваленте (кг) должна быть такой, чтобы ударной волной от его взрыва не повредить конструкцию.

Пик давления в ближней зоне ударной волны и в воздухе и во льду описывается приблизительно одинаковой зависимостью [6]:

$$P^* \cong m/R^3 \text{ (МПа)}, \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние пробега волны (м).

Поэтому условием фрагментации «шубы» будет:  $\sigma_k \geq P^* \geq \sigma_{ice}$ ,  $R = h$ , т.е.  $\sigma_k h^3 > m \geq \sigma_{ice} h^3$ , где  $\sigma_{ice}$  – прочность адгезии льда (МПа),  $\sigma_k$  – предельно допустимое давление на элементы конструкции сооружения (МПа),  $h$  – средняя толщина наледей (м), при размещении поджигающих зарядов массой  $m$  во льду с объемной плотностью распределения  $n = \alpha T_f / m$  (шт/м<sup>3</sup>) в области распыления заряда ТВС, где  $T_f$  – температура воспламенения ТВС,  $\alpha$  – расчетный коэффициент воспламенения ТВС воздушной ударной волной.

Взрыв ТВС необходимо осуществить одновременно во всем ее объеме, так как только в этом случае достигается максимальный эффект отрыва фрагментированной наледы волной разряжения на стадии полного выгорания ТВС. Для этого необходимо поддерживать детонационный режим возгорания ТВС по мере распространения ударной волны от инициирующих зарядов. Этого можно добиться, разместив поджигающие заряды избранной малой массы  $m$  по объему  $V$  расплывленного облака ТВС с равномерной плотностью распределения (с расстоянием  $r$  между поджигающими зарядами) в количестве

$$N = V/r^3 \quad (2)$$

так, чтобы температура воздуха на фронте инициирующей ударной волны во всех точках заряда ТВС ( $T_f$ ) была не меньше температуры воспламенения топлива ( $T$ ), т.е.  $T_f \geq T$ .

Температура воздуха на фронте инициирующей ударной волны зависит от давления в этой волне  $P(R)$  [8]:

$$\frac{P^*}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_f} = k, \quad (3)$$

где  $k$  табулировано [8] для:  $P_0$  – атмосферное давление (0,1 МПа),  $T_0 = 288$  °К.

Принимая  $R = r/2$  и производя соответствующие подстановки, получим:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{r^3} = \frac{1}{8R^3} = \frac{kT_f P_0}{8mT_0}, \quad (4)$$

так как из (1) и (3)  $R^3 = \frac{m}{P^*} = \frac{mT_0}{kT_f P_0}$ .

Тогда, учитывая, что  $n = \alpha T_f/m$ , из (4) значение коэффициента воспламенения ТВС будет

$$\alpha = \frac{kP_0}{8T_0} = 4,34 \cdot 10^{-5} k. \quad (5)$$

#### Пример расчета

Выбираем в качестве топлива керосин. Температура воспламенения паров керосина в воздухе  $T_f = 508 \div 538$  °К. По таблице параметров ударной волны в воздухе [8] для температуры  $T_f$  находим:  $k \approx 3$  при давлении  $P^* \approx 0,5$  МПа. Рассчитываем значение плотности распределения поджигающих зарядов

$$n = \frac{4,34 \cdot 10^{-5} k T_f}{m} = \frac{0,066 \div 0,07}{m}. \quad (6)$$

Рассмотрим случай обледенения с параметрами:  $\sigma_{ice} = 0,5$  МПа,  $h = 0,1$  м. Для фрагментации ледовой «шубы» масса отдельного поджигающего заряда, расположенного на поверхности, должна быть:  $m \geq \sigma_{ice} h^3 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  кг. Следовательно,  $n \leq 120 \div 130$  шт/м<sup>3</sup>.

Предположим, что предельно допустимое воздействие ударной волны на конструкцию определяется допустимыми напряжениями на срез для сварных швов:  $\sigma_k \approx 7$  кг/мм<sup>2</sup> (70 МПа). Тогда максимально допустимая масса поджигающего заряда будет равна  $m \leq \sigma_k h^3 = 70 \cdot 10^{-3} = 0,7$  кг, а плотность распределения поджигающих зарядов составит  $n \approx 0,1$  шт/м<sup>3</sup>. Рамочное условие  $\sigma_k h^3 > m \geq \sigma_{ice} h^3$  гарантирует фрагментацию наледы и взрыв ТВС в режиме догорания за фронтом инициирующей ударной волны. Если исходить из возможности использования стандартных упаковок тротила, например, применять шашки массой  $m = 0,1$  кг, то безопас-

ность сварных швов будет гарантирована, а плотность распределения шашек не превысит значения  $n \approx 1$  шт/м<sup>3</sup>.

Для осуществления одновременности подрыва ТВС поджигающие заряды включают в цепь электроподрыва по возможности без замедления в цепи, т.е. параллельным включением. Практически в качестве поджигающего заряда удобно применять детонационный шнур, прилегающий к поверхности наледи.

Необходимая масса топлива выбирается из расчета полного ее выгорания в воздухе при сохранении стехиометрической концентрации в облаке заряда ТВС. Так как масса кислорода в воздухе составляет 23 %, то массу топлива желательно выбрать не менее определяемой уравнением

$$M = 0,23spN/n, \quad (7)$$

где  $s$  – стехиометрическая концентрация топлива,  $\rho$  – плотность воздуха на месте проведения работ,  $N$  – количество размещенных поджигающих зарядов.

На основании ранжирования дистанций безопасности по давлению ударной волны от взрыва выбранной смеси, определяемой соотношением [8]:

$$P^* \approx (qM)^{1/3}/R, \quad (8)$$

где  $q$  – тротиловый эквивалент теплоты сгорания топлива, проводятся предохранительные мероприятия с чувствительным оборудованием и живыми организмами. При этом для ранжирования используют критерии разрушения сооружений и материалов и критерии поражения живых организмов [2]. После этого можно распылять топливо в намеченном поджигающими зарядами объеме обледеневшего сооружения. Подача и распыление топлива осуществляется устройством, в состав которого входят пульверизаторы, компрессор и шланги-воздухопроводы. Компрессор находится с чертой безопасности, а пульверизаторы с топливом – в зоне предполагаемого распыления. Пульверизаторы запускаются в работу одновременно от одного компрессора.

При визуальном наблюдении расширения капельно-воздушного облака ТВС замыкают цепь электроподрыва в момент перекрытия облаком совокупности поджигающих зарядов. Для осуществления визуального наблюдения за облаком ТВС с дистанции безопасности в состав топлива включают краситель, который поможет определить нештатную ситуацию, например, в связи с действием ветра, и вовремя отказаться от взрыва ТВС. Для усиления энергетики взрыва в качестве красителя полезно использовать термит (смесь порошка алюминия с окислами железа).

Следует отметить, что в экологическом отношении эпизод взрыва ТВС не более опасен, чем работа двигателя внутреннего сгорания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.В. Обледенение тел в водновоздушных потоках: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: Фонды АНИИ, 1982. 198 с.
2. Баткер У. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия / Пер. с англ. Кн. 1, 2. М.: Мир, 1986. 542 с.
3. Воронцов В.Р. и др. Разрушение ледяного покрова газовым взрывом // Труды МГТУ. 1992. № 557. С. 41–43.
4. Дмитриев В. Боеприпасы объемного взрыва // Зарубежное военное обозрение. 1984. № 9. С. 48–53.
5. Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Способ очистки сооружений от наледей // Патент № 2318179. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 февраля 2008 г. Приоритет изобретения 2 мая 2006 г.
6. Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Разрушение ледяного покрова подледными взрывами газовых смесей для обеспечения технической и экологической безопасности эксплуатации инженерных объектов // Труды RAO/CIS OFFSHORE. 2005. СПб., 2005. С. 480–483.

7. Панов В.В., Панюшкин А.В., Шваништейн З.И. Экспериментальное изучение адгезии льда в лабораторных и натуральных условиях // Труды ААНИИ. 1975. Т. 326. С. 147–154.
8. Физика взрыва / Под ред. Л.П.Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 823 с.

G.A.LEBEDEV, V.P.TRIPOLNIKOV

## DEVELOPMENT OF THE MODE AND TECHNOLOGICAL METHODS OF DESTRUCTION OF THE ATMOSPHERIC ICING WITH EXPLOSIONS

*There are presented the results of development of the new mode of de-icing of the engineering structures using the explosion of the fuel and air mixture (FAM) and with observance of rules of the safe application of the technique offered. The physical and technological methods are reviewed. There is given the example of estimate of the required density of distribution of the ignitor charges and their mass as well as the required mass of fuel, in case of its complete burnout in the air, provided the stoichiometric concentration in the FAM charge cloud is preserved, for welded structure de-icing.*

*Key words:* the mode, the technological methods, the destruction, the atmospheric icing, the explosion, the fuel and air mixture.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ ГЛОБАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК В ЭКСПЕДИЦИИ «ШТОКМАН-2008»

канд. техн. наук *В.А.ЛИХОМАНОВ*, мл. науч. сотр. *А.В.ЧЕРНОВ*,  
науч. сотр. *Н.А.КРУПИНА*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: olks@aari.nw.ru

*В статье представлено описание методики и оборудования для проведения натурных полномасштабных экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки на судно. Эти эксперименты были выполнены ГНЦ РФ ААНИИ при участии сотрудников ВНИИОкеангеология в мае–июне 2008 г. по заказу Shtokman Development AG на ледоколе «Капитан Николаев» в северо-восточной части Баренцева моря (в экспедиции «Штокман-2008»). Исследовалось взаимодействие с различными ледяными образованиями: ровным льдом, различными типами торосов, айсбергами. Для определения сил, действующих на судно, применялись две измерительные системы, основанные на различных физических принципах. Первая система позволяла фиксировать изменение кинематических параметров движения судна в процессе взаимодействия. Вторая система позволяла измерить общий изгиб судна в вертикальной плоскости с помощью тензометрии. По договору с заказчиком проекта все полученные данные являются коммерческой тайной, поэтому в статье приведены только некоторые качественные результаты выполненных исследований, без указания количественных характеристик.*

*Ключевые слова:* глобальная ледовая нагрузка, тензометрическая измерительная система, инерциальная измерительная система, уравнения движения судна, айсберг, торосистое образование.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, несмотря на многолетние усилия российских и зарубежных ученых, вопрос разработки достоверной методики расчета глобальных ледовых нагрузок на шельфовые сооружения все еще остается открытым. Так, в статье Тимко и Кроасдейла [8] приводятся результаты расчетов ледовых нагрузок для четырех сценариев взаимодействия девятнадцатью экспертами из различных стран. В работе показано, что наиболее изученным является воздействие ровного однолетнего льда на сооружение с вертикальными стенками. В этом случае оценки экспертов, сделанные по различным методикам, отличались не более чем в 2 раза. Причем большинство исследователей указали данные натурных измерений как основной источник информации для разработанных ими моделей расчетов. Случай воздействия торосистого льда на сооружение с наклонными стенками оказался самым сложным для оценки ледовых нагрузок – мнения экспертов существенно разошлись, и расчетные значения отличались более чем в 10 раз.

Такое положение вещей во многом связано с отсутствием данных натурных измерений, необходимых для верификации результатов теоретических расчетов. Эти эксперименты связаны с большими финансовыми и временными затратами, как при подготовке испытаний, так и при обработке и интерпретации полученной информации.

Одним из наиболее перспективных, на наш взгляд, подходов является измерение глобальных нагрузок на судно и последующий пересчет полученных результатов на сооружение. Такой подход обладает рядом преимуществ. Во-первых, в качестве аналога сооружения выступает судно – объект, сравнимый с ним по своим размерам, что исключает проблемы, связанные с влиянием масштабного эффекта. Во-вторых, судно взаимодействует с натурным льдом, двигаясь при этом в различных ледовых условиях, что, соответственно, позволяет имитировать различные сценарии взаимодействия сооружения с ледяными образованиями.

Первой попыткой натуральных экспериментов по определению глобальных нагрузок, действующих на судно при взаимодействии со льдом, являются серии испытаний, проведенных Канадским гидравлическим центром [6, 7]. В ходе экспериментов с помощью двух приборов MOTAN (MOTion ANalysis) фиксировались кинематические параметры судна в процессе удара. В дополнение к системе MOTAN, в носовой части судна была смонтирована система тензометрических датчиков, с помощью которой, по замыслу авторов, можно было восстановить параметры пятна контакта с ледяным образованием.

Работы по оценке глобальной ледовой нагрузки в рамках экспедиции «Штокман-2008» имеют схожий замысел. Сама идея использовать для оценки глобальных ледовых нагрузок специально оборудованное судно появилась в ААНИИ в 80-х гг. прошлого века. По мере ее разработки подбирались составляющие элементы измерительной системы, прорабатывались расчетные методы, методика проведения испытаний и алгоритмы обработки результатов. Фрагментарно методика была опробована во время предыдущих арктических экспедиций НЭС «Академик Федоров» в 2007 г. и НЭС «Михаил Сомов» в 2006–2007 гг. Аналогично работам канадских ученых, основным способом измерения глобальной ледовой нагрузки при описываемом подходе является измерение кинематических параметров движения судна, вызванного взаимодействием с ледяным образованием. При этом для повышения надежности измерений и снижения риска отказов в систему было включено два прибора, каждый из которых измерял по шесть компонент движения судна независимо друг от друга.

Серьезным отличием от методологии, разработанной и используемой в Канадском гидравлическом центре, и, по нашему мнению, преимуществом является применение тензометрии для измерения напряжений в корпусных конструкциях при общем изгибе судна вследствие взаимодействия с ледяным образованием. Тензометрические датчики были установлены вдоль борта на баковой палубе, что позволило с помощью конечно-элементного анализа определить значение вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки, не прибегая к восстановлению размеров пятна контакта и распределения контактного давления. Кроме того, такой подход к применению тензометрии позволил продублировать измерение вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки еще одним, физически независимым способом.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Основной задачей проведенных экспериментов являлось определение глобальной силы, действующей на судно при его взаимодействии с ледяными образованиями. Для этой цели были использованы два измерительных комплекса: тензометрический и инерциальный, основанные на разных физических принципах. Главным критерием оценки корректности методик проведения экспериментов и обработки полученной информации, а также достоверности результатов может быть совпадение величины и характера изменения вертикальной силы, определенной разными способами. Далее приведено описание принципов, на которых основано применение обоих измерительных комплексов.

### Инерциальный измерительный комплекс

Базовой идеей теоретического обоснования использования инерциального измерительного комплекса было то, что движение судна при соударении со льдом можно рассматривать как движение твердого тела с шестью степенями свободы. Соответственно, кинематические параметры такого движения являются зависящим от времени вектором шести компонент (продольное, поперечное и вертикальное перемещения центра тяжести судна и три угловых перемещения: углы крена, дифферента и рыскания), а также первыми и вторыми производными этого вектора по времени (т.е. линейные и угловые скорости и ускорения). Соответственно, движение судна может быть описано системой обыкновенных дифференциальных уравнений, которые связывают кинематические параметры с главным вектором сил и главным моментом.

В основе дифференциальных уравнений движения судна лежат уравнения из теории маневренности и качки судна [2, 4, 5], в которые дополнительно включены выражения для сил, действующих на судно со стороны льда, и моментов этих сил. В целом система уравнений включает: три уравнения второго порядка, которые описывают рыскание и продольное и поперечное перемещения судна; два уравнения второго порядка килевой качки; уравнение второго порядка бортовой качки. Дифференциальные уравнения движения судна учитывают: силу тяжести судна; силу, действующую на судно со стороны льда; упор винта; гидродинамические силы на корпусе, включая гидростатические силы, инерционные и демпфирование.

Традиционно такая система дифференциальных уравнений используется для расчета параметров движения судна при известных силах и моментах, действующих на него. Однако в данном случае решается обратная задача. Все параметры движения – линейные и угловые ускорения, скорости и перемещения – являются результатами измерений в ходе экспериментов, а расчетными являются компоненты главного вектора силы и момента.

Для решения задачи определения внешних сил было подготовлено специальное оборудование, позволяющее измерять линейные ускорения и угловые скорости в процессе проведения эксперимента. Остальные параметры, а именно:

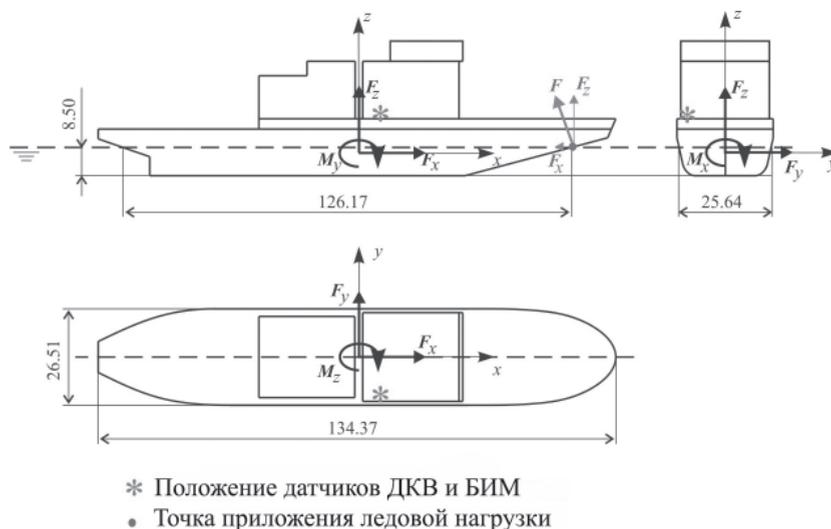


Рис. 1. Схема ледокола «Капитан Николаев» с указанием главных размеров, используемой системы координат и направлениями действия главных сил и моментов

линейные и угловые перемещения, линейные скорости и угловые ускорения — являются расчетными величинами и могут быть получены в результате первичного анализа данных измерений. С помощью дополнительных устройств также измерялись параметры пропульсивного комплекса.

Принятое при анализе данных измерений направление осей координат и направление компонента вектора действующих сил и моментов показано на рис. 1.

### Тензометрический измерительный комплекс

Традиционно при измерении ледовых нагрузок на судах и сооружениях тензометрия используется для определения локальных нагрузок. При этом тензодатчиками оборудуется район корпуса, непосредственно контактирующий со льдом. При таком подходе возможно восстановление параметров нагрузки, действующей в месте установки оборудования. В экспериментах на ледоколе «Капитан Николаев» был реализован принципиально другой подход к использованию тензометрии.

Основным положением этого подхода является тот факт, что при взаимодействии с ледяными образованиями на носовую оконечность судна действует вертикальная сила, которая приводит к общему изгибу судна в вертикальной плоскости, в результате чего в корпусных конструкциях возникают дополнительные напряжения и деформации. Измерение этих деформаций позволяет оценить вертикальную компоненту глобальной ледовой нагрузки, не прибегая к восстановлению параметров локальной нагрузки. По мнению авторов, такой подход целесообразен, поскольку при взаимодействии судна с торосом возникает большая неопределенность с количеством пятен контакта, их положением и размерами.

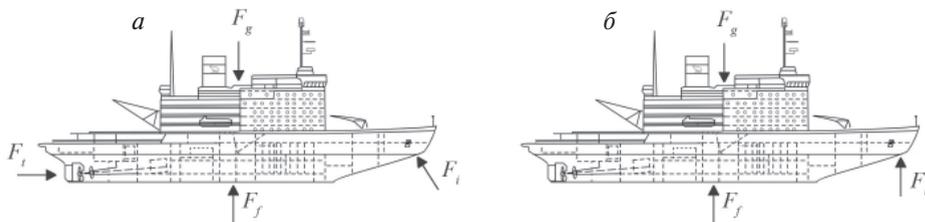


Рис. 2. Схема сил, действующих на судно при движении во льду

На рис. 2 а схематично показано распределение сил, действующих на судно при взаимодействии со льдом: силы тяжести ( $F_g$ ), силы поддержания ( $F_j$ ), ледовой силы ( $F_i$ ) и упора винта ( $F_v$ ). Однако сжимающие напряжения, вызванные действием горизонтальной составляющей ледовой нагрузки и упором винта, существенно меньше изгибных напряжений. Поэтому при анализе результатов можно использовать упрощенную схему сил, показанную на рис. 2 б, где на судно действуют 3 силы: сила тяжести, сила поддержания и вертикальная компонента ледовой силы.

### Перечень измеряемых параметров

Суммируя все вышесказанное, можно составить перечень параметров, которые измеряются в ходе каждого эксперимента на судне, а именно:

- кинематические параметры движения судна: 3 угловые скорости и 3 линейных ускорения;
- напряжения в корпусных конструкциях при общем изгибе судна;
- параметры винторулевого комплекса судна: обороты винтов; угол перекладки руля.

Применение нескольких различных измерителей для фиксирования одних и тех же параметров существенно повышает надежность полученной информации.

Все измерения ведутся непрерывно на протяжении всего эксперимента с частотой опроса датчиков не менее 100 Гц. Использование высокой частоты дискретизации дает возможность минимизировать погрешности при обработке результатов.

Дополнительно, непосредственно перед экспериментом, должен выполняться комплекс ледоисследовательских работ, целью которого является определение массогабаритных характеристик ледяного образования, его внутреннего строения и прочностных свойств.

#### ЛЕДОКОЛ «КАПИТАН НИКОЛАЕВ»

Ледокол «Капитан Николаев» (рис. 3 а) спроектирован и построен фирмой Wärtsilä (Финляндия, Хельсинки) в 1978 г. под надзором Морского регистра СССР (ныне Российский морской регистр судоходства). В 1990 г., по инициативе финских кораблестроителей, ему была заменена носовая часть. Новая носовая оконечность получила форму, близкую к форме усеченного конуса. Чертеж ватерлиний в этом районе корпуса представлен на рис. 3 б.

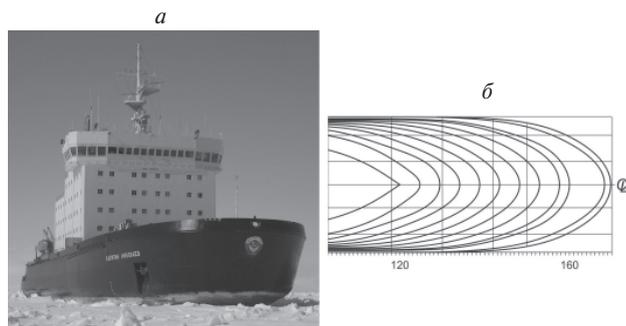


Рис. 3. Ледокол «Капитан Николаев»: общий вид (а) и ватерлинии в носовой оконечности (б)

Как отмечалось в докладе Гудошникова и др. [1], представленном на конференции РАО-2007, именно это судно является наиболее подходящим для проведения экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки. Его отличительной особенностью является нетрадиционная форма носовой оконечности, имеющая форму, близкую к обратному конусу. Ширина ледокола составляет 26,9 м (табл. 1).

Таблица 1

Параметры ледокола «Капитан Николаев»

Постройка	Wärtsilä, 1978 г.
Классификационное общество	Российский Морской Регистр Судоходства
Категория ледовых усилений	ЛЛЗ
Скорость на чистой воде, узлы:	19,2
Длина наибольшая, м	134,80
Длина между перпендикулярами, м	121,15
Ширина, м	26,69
Высота борта, м	12,30
Осадка, м	8,50
Водоизмещение, т	16017
Главная энергетическая установка:	
тип	дизель-электрическая
количество ГД	6
мощность каждого ГД, кВт	3040
Винты:	
количество и тип	3 ВФШ
диаметр, мм	4300

Можно считать, что имеет место аналогия между взаимодействием ледяного образования с носовой частью этого судна и взаимодействием с шельфовым сооружением, имеющим коническую форму в районе ватерлинии. Соответственно, механизм разрушения льда при взаимодействии с судном, аналогичен процессам, происходящим при взаимодействии льда с сооружением. Следовательно, можно предположить отсутствие влияния масштабного эффекта.

## **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СУДНО**

### **Тензометрический измерительный комплекс**

В качестве системы, позволяющей провести измерение вертикального усилия, был использован многоканальный измерительный тензометрический комплекс, позволяющий измерять деформации при общем изгибе корпуса судна в вертикальной плоскости.

Основным компонентом многоканального измерительного тензометрического комплекса являлась тензометрическая станция производства компании National Instruments Corporation (США). Станция включала в себя 5 модулей NI cRIO-9237. Каждый модуль имеет 4 одновременно опрашиваемых аналоговых входа, при этом частота опроса может варьироваться от максимального значения 50 кГц до минимального – 1,614 кГц. Каждый канал допускает подключение тензодатчиков по схемам «полный мост» и «полумост». Рабочий температурный диапазон станции от  $-40$  до  $+70$  °С. Модули NI cRIO-9237 штатно установлены на реконфигурируемое 8-слотовое шасси модели NI cRIO-9102. Тензостанция управляется встроенным контроллером модели NI cRIO-9012, с тактовой частотой процессора 400 МГц, с объемами оперативной и энергонезависимой постоянной памяти 64 и 128 Мб соответственно. Объем памяти позволяет вести непрерывную запись с 20 каналов на протяжении 3 часов. Для обмена информацией контроллер поддерживает Ethernet, USB и RS-232 интерфейсы. Рабочий температурный диапазон контроллера от  $-40$  до  $+70$  °С. В тензостанцию встроен источник постоянного напряжения 24 В серии LOGO Power производства компании Siemens, включающий блок бесперебойного питания с аккумуляторным модулем. Внешний вид тензометрической станции представлен на рис. 4.



Рис. 4. Тензометрическая станция и управляющий компьютер

Для управления тензометрической станцией, регистрации данных и их последующей обработки был разработан специальный управляющий программный комплекс. Данное программное обеспечение позволяет осуществлять выбор каналов для записи, устанавливать частоту опроса каналов, производить запуск записи, сохранять и осуществлять экспорт данных в общедоступные форматы. Запуск записи может быть цифровой, аналоговый триггерный, по таймеру или по запросу оператора.

### Инерциальный измерительный комплекс

Для определения кинематических параметров судна в процессе удара о лед были использованы два прибора: ДКВ-21 и БИМ-003.12, каждый из которых состоял из трех акселерометров и трех измерителей угловых скоростей (гироскопов), размещенных ортогонально друг другу. Акселерометры измеряют общее ускорение (включая компоненту силы тяжести) вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  судна. Гироскопы измеряют три компоненты угловой скорости вращения судна вдоль мгновенных положений осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Ниже приведено более детальное описание приборов, а на рис. 5 показан их внешний вид.

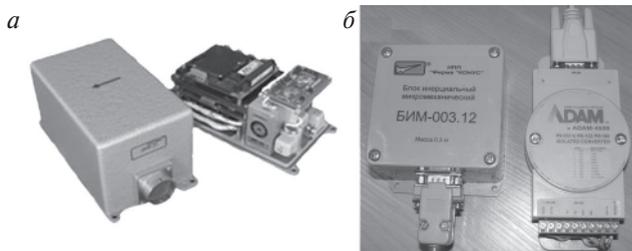


Рис. 5. Прибор ДКВ-21<sup>1</sup> (а) и прибор БИМ-003.12 (б)

Прибор ДКВ-21 производства ОАО АНПП «Темп-Авиа» (Россия) для определения кинематических параметров движения судна. Прибор осуществляет измерение проекций векторов линейного ускорения и угловой скорости на ортогональные оси связанной системы координат подвижного объекта. В качестве чувствительных элементов используются прецизионные акселерометры и оптоволоконные гироскопы.

Технические характеристики:

- диапазон измерения угловых скоростей – до 300 град/с с погрешностью 0,1 %;
- диапазон измерения ускорения – до 4g;
- средняя наработка на отказ – 5000 ч;
- время готовности – 3 мин;
- время непрерывной работы – 12 ч;
- выходной сигнал – аналоговый.

Сигналы с датчика поступали на вход установленной в переносном компьютере многофункциональной платы DAQCard-6062E производства National Instruments Corporation (США). Плата обеспечивала аналогово-цифровое преобразование сигнала и имела следующие технические характеристики: количество входных каналов – до 16, частота опроса каналов – до 500 тыс. считываний в секунду, разрешение – 12 бит. Программное обеспечение измерительной системы, обеспечивающее сбор и запись данных, а также их отображение в ходе испытания, состояло из программы VI Logger версии 1.0.1, выполнявшейся в среде Measurement & Automation Explorer версии 2.2.0.3010 (поставщик – National Instruments Corporation, США).

Прибор БИМ-003.02 производства научно-производственного предприятия ООО «Фирма «КОНУС» (Россия) для определения кинематических параметров движения судна. Прибор осуществляет измерение проекций векторов линейного ускорения и угловой скорости на ортогональные оси связанной системы координат подвижного объекта. В качестве чувствительных элементов используются прецизионные акселерометры и микромеханические гироскопы. Технические характеристики:

<sup>1</sup> Фотография скопирована с интернет-сайта компании ОАО АНПП «Темп-Авиа» – [www.temp-avia.ru](http://www.temp-avia.ru)

- диапазон измерения линейных ускорений – 0–100 м/с<sup>2</sup>;
- погрешность измерений линейных ускорений – не более 0,1 м/с<sup>2</sup>;
- скорость углового разворота – 0–300 угл. град/с;
- погрешность измерений угловой скорости – не более 1,0 угл. град/с;
- канал передачи информации – RS-485; частота выдачи информации – 100 Гц;
- диапазон рабочих температур от –40 до +50 °С;
- ресурс – 150 тыс. ч;
- напряжение питания 10–15 В; средняя потребляемая мощность – 6,0 Вт;
- габаритные размеры – 80×80×60 мм; масса – 0,2 кг.

#### Дополнительное оборудование

При разработке методологии проведения экспериментов большое внимание уделялось дублированию измерений одних и тех же параметров различными способами с целью обеспечить максимальную достоверность полученных результатов. В частности, различными способами измерялись не только основные параметры, определение которых являлось главной задачей экспериментов, но и вспомогательные. Например, изменение скорости в горизонтальной плоскости имеет определяющее значение при расчете горизонтальной компоненты общей силы. В силу важности этой компоненты, в ходе экспериментов применялось несколько способов измерений горизонтальной скорости.

#### *Измерение горизонтальной скорости*

Первый способ – это расчет скорости по изменению географических координат. Для этого использовался GPS-приемник Garmin-72, позволяющий ежесекундно фиксировать координаты судна. Учитывая, что погрешность измерений географических координат с помощью такого GPS-приемника в высоких широтах может достигать 15–20 м, применялись и другие, более точные способы измерения скорости судна.

Второй способ – это определение скорости по обработке видеосъемки разметки на льду. Разметка выполнялась во время работ на ледовой станции с помощью флагов и/или нанесения меток краской непосредственно на поверхности льда или снега вдоль предполагаемого маршрута движения судна. Все точки разметки имели геодезическую привязку, следовательно, с точностью до сантиметра было известно их взаимное расположение. В ходе эксперимента, с помощью видеокамеры, установленной на баковой палубе судна и ориентированной перпендикулярно направлению движения, выполнялась видеосъемка движения судна вдоль размеченного участка. Для расчета скорости видеозапись раскладывалась на отдельные кадры. На рис. 6 проиллюстрирован процесс вычисления скорости движения ледокола в горизонтальной плоскости. На рис. 6 *а* представлен началь-

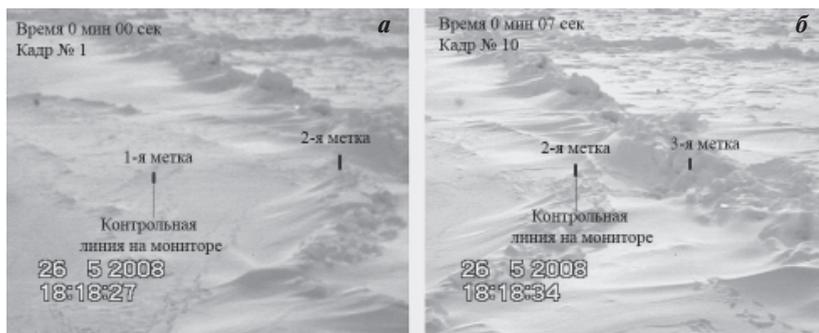


Рис. 6. Иллюстрация определения скорости движения ледокола с помощью разметки на льду и видеосъемки: кадры, соответствующие прохождению первой метки (*а*) и второй метки (*б*)

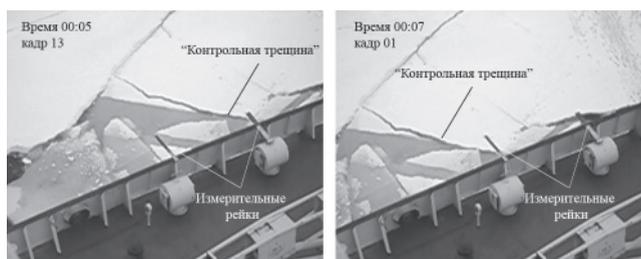


Рис. 7. Иллюстрация определения скорости движения ледокола с помощью бортовых реек и видеосъемки

ный момент записи, когда с контрольной линией на экране совпадает первая метка на льду, а на рис. 6 б с контрольной линией совпадает вторая метка. Учитывая, что видеосъемка производилась с частотой 25 кадров в секунду, временной промежуток между этими кадрами составил 7,4 с. По данным геодезической привязки расстояние между 1-й и 2-й метками – 9,8 м, соответственно, скорость ледокола на этом участке – 1,32 м/с. Такой способ надежно работает в случае, если судно движется строго параллельно разметке на льду. При отклонении от заданного курса погрешность измерения скорости значительно возрастает.

Третий способ – это определение скорости путем цифровой обработки видеосъемки измерительных реек, закрепленных на фальшборте перпендикулярно борту судна, – хорошо зарекомендовавший себя метод «планширного лага». Как и во втором способе, видеосъемка разбивалась на отдельные кадры, и фиксировалось время, за которое между рейками проходил какой-нибудь неподвижный ориентир на льду: трещина, след, кусок льдины и т.д. На рис. 7 показаны два кадра, временной промежуток между которыми составил 1,6 с (для этой видеокамеры частота кадров в секунду равна 30). За это время «контрольная трещина» проходит вдоль борта судна от одной рейки до другой. Учитывая, что расстояние на льду, которое видно с места установки видеокамеры, составляло 4,2 м, рассчитанная скорость движения ледокола – 2,6 м/с. Этот способ можно применять в случае, если контрольные метки на льду остаются неподвижными во время движения судна вдоль них. А также только в случае движения судна в ровном льду, так как при наличии торосов под бортом изменяется расстояние от измерительных реек до поверхности льда, что в свою очередь изменяет расстояние, которое видно на льду между рейками, и, следовательно, ведет к ошибкам в расчете скорости.

Как правило, в ходе экспериментов, для повышения надежности полученных данных, скорость измерялась двумя способами: с помощью GPS и с помощью одного из видеометодов. Однако стоит отметить, что скорости, рассчитанные с помощью описанных выше методов, использовались, в первую очередь, для определения скорости движения судна непосредственно перед началом взаимо-

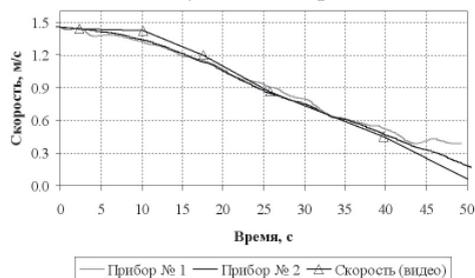


Рис. 8. Сопоставление скоростей движения ледокола, измеренных разными способами

действия с ледяным образованием, а далее скорости рассчитывались по измеренным ускорениям в горизонтальной плоскости. Дело в том, что в процессе взаимодействия судно отклонялось от первоначального курса и переставало двигаться параллельно разметке на льду, что существенно влияло на точность определения скорости по способу № 2. Однако в некоторых случаях было возможно сопоставление скорости, измеренных разными способами. В качестве примера на рис.8 представлено изменение скорости ледокола в одном из экспериментов. Наблюдается достаточно хорошее совпадение скорости, определенной по видеосъемке, и скоростей, рассчитанных по измеренным ускорениям судна.

#### *Определение параметров работы винто-рулевого комплекса и ЭУ*

Измерения параметров работы винто-рулевого комплекса и ЭУ ледокола включали измерения оборотов гребных винтов и угла перекладки руля.

К сожалению, для измерений параметров, характеризующих работу пропульсивного комплекса, не было возможности установить специализированное оборудование. Поэтому для получения информации о его работе был использован метод видеосъемки показаний соответствующих приборов на рулевом мостике ледокола во время проведения экспериментов.

Для решения уравнений движения судна необходимо значение суммарного упора винтов. Эти значения вычислялись с помощью зависимостей упора винтов от оборотов и скорости движения судна, которые входят в комплект технической документации, имеющейся на судне. Вся необходимая информация была любезно представлена капитаном ледокола.

#### **Размещение оборудования на борту ледокола**

Инерциальные датчики были установлены на баковой палубе в лабораторном помещении вблизи центра тяжести судна на расстоянии 6,4 м в нос от мидель-шпангоута и 10 м от диаметральной плоскости по правому борту. Приборы были жестко скреплены между собой. Это было сделано для проверки достоверности полученных данных: в идеальном случае показания обоих приборов должны были совпасть.

Тензодатчики были установлены вдоль правого борта на баковой палубе. Только один был установлен в районе миделя на левом борту. Длина района расположения датчиков составляла около 50 м.

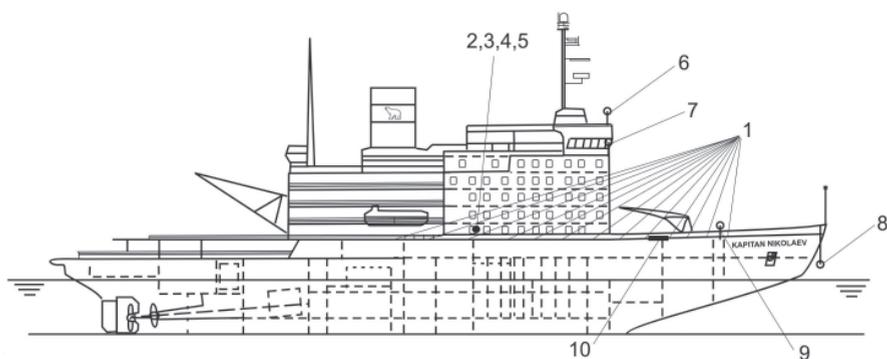


Рис. 9. Схема размещения измерительного оборудования на ледоколе «Капитан Николаев» во время экспериментального рейса:

1 — тензодатчики на баковой палубе для определения общего продольного изгиба судна (13 измерительных схем типа «мост» были установлены вдоль правого борта, а один — на левом борту в районе мидель-шпангоута); 2 — тензостанция; 3 — прибор ДКВ-21; 4 — прибор БИМ-003.02; 5 — GPS-антенна; 6 — видеокамера на пеленгаторной палубе; 7 — видеокамеры на ходовом мостике для фиксации измерения угла перекладки руля и оборотов винтов по судовым приборам; 8 — видеокамера, установленная под форштевнем; 9 — бортовая видеокамера; 10 — рейки, установленные на фальшборте, для измерения скорости судна в процессе взаимодействия с ледяным образованием

Видеокамеры, с помощью которых фиксировались изменения скорости движения судна в процессе взаимодействия с ледяным образованием и контролировались параметры работы винторулевого комплекса судна, располагались на ходовом мостике.

На рис. 9 показано размещение измерительного оборудования.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

### Тензометрическая измерительная система

Использование данных тензометрии во время экспедиции планировалось только для определения вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки. Основной принцип работы этого направления может быть сформулирован следующим образом: восстановление глобальной нагрузки по глобальным реакциям. Для этой работы на открытой баковой палубе ледокола была размещена группа тензорезисторов, разнесенных по длине судна. Всего было задействовано 8 каналов, их положение показано на рис.10.

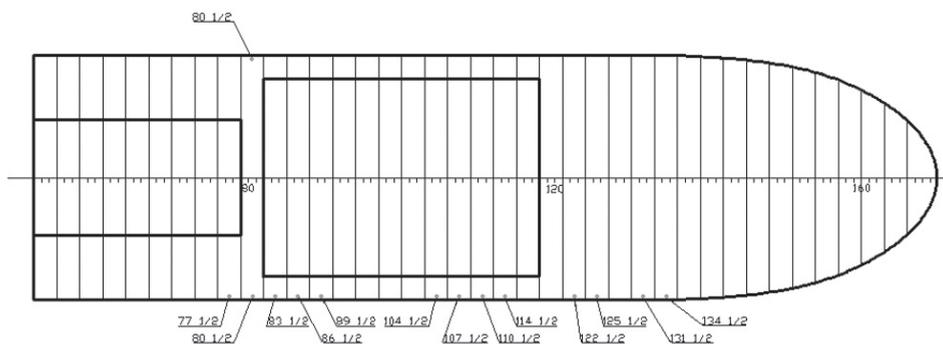


Рис. 10. Схема размещения тензодатчиков на баковой палубе ледокола «Капитан Николаев»

Процедура восстановления глобальной ледовой нагрузки по данным тензометрии сводится к последовательности:

- приведение показаний тензодатчиков к значениям напряжений;
- определение зависимости напряжений в точках размещения тензодатчиков от вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки;
- пересчет напряжений в точках в значение вертикальной компоненты.

Особенностью работы использованной тензометрической станции является регистрация показаний тензодатчиков в виде условной деформации, равной отно-

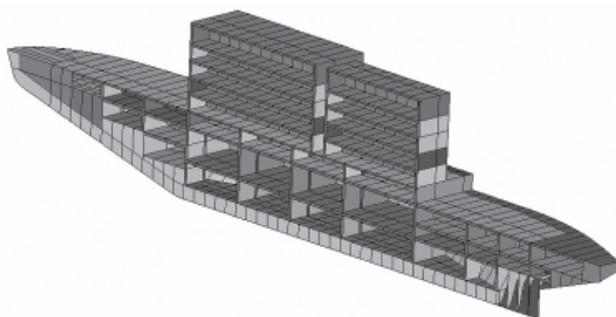


Рис. 11. Трехмерная конечно-элементная модель ледокола «Капитан Николаев»

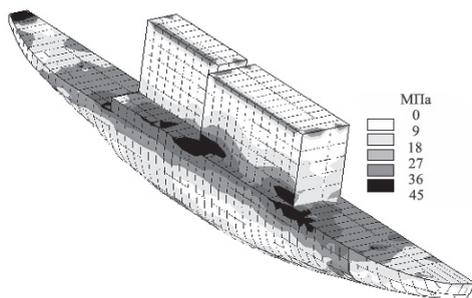


Рис. 12. Эквивалентные напряжения по Мизесу при приложении на носовом перпендикуляре силы, направленной вертикально вверх

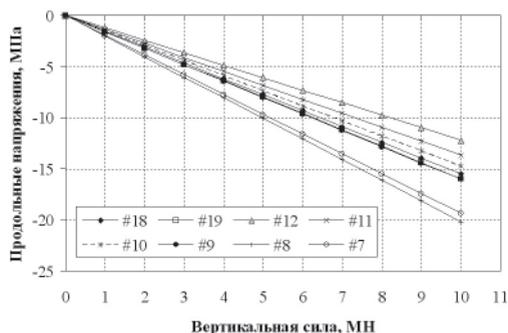


Рис. 13. Зависимость продольных напряжений от вертикального усилия на носовом перпендикуляре для точек установки тензодатчиков (в легенде указан номер датчика)

шению  $U/V$ , где  $V$  – падение напряжения,  $U$  – опорное напряжение. Для получения истинного значения деформации это значение необходимо домножить на коэффициент, зависящий от вида напряженно-деформированного состояния. Таким образом, значение напряжений в точках размещения тензодатчиков были получены по формуле:

$$\sigma_x = -E \frac{2}{GF} \cdot \frac{V}{U}.$$

Определение зависимости напряжений в точках размещения тензодатчиков было проведено с использованием конечно-элементного анализа. Была разработана 3D конечно-элементная модель ледокола «Капитан Николаев», учитывающая форму корпуса, характерные особенности конструкции, распределение сил веса и поддержания. Ее вид представлен на рис. 11. Взаимодействие с ледяным образованием моделировалось приложением вертикальной силы в районе носового перпендикуляра. В результате анализа была получена картина напряженно-деформированного состояния корпуса судна, показанная на рис. 12, а итогом анализа стало получение зависимостей вида для каждой точки размещения тензодатчиков. Эти зависимости носят линейный характер, показанный на рис. 13.

#### Инерциальная измерительная система

Как уже говорилось выше, в экспериментах использовались два функционально одинаковых, но различных по исполнению прибора для измерения линейных ускорений и угловых скоростей судна в процессе удара о лед. Так как приборы были жестко соединены, при нормальной работе приборов показания их должны быть очень близки. В качестве примера на рис. 14 приведены значения вер-

тикальных ускорений, зафиксированные двумя приборами во время одного из экспериментов. Можно видеть, что показания практически совпадают. Аналогичная картина наблюдалась и в других экспериментах и по другим измерительным каналам. Совпадение показаний двух приборов свидетельствует о корректной работе измерительного комплекса.

Упрощенная для решения данной задачи система уравнений движения судна имеет следующий вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} -\rho D(1+k_{11})\frac{dV}{dt} - C_T \frac{\rho}{2} V^2 S_w + T_E &= F_x, \\ -\rho D(1+k_{11})V\omega - C_{YR}^\alpha \left( \delta_R + c_2 \frac{\tilde{I}_{RM}L}{V} \omega \right) \frac{\rho}{2} V^2 A_{L\sigma} &= F_y, \\ (D + \lambda_{33})\frac{d^2z}{dt^2} + \mu_{33} \frac{dz}{dt} + \rho g A_w z &= F_z, \\ -I_{zz}(1+k_{66})\frac{d\omega}{dt} - C_{M\omega}^\omega \frac{\rho}{2} V A_{L\sigma} L^2 \omega - C_{YR}^\alpha I_{RM} \left( \delta_R + c_2 \frac{\tilde{I}_{RM}L}{V} \omega \right) \frac{\rho}{2} V^2 A_{L\sigma} &= M_z, \\ (I_{xx} + \lambda_{44})\frac{d^2\phi}{dt^2} + \mu_{44} \frac{d\phi}{dt} + DGM\phi &= M_x, \\ (I_{yy} + \lambda_{55})\frac{d^2\theta}{dt^2} + \mu_{55} \frac{d\theta}{dt} + DGM_L\theta &= M_y. \end{aligned}$$

В этих уравнениях искомыми величинами являются  $F_x, F_y, F_z$  – компоненты глобальной силы, действующей на судно со стороны льда;  $M_x, M_y, M_z$  – моменты силы, действующей на судно со стороны льда, относительно соответствующих осей.

Напрямую в ходе эксперимента измерялись:  $\frac{dV}{dt}$  – горизонтальное ускорение судна;  $\frac{d^2z}{dt^2}$  – вертикальное ускорение судна;  $\omega$  – угловая скорость вращения судна относительно вертикальной оси;  $\frac{d\phi}{dt}$  – угловая скорость вращения судна вокруг продольной оси;  $\frac{d\theta}{dt}$  – угловая скорость вращения судна вокруг поперечной оси.

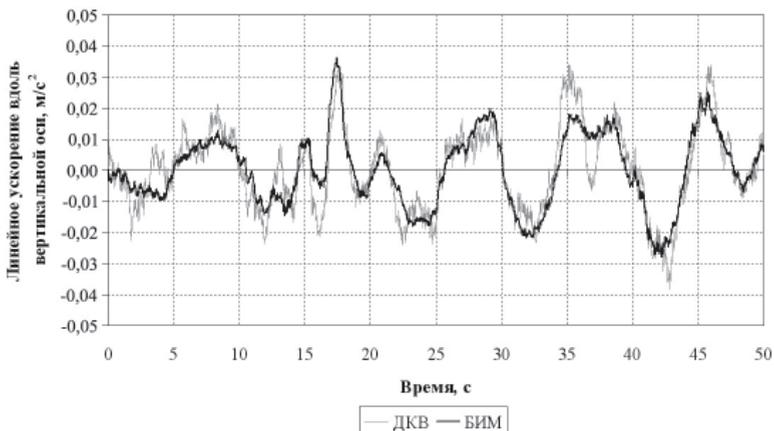


Рис. 14. Сопоставление исходных записей ускорений, полученных по двум приборам

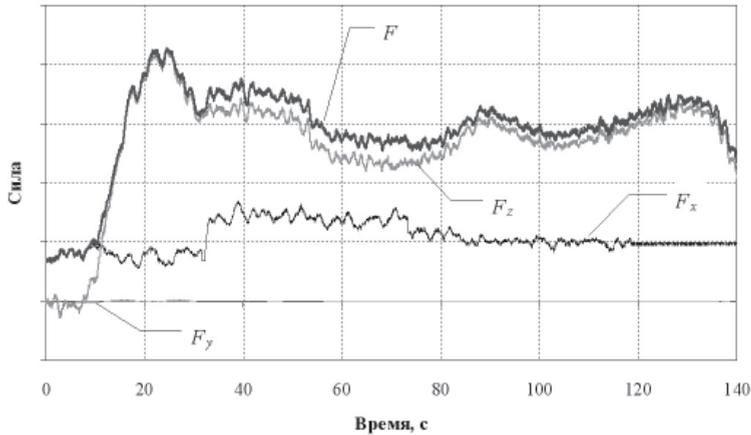


Рис. 15. Рассчитанные силы, действующие на судно при взаимодействии с торосистым образованием

С помощью операций численного интегрирования и дифференцирования измеренных угловых скоростей и линейных ускорений были получены:  $V$  – скорость судна в горизонтальной плоскости;  $\frac{dz}{dt}$ ,  $z$  – вертикальные скорость и перемещение судна;  $\frac{d^2\phi}{dt^2}$  – угловое ускорение вращения судна вокруг продольной оси;  $\phi$  – угол крена;  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$  – угловое ускорение вращения судна вокруг поперечной оси;  $\theta$  – угол дифферента. Тяга винта  $T_E$  рассчитывалась с помощью измеренных в эксперименте оборотов винтов и скорости судна. Остальные компоненты уравнений являются характеристиками судна, которые содержатся в нормативно-технической документации по судну либо рассчитываются по известным зависимостям [5].

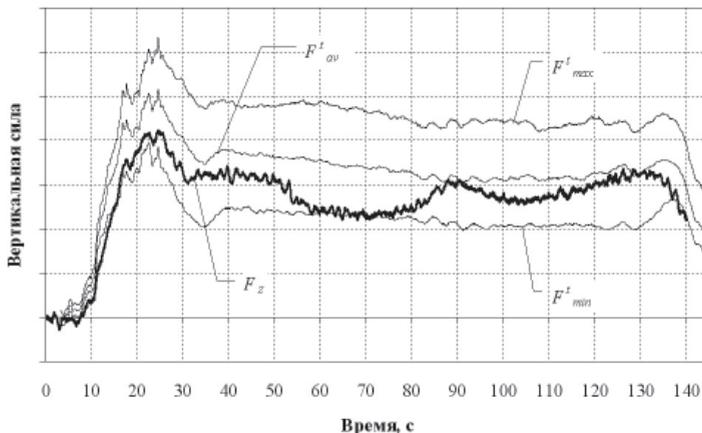


Рис.16. Сопоставление результатов расчета вертикальной компоненты силы по данным тензометрии ( $F'_{min}$  – оценка снизу,  $F'_{max}$  – оценка сверху,  $F'_{av}$  – среднее значение) и по данным инерциальных измерительных систем ( $F_z$ )

С помощью системы уравнений для каждого эксперимента были рассчитаны  $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$  в зависимости от времени. Суммарная нагрузка со стороны льда определялась как  $F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2}$ . В качестве примера на рис. 15 приведены результаты расчета сил для одного из экспериментов. В начале этого эксперимента на протяжении 10 секунд судно двигалось в ровном льду. На этом участке определяющей составляющей полной силы являлась продольная компонента. Далее произошел контакт с торосистым образованием, в результате которого ледокол начал «наползать» на торос, соответственно появилась дополнительная вертикальная сила, действующая на форштевень судна. Именно вертикальная компонента силы давала наибольший вклад в значение общей силы. Продольная компонента составляла от 30 до 50 % вертикальной компоненты. Такое соотношение между составляющими вектора полной силы объясняется особенностями геометрии носовой оконечности судна, а именно углом наклона форштевня. Поперечная же компонента силы была несоизмеримо мала по сравнению с двумя другими. Это связано с тем, что при взаимодействии с торосом ледокол двигался практически прямолинейно, соответственно вектор суммарной силы фактически лежал в диаметральной плоскости судна.

В качестве обоснования достоверности полученных результатов было проведено сопоставление значений вертикальной компоненты силы, действующей на носовую часть судна, рассчитанных по данным инерциальной измерительной системы и по данным тензометрии. В большинстве экспериментов наблюдалась хорошая корреляция между этими величинами на протяжении всего времени взаимодействия судна со льдом. Пример приведен на рис. 16.

## ВЫВОДЫ

По мнению авторов, метод оценки глобальных ледовых нагрузок, разработанный в ААНИИ и реализованный в экспедиции «Штокман-2008», полностью оправдал себя и может быть использован в дальнейшем при совершенствовании методов расчета ледовых нагрузок на суда и шельфовые сооружения. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Разработан и внедрен многофункциональный измерительный комплекс.

Разработана и апробирована методика проведения натуральных экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки при взаимодействии судна с различными типами ледяных образований.

Разработана и апробирована методика обработки полученных данных измерений.

Получены оценки глобальной нагрузки при взаимодействии судна с ледяными образованиями различных типов.

Надежность результатов подтверждается совпадением расчетных значений одних и тех же величин, оцененных по данным различных измерений. Поэтому авторы считают необходимым условием получения достоверных оценок при проведении аналогичных экспериментов использование как минимум двух физически независимых измерительных систем – кинематической и тензометрической, как это было сделано в экспедиции «Штокман-2008».

Весьма важным положительным отличием описываемых натуральных испытаний от экспериментов, проведенных канадскими учеными [7, 8], является то, что исследования глобальных ледовых нагрузок в экспедиции «Штокман-2008» проводились в комплексе с широким фронтом ледоисследовательских работ по программе, разработанной лабораторией «Арктик-шельф». Основным их результатом является определение массогабаритных характеристик ледяных образований, их внутреннего строения и прочностных свойств, необходимых для уточнения характеристик внешних сил, входящих в уравнения движения судна.

*Авторы выражают благодарность д-ру геогр. наук Зубакину, организатору и научному руководителю экспедиции, канд. геогр. наук Гудошникову Ю.П., возглавившему проведение натурных испытаний, а также канд. техн. наук Степанову И.В. и д-ру техн. наук Тимофееву О.Я. за помощь в разработке методик проведения экспериментов и обработки результатов.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудошников Ю.П., Тимофеев О.Я., Чернов А.В., Крупина Н.А. Экспериментальные исследования по оценке глобальных ледовых нагрузок в районе ШГКМ // Труды конференции РАО-07. СПб. 2007. Электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Мирохин Б.В., Жинкин В.Б., Зильман Г.И. Теория корабля. Л.: Судостроение, 1989. 352 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Т. 1. СПб., 2008. 500 с.
4. Справочник по строительной механике корабля / Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А., Чувиковский В.С. В 3 т. Т. 2. Пластины. Теория упругости, пластичности и получести. Численные методы. Л.: Судостроение, 1982. 464 с.
5. Справочник по теории корабля / Под редакцией Я.И.Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. 768 с. Т. 2. Статика судов. Качка судов. 440 с. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. 544 с.
6. Johnston M., Ritch R., Gagnon R. Comparison of impact forces measured by different instrumentation system on the CCGS Terry Fox during the Bergy Bit Trials // Cold Regions Science and Technology. Special issue: Bergy Bit Impact Trials. 52 (2008). P. 83–97.
7. Johnston M., Timco G.W., Frederking R., Miles M. Measuring global impact forces on the CCGS Terry Fox with an internal measurement system called MOTAN // Cold Regions Science and Technology. Special issue: Bergy Bit Impact Trials. 52 (2008). P. 67–82.
8. Timco G.W., Croasdale K.R. How well can we predict ice loads? Proceedings 18th International Symposium on Ice, IAHR06 (2006). Vol. 1. P. 167–174.

V.A.LIKHOMANOV, A.V.CHERNOV, N.A.KRUPINA

#### EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF GLOBAL ICE LOADS' ESTIMATION DURING THE EXPEDITION «SHTOKMAN-2008»

*The article contains detailed description of methods and the used equipment for full-scale experiments for estimation of global ice loads on ship. According to the commission of Shtokman Development AG AARI together with representatives of Oceanology Research Institute conducted the expedition «Shtokman-2008» in May-June, 2008 on board of the icebreaker «Kapitan Nikolaev» in the North-East part of the Barents Sea. The target was to define global ice load applied to the ship by ice formations, namely, level ice, hummocks, ridges and bergy bits. To define forces applied to the ship it was equipped with 2 measuring systems based on various physical principles. The first system allowed to fix changes of kinematic parameters of the ship movement during interaction. The second system allows to measure general bending of the ship in the vertical surface with a help of tensometry. Because of confidential policy, qualitative results of the research only are presented in the article, without any quantitative parameters.*

*Key words:* global ice load, tensometry measurement system, inertial measurement system, equations of ship motion, bergy bit, ridge

## К ВОПРОСУ О СТРОИТЕЛЬСТВЕ СНЕЖНОГО АЭРОДРОМА ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ КОЛЕСНЫХ САМОЛЕТОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АНТАРКТИДЕ, НА СТАНЦИИ ВОСТОК

*мл. науч. сотр. С.П.ПОЛЯКОВ, канд. геогр. наук Б.В.ИВАНОВ,  
канд. физ.-мат. наук А.В.КЛЕПИКОВ,  
канд. геогр. наук В.Д.КЛОКОВ, рук. РАЭ В.В.ЛУКИН,  
зам. нач. РАЭ В.Л.МАРТЬЯНОВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

*Экспериментальные исследования проводились при поддержке гранта РФФИ №08-05-00279 «Исследования процессов энергообмена в деятельном слое ледников прибрежных районов Антарктиды».*

*Станция Восток находится в центральной части материка, в зоне сухого снега. Максимальная температура поверхности снежного покрова, как правило, не превышает  $-25$  °С. Холодный снег плохо поддается искусственному уплотнению, что является основной проблемой при строительстве ВПП в таких районах.*

*Основная цель данной работы – исследование изменений физико-механических свойств снега поверхности существующей ВПП ст. Восток при различных механических воздействиях на нее.*

*Механические воздействия на снег оказывались с помощью штампových испытаний в диапазоне давлений от 0,05 до 1,5 МПа. После воздействия регистрировались изменения прочности, твердости, плотности, текстуры и структуры снежного покрова, а также измерялась пластическая деформация и оценивалась глубина воздействия на снежный покров.*

*Выявлен ряд интересных закономерностей, в том числе изменение прочности снежного покрова во времени, после механического воздействия. Так, через трое суток прочность снежного покрова, подверженного механическому воздействию, возросла примерно в полтора раза по сравнению с тем, что было непосредственно через три часа после механического воздействия. Получены значения оптимальных давлений на поверхность снега для достижения прочности покрытия, достаточного для посадки Ил-76ТД. Выявлены структурные изменения снега после различных механических воздействий на него. Полученные экспериментальные данные позволят создать теоретическую модель уплотнения холодного снега.*

*Ключевые слова:* снежный аэродром, пластическая деформация, механическое уплотнение, штампové испытания, уплотнение снега,

### ВВЕДЕНИЕ

Представленная ниже работа проводилась с целью исследования возможности создания аэродрома на внутриконтинентальной станции Восток (Центральная Антарктида), пригодного для эксплуатации тяжелых самолетов на колесном шасси, типа Ил-76ТД. Актуальность данной тематики связана с большим интересом со стороны научного сообщества к исследованиям в центральной части Антарктического материка. При этом многие, и не только российские научные группы, базируются на расположенной в центральной части Антарктиды станции Восток. Все больший оборот грузов и специалистов через эту станцию заставляет задуматься о возможности использования имеющегося на станции снежного аэродрома для посадки тяжелых колесных самолетов, например, таких, как Ил-76ТД.

Экспедиционные работы на станции Восток проводились в течение 2 летних сезонов – 52-й и 53-й РАЭ. За основной метод воздействия на существующую взлетно-посадочную полосу (ВПП) был принят метод механического уплотнения снежной поверхности, как наиболее легко осуществимый и экономически менее затратный.

Основная цель данной работы – исследование изменений физико-механических свойств поверхности существующей ВПП станции Восток при различных механических воздействиях на нее. Исследования проводились с помощью штамповых испытаний в нескольких зонах ВПП, охватывающих весь диапазон физико-механических свойств существующей ВПП.

#### МЕТОДИКА РАБОТЫ

На первом этапе работ было проведено исследование современного состояния существующей ВПП. По всей площади поверхности ВПП были проведены измерения твердости, прочности на одноосное сжатие и плотности снежного покрова на разных горизонтах до глубины 1 м. Определение твердости снежного покрова приведено в работе [1]. Также был проведен текстурно-структурный анализ снега. Твердость покрытия, осредненная как по всей площади, так и по всем горизонтам до глубины 1 м, измерялась с помощью стандартного конического пенетromетра с энергией разрушения 8,5 Дж, диаметром наконечника 12 мм и углом атаки 30°, составила 0,44 МПа. Прочность на одноосное сжатие измерялась с помощью гидравлического пресса и аналогично осредненная по всей ВПП составила соответственно 0,41 МПа. Ниже, говоря о прочности снежного покрова, мы будем подразумевать прочность на одноосное сжатие. Средняя плотность снежного покрова ВПП составила 500 кг/м<sup>3</sup>. Средний размер зерна снежного покрова ВПП составил 0,2 мм. На глубине от 40 до 60 см был обнаружен слой глубиной изморози толщиной около 5 см. Размер снежных зерен в этом слое достигал 2 мм, а твердость данного слоя не превышала 0,1 МПа.

На основании представленных выше результатов можно сделать вывод, что в существующем на сегодняшний день виде ВПП по качеству покрытия не пригодна для приема тяжелых колесных самолетов типа Ил-76ТД (для Ил-76ТД прочность покрытия ВПП должна быть не менее 1,0 МПа).

С помощью пенетromетра на существующей ВПП были выбраны 5 площадок для проведения штамповых испытаний. Площадки выбирались таким образом, чтобы охватить весь диапазон физико-механических характеристик снежного покрытия, имеющийся на ВПП, при этом минимальная твердость покрытия составила 0,2 МПа, максимальная – 0,8 МПа. В качестве штампов использовались металлические пластины толщиной 10 мм и площадью соответственно 650 и 1500 см<sup>2</sup>. В качестве упора гидравлического домкрата, которым приводились в движение штампы, использовалась цистерна с топливом на санях, общим весом более 30 т.

На каждой из выбранных площадок было проведено не менее 5 штамповых испытаний с различным давлением на снежную поверхность. Диапазон давлений от 0,1 МПа до 1,6 МПа. После каждого штампового испытания измерялась глубина пластической деформации снежной поверхности, а также изменения физико-механических характеристик снежного покрова в зоне действия штампа.

Изменение твердости покрытия измерялось как сразу после механического воздействия, так и по прошествии некоторого времени – от нескольких часов до нескольких дней. Измерение плотности и прочности, а также текстурно-структурный анализ в зоне действия штампа проводились по прошествии не менее 3 суток после воздействия, по выбуренным кернам.

Для исключения масштабного эффекта изменение твердости покрытия дополнительно было исследовано с помощью эксперимента «штамп в штамп». Сначала снежный покров уплотнялся штампом большей площади, а затем по проше-

ствии 3 суток в это место внедрялся штамп меньшей площади. Таким образом нам удалось оценить несущую способность уплотненной поверхности в масштабе, сравнимом с размером отпечатка колеса шасси самолета Ил-76ТД.

Все работы по штамповым испытаниям проводились на ВПП в дневное время. Средняя температура поверхности снега за период работ составила  $-27^{\circ}\text{C}$ , с отклонениями в обе стороны не более  $3^{\circ}\text{C}$ . Температура снега на глубине 1 м за весь период работ была практически постоянной и составляла около  $-40^{\circ}\text{C}$ .

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведен полный комплекс измерений физико-механических характеристик снежного покрова ВПП до и после воздействия штампом на всех 5 выбранных площадках. В табл. 1 указаны градации твердости покрытия, по которым были выбраны площадки для штамповых испытаний, а также значение пластических деформаций в мм, вызванных различным давлением от штампа для разных площадок.

Скорость пластической деформации при штамповых испытаниях не превышала 0,02 м/с, при этом разрушительной деформации не наступало [3].

Глубину воздействия штампа на снежный покров определенной твердости можно определить по изменению плотности и прочности на одноосное сжатие толщи ВПП после воздействия штампом. На рис. 1 представлено изменение плотности и прочности снежного покрова после воздействия штампом с давлением

Таблица 1

Значение пластических деформаций в мм, вызванных на разных площадках штампом с различным давлением

№ площадки, твердость покрытия	Давление штампа, МПа	Деформация, мм
№ 1, тв. покр. – 0,2 МПа	0,2	12
	0,4	30
	0,6	45
	0,8	75
	1,0	140
№ 2, тв. покр. – 0,4 МПа	0,2	10
	0,4	20
	0,6	40
	0,8	60
	1,0	115
№ 3, тв. покр. – 0,5 МПа	0,2	5
	0,4	15
	0,6	25
	0,8	50
	1,0	85
№ 4, тв. покр. – 0,65 МПа	0,2	3
	0,4	5
	0,6	10
	0,8	15
	1,0	25
№ 5, тв. покр. – 0,8 МПа	0,2	2
	0,4	3
	0,6	5
	0,8	8
	1,0	15

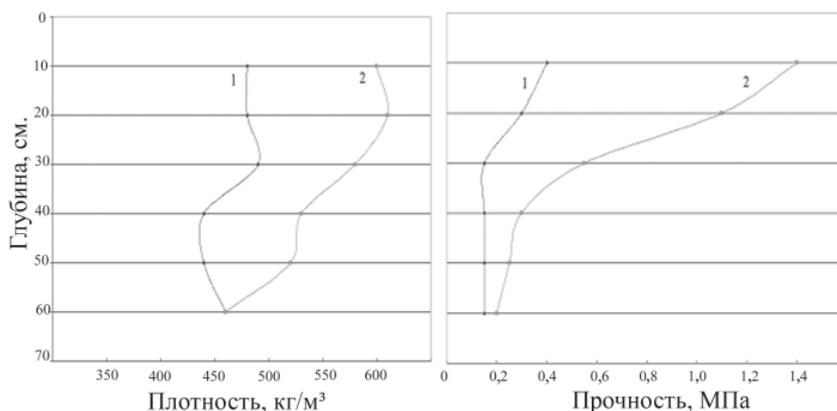


Рис. 1. Изменение прочности и плотности снежного покрова после воздействия штампом с давлением 1,3 МПа на площадке № 2: 1 – до воздействия, кривая 2 – после воздействия штампом на снежный покров

1,3 МПа и соответственно вертикальной пластической деформацией 165 мм на площадке № 2, твердость покрытия которой соответствует средней твердости покрытия всей существующей ВПП.

Из данного рисунка нетрудно заметить, что глубина воздействия при таком давлении достигла 50 см, а также сделать предположение об уменьшении вертикальных напряжений в толще ВПП. В частности, можно предположить, что поскольку ниже определенного горизонта плотность и прочность снежного покрова не меняются, то вертикальные напряжения на данном горизонте меньше прочности покрытия.

Также на площадке № 2 было проведено несколько опытов «штамп в штамп». При таких испытаниях исключается масштабный эффект, так как площадь штампа сравнима с площадью пятна от колеса шасси самолета Ил-76ТД. В точке № 1 большим штампом было оказано воздействие с давлением 0,75 МПа, а в точке № 2 соответственно 0,5 МПа. По прошествии 3 суток на снежный покров в обеих точках было оказано воздействие штампом меньшей площади с давлением 1,2 МПа. Давление 1,2 МПа было выбрано не случайно. Покрытие ВПП, выдерживающее такое давление, гарантированно достаточно для посадки Ил-76ТД. В точке № 1 деформация поверхности пренебрежимо мала (менее 5 мм), в то время как в точке 2 деформация покрытия составила 165 мм, что недопустимо для колесного самолета типа Ил-76ТД. Здесь нужно отметить, что скорости деформаций снега от колеса шасси самолета практически будут равны скорости самого самолета при посадке и, соответственно, явно превысят порог перехода в зону разрушительных деформаций. При разрушительной деформации будет происходить выброс снега из-под колес шасси самолета, и, соответственно, при тех же нагрузках глубина колеи может быть в несколько раз больше. С другой стороны, очень важно, что при посадке или взлете самолета на снежный покров оказываются кратковременные нагрузки с очень большой скоростью нагружения и в этом случае в снежном покрове не успевают развиваться пластические деформации, которые развиваются при штамповых испытаниях с аналогичным давлением. Пластические деформации покрытия при большей скорости нагружения, соответствующей воздействию колеса шасси самолета, будут меньше, чем деформации при штамповом испытании с аналогичным давлением. Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что минимальное необходимое давление для уплотнения ВПП находится в интервале 0,5–0,75 МПа.

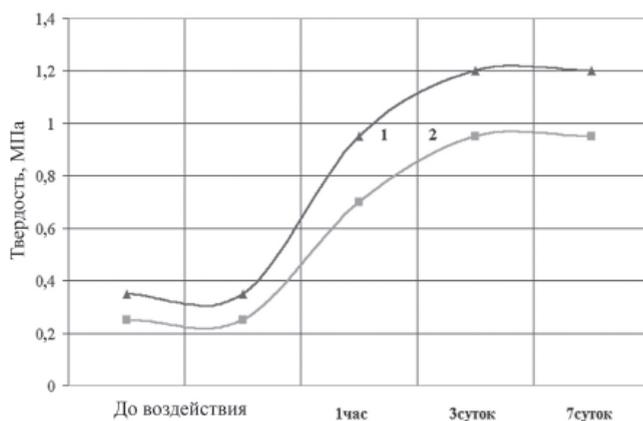


Рис. 2. Изменение твердости покрытия ВПП после воздействия штампом с определенным давлением в течение времени: 1 – давление штампа 1,0 МПа на площадке № 2, 2 – давление штампа 0,8 МПа на площадке № 1

Также были проведены эксперименты по определению изменений твердости покрытия ВПП во времени после воздействия штампа. Результаты таких измерений представлены на рис. 2.

Сразу после уплотнения снега твердость покрытия может даже уменьшиться, что связано с разрушением механических связей между зернами снега, но с течением времени происходит смерзание зерен и твердость увеличивается, превышая исходную. Одним из результатов данного эксперимента можно считать установленный факт, что по истечении 3 суток после механического воздействия происходит почти полное смерзание зерен снега, после чего твердость покрытия практически не меняется.

В табл. 2 представлена обобщенная информация об изменении прочности и плотности поверхностного слоя снега под воздействием различных давлений штампа для средних исходных характеристик снега существующей ВПП. Как видно из таблицы, максимальное значение прочности снега, равное 3 МПа, было получено после давления штампом, равного 1,6 МПа. При этом плотность слоя снега достигла 660 кг/м<sup>3</sup>, а средний размер зерен снега уменьшился примерно в 1,5 раза после воздействия.

В районе ВПП станции Восток был организован полигон для определения снегонакопления. За период с января 2007 г. по январь 2008 г. снегонакопление в районе ВПП составило 42 мм, что соответствует среднемноголетним значениям [3].

Таблица 2

**Прочность  $\sigma$  и плотность  $\rho$  снега на поверхности ВПП, образовавшегося после воздействия давлением штампа  $P$  и соответствующей данному давлению деформации  $\epsilon$ , для средних исходных характеристик снега**

$P$ , МПа	$\epsilon$ , мм	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma$ , МПа
0,4	30	540	0,4
0,5	35	540	0,65
0,6	45	550	0,7
0,7	50	580	0,9
0,8	85	560	1,4
1,1	95	610	1,8
1,4	105	640	2,1
1,6	120	660	3,0

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из важных результатов данной работы мы считаем полученную зависимость глубины воздействия от давления штампа для разных характеристик снега. На рис. 3 представлена обобщенная кривая для средних характеристик снежного покрова ВПП, глубины воздействия на снежный покров от давления штампа.

Зная распределение прочности в толще снежного покрова и глубину воздействия для данного давления штампа, легко оценить затухание вертикальных напряжений в толще ВПП с глубиной. Фактически вертикальные напряжения, вызванные воздействием штампа, на горизонте снежной толщи ВПП, равной глубине воздействия для данного давления штампа, равны прочности снежного покрова на данном горизонте.

Данный вывод представляется важным, так как теоретический расчет затухания вертикальных напряжений в толще ВПП весьма затруднителен из-за неоднородности и вязкости среды, которую представляет собой снежная толща ВПП.

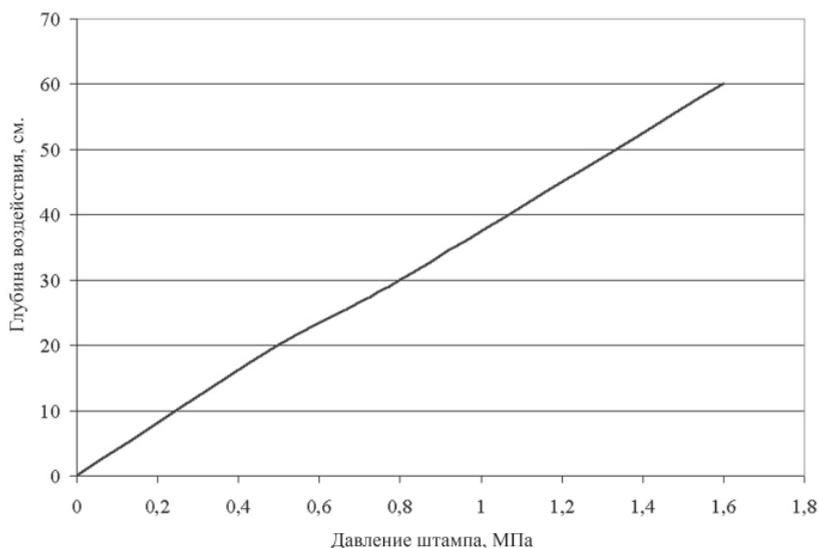


Рис. 3. Глубина воздействия на снежный покров ВПП в зависимости от давления штампа

## ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Главный вывод, который можно сделать из данной работы, – уплотнение снежного покрытия ВПП станции Восток до прочности, необходимой для посадки колесного самолета типа Ил-76ТД, возможно. Максимальная прочность уплотненного с помощью штампа снежного покрова ВПП достигла 3 МПа. Необходимое минимальное давление для уплотнения существующей ВПП составляет около 0,75 МПа. В случае поэтапного уплотнения ВПП, интервал между этапами механического воздействия должен быть как можно меньше, чтобы не давать снежным зернам смерзаться (см. рис. 2). Скорость деформации снежного покрова при штамповых испытаниях не превышала 0,02 м/с. При проектировании уплотняющего устройства необходимо придерживаться аналогичных скоростей деформации. Полученные экспериментальные данные планируется использовать как для проектирования механических устройств, уплотняющих снежный покров, так и для создания теоретической модели расчета уплотнения холодного снега.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №08-05-00279 «Исследования процессов энергомассообмена в деятельном слое ледников прибрежных районов Антарктиды» и подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гляциологический словарь / Под ред. академика В.М.Котлякова. М.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
2. Екайкин А.А., Липенков В.Я. «Рельефообусловленные» колебания характеристик снежной толщи в Антарктиде // Материалы гляциологических исследований. 2004. Вып. 97. С. 35–43.
3. «Лед и снег» — свойства, процессы, использование / Под редакцией У.Д.Кингери. М.: Мир, 1966. 480 с.

S.P.POLIAKOV, B.V.IVANOV, A.V.KLEPIKOV, V.D.KLOKOV, V.V.LUKIN,  
V.L.MART'YANOV

#### ON THE BUILDING OF SNOW RUNWAY FOR THE HEAVY WHEELED AIRCRAFTS AT VOSTOK STATION, CENTRAL ANTARCTICA

*Experimental studies were conducted within the framework of the governmental program of construction of the snow air strip at the station Vostok, suitable for exploitation of heavy wheeled airplanes, e.g. Il'ushin 76-TD.*

*Vostok is situated in the Central Antarctic, in the area of dry snow. The maximum snow surface temperature does not exceed  $-25^{\circ}\text{C}$ . The cold snow is slightly affected by the artificial compression and this is the main problem during the construction.*

*The main goal of this work is to study the physical properties of snow cover of the Vostok station air strip under the different mechanical impacts. Mechanical impacts on the snow cover were performed with the help of stamp tests in the range of pressures of 0,05–1,5 MPa. The changes of snow cover strength, hardness, density, texture and structure were registered, as well as plastic deformation and affecting depth of the snow cover were measured.*

*A number of interesting features, for instance the change of snow cover strength in time after mechanical impact was found. Three days after the test the snow cover strength increased 1,5 times comparing to the values observed 3 hours after the tests.*

*As result of experiments the values of optimal pressure on the runway, suitable for Il'ushin 76-TD landing were determined. The changes of the snow cover structure after different mechanical tests were found. The obtained field data will be used for development of theoretical model of the cold snow cover compression.*

*Key words:* snow runway, plastic deformation, mechanical impacts, stamp tests, snow density.

## РАЗВИТИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЗЕМЛИ ПОСЛЕДНЕГО ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР

д-р геогр. наук Д.Ю.БОЛЬШИЯНОВ<sup>1</sup>, инженер А.С.МАКАРОВ<sup>1</sup>,  
студентка Е.А.МОРОЗОВА<sup>2</sup>, инженер М.В.ПАВЛОВ<sup>3</sup>,  
д-р геогр. наук Л.М.САВАТЮГИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@aari.nw.ru

<sup>2</sup> СПбГУ, факультет географии и геоэкологии, г. Санкт-Петербург, e-mail: rozochka19@yandex.ru

<sup>3</sup> СПбГУ, г. Санкт-Петербург, e-mail: maksimpavlov@rambler.ru

*В статье приводится обзор исследований озер и озерных отложений полярных областей, выполненных силами российских специалистов. Показана роль озерных отложений в изучении палеоклимата голоцена. Освещены основные методы изучения отложений озер: варвометрический, геохимический, споро-пыльцевой и пр. По данным изучения озерных отложений определено время Малого ледникового периода в Российской Арктике. По результатам исследования озер оазиса Бангера (Антарктида) реконструирована граница всплывания ледника в результате трансгрессии моря 2000 лет назад.*

*Ключевые слова:* донные озерные отложения, методы исследований, Арктика, Антарктида, колебания климата, изменения уровня моря, поздний голоцен.

Знание колебаний климата последнего тысячелетия представляется необходимым условием для понимания современных климатических изменений и предсказания климата будущего. Один из методов продления серий инструментальных климатических измерений – исследование донных озерных отложений, которые содержат богатую информацию о развитии природной среды в прошлом. В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте впервые в мире в 50-х гг. прошлого столетия начаты исследования арктических и антарктических озер для получения палеоклиматических сигналов [8, 10]. Тогда были собраны первые сведения о строении донных отложений полярных озер и сделаны попытки извлечь из них палеоклиматическую и палеогляциологическую информацию. Позже эти исследования переросли в палеоклиматическое направление, развивающееся в ААНИИ до настоящего времени. Только в конце XX столетия другие, зарубежные участники изучения полярных регионов планеты начали широкомасштабные исследования в этом направлении. В настоящее время существуют десятки проектов по изучению палеоклимата на основе всестороннего исследования озерных отложений. Отечественная наука хоть и была первой в данном направлении, к настоящему времени утратила и эти передовые позиции из-за отсталости технологий отбора донных отложений и отсутствия лабораторной базы для проведения современных анализов исследуемых осадков.

Исследования на архипелаге Северная Земля, которые круглогодично в течение 14 лет (1976–1989 гг.) проводились на базе гляциологического стационара «Купол Вавилова», дали возможность, в частности, всесторонне исследовать как

условия стока с ледника, так и приледниковое озеро Изменчивое. Были увязаны скорости осадконакопления в озере с количеством воды, стекающей с ледника, с температурой воздуха теплого периода года непосредственно на озере, на леднике и на ближайшей полярной станции «Голомянный», и на основе этих связей получены колебания температур воздуха в июле за последние 1200 лет [7]. Эти работы дали возможность понять непосредственную связь климатических колебаний с толщиной ленточностойких осадков в приледниковых озерах и в глубоких тектонических озерах, в которых также откладывались и откладываются ленточно-слоистые осадки. К настоящему времени изучено уже более 30 арктических и антарктических озер (отобраны колонки донных отложений и проведен комплекс лабораторных исследований), что требует архивации полученного материала. Поэтому в настоящее время в ААНИИ проводится тематическая работа, направленная на создание банка палеоклиматических данных на основе изученных в Арктике и Антарктиде донных озерных отложений, как отобранных самими авторами, так и описанных в публикациях.

Цель данной статьи – показать возможности палеогеографических реконструкций на основе изучения озер и их отложений. Данная статья является естественным продолжением уже опубликованных результатов [6] и их расширением и углублением (рис. 1).



Рис. 1. Карта исследованных озер в Арктике

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее информативные в палеоклиматическом смысле донные осадки откладываются в глубоких тектонических озерах, поэтому их изучению отдается предпочтение. В субполярных и полярных регионах гидрологический режим озер носит неравномерный характер (1–2 месяца активного стока в озера воды и наносов, 10–11 месяцев нахождения подо льдом), что приводит к формированию ежегодно пары слоев: зимнего и летнего. По этим слоям возможно выяснить хронологию климатических событий. В мелких озерах в течение теплого времени может сформироваться несколько пар слоев, или они там вообще не формируются, так же как в озерах умеренной зоны, где гидрологический режим озерных систем носит более равномерный характер. Мощности слоев непосредственно зависят от количества воды и наносов, приносимых в озера. Последние параметры находятся в непосредственной связи со снеготаянием, а значит, с летними температу-

рами воздуха и другими факторами. Но в полярных областях таких факторов значительно меньше, и здесь имеются наиболее благоприятные условия для изучения климатических флуктуаций.

Подсчет пар слоев дает возможность построить кривые скоростей седиментации и узнать возраст отложений. Подсчет проводился при визуальном исследовании осадков, а также в шлифах, изготовленных по специальной методике. На тех озерах, где удавалось проводить гидрологические и седиментологические исследования (например, озеро Изменчивое на архипелаге Северная Земля [2], Левинсон-Лессинга на полуострове Таймыр [12, 14], озера Лама и Капчук на плато Путорана [13]), толщины ежегодно откладывавшегося осадка увязывались с балансом наносов озера или с данными седиментационных ловушек, установленных в толщах озерных вод.

Литологическое строение осадка несет чрезвычайно важную информацию о событиях в бассейне озера. Изучается не только литология осадка, но его гранулометрия, магнитная восприимчивость, геохимические показатели, в особенности содержание органического углерода, который является прямым показателем биологической продуктивности озер, а значит, и термических или иных климатоопределяющих факторов.

Традиционно, согласно высокому уровню развития отечественных направлений спорово-пыльцевого и диатомового анализов донных отложений, они являются основными при выделении климатических сигналов из осадков. Сравнение состава растительности из поверхностного слоя осадков с более глубокими горизонтами позволяет определить тенденции в развитии растительности в бассейне озера, а значит, и климатические флуктуации. Диатомовые водоросли, а также наличие таких организмов, как фораминиферы, наряду с химическим анализом осадков, позволяют определить связь озер с морскими водами, если озера находятся вблизи морских побережий. И, таким образом, донные озерные отложения могут служить показателем колебаний уровня морей.

Для определения коротких климатических колебаний (в пределах 50–100 лет) исследование колонок донных отложений должно производиться непрерывно. Образцы следует отбирать из каждой литологической разности, что не всегда возможно из-за тонкой стратификации осадка, но не реже чем через 1–2 см, и, что очень важно, непрерывно по всей колонке. Выделение климатического сигнала на основе изучения состава донных отложений производится согласно методике, описанной в предшествующих работах [2, 5, 6, 7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом исследования донных озерных отложений, накопившихся за время последнего тысячелетия, явились климатические сигналы, свидетельствующие о циклически происходящих потеплениях и похолоданиях климата (рис. 2) в Российской Арктике и Субарктике. Однако следует учитывать, что далеко не всегда удастся получить абсолютные колебания температуры воздуха. Исключением является озеро Изменчивое на архипелаге Северная Земля [7], в котором толщина ленточнослоистых отложений пропорциональна температуре воздуха в летний период. На рис. 2 показаны периоды устойчивого похолодания и потепления климата в течение тех отрезков времени, которые было возможно выделить при изучении каждого конкретного озера. Белый цвет в колонках показывает наиболее теплые интервалы времени, штриховка – похолодание, черный – наиболее холодные промежутки времени. Исследования нескольких озер позволили определить временные и пространственные границы последнего похолодания, имевшего место на всей Земле, – так называемого Малого ледникового периода. Он начался в разное время: самое раннее – около 1470 г., самое позднее время –

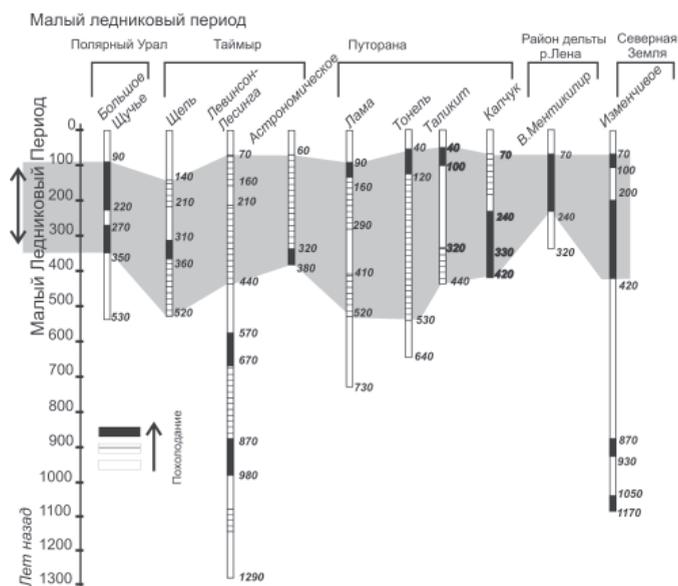


Рис. 2. Продолжительность Малого ледникового периода в Российской Арктике

1760 г. и продолжался до первой половины XX в. Время начала и окончания похолодания значительно отличаются в различных частях Арктики.

В большинстве исследуемых регионов Малый ледниковый период осложнен фазой потепления продолжительностью от 40 до 220 лет. Все исследованные колонки донных озерных отложений показывают устойчивое потепление в течение последних 140–60 лет. Надо отметить, что применяемые методы вряд ли могут разделить более короткие фазы изменения климата, например похолодание 1970-х гг. и потепление конца XX в., отмеченное инструментальными наблюдениями в Арктике. Последнее потепление, которое трактуется в основном как антропогенно обусловленное, на приведенных материалах характеризуется как естественное. Таких потеплений на протяжении последнего тысячелетия, как видно из рис. 2, было несколько, и тогда они никак не могли быть техногенными. Еще один важный вывод, следующий из приведенных материалов, — это то, что за современным потеплением неизбежно последует похолодание климата в полярных областях. Такие данные необходимы для прогноза климата ближайшего будущего, т.к. основаны не на 60–70-летних инструментальных наблюдениях, а на рядах протяженностью порядка 1000 лет. Для увеличения периода выявленных колебаний требуется увеличение длины колонок донных отложений.

Другим важным результатом исследования донных озерных отложений стали данные о повышении уровня моря на высоту до 10 м около 2000 лет назад. Такие данные получены из озера Изменчивого на архипелаге Северная Земля. Там, под 1500 пар годовых слоев ленточнослоистого осадка, залегают отложения с морскими остракодами и фораминиферами, что явно свидетельствует о повышении уровня моря не менее чем на 10 м около 1500 лет назад, т.к. в настоящее время озеро расположено на высоте 6 м над уровнем Карского моря [4].

Озеро Таймыр повышало уровень вод около 1800 лет назад, что установлено по результатам радиоуглеродного датирования археологической стоянки, перекрытой озерными осадками в устье притока Верхней Таймыры, впадающей в озеро Таймыр [7]. Повышение уровня моря здесь сказалось только в повышении



Рис. 3. Расположение озера Далёкого и границы современных колебаний линии всплывания ледника (на основе карты «Гляциогеография оазиса Бангера» [1])

уровня (подпор со стороны моря), т.к. в настоящее время уровень озера находится на высоте 5 м над уровнем Карского моря.

В осадках озера Далекого, расположенного в оазисе Бангера (Восточная Антарктида), подпруженного краем ледникового щита, под пресноводными ленточно-слоистыми осадками возрастом около 2000 лет обнаружены морские диатомовые водоросли. Это свидетельствует о том, что в то время край ледникового щита всплывал и пропускал под собой морские воды к южной кромке оазиса [3] (рис. 3). Современные перемещения границы всплывания вдоль южной границы оазиса происходят заметно на протяжении нескольких километров. Это выражается в том, что озера вдоль южной кромки оазиса то подвержены влиянию приливов и отливов, то перестают сообщаться с морем с периодом в несколько лет. Около 2000 лет назад и озеро Далекое было ареной вторжения морских вод в результате всплывания ледника при повышенном стоянии уровня моря.

Эти примеры можно считать случайным совпадением. Однако все эти озера (североземельские, таймырские, антарктические) лежат очень близко к меридиану 100° в.д. Именно по этому меридиану, как считал Г.Д.Хизанашвили [11], после смены 4000 лет смещается земная ось в своих тысячелетних осцилляциях. Перемещение земной оси вызывает напряжения в земной коре и в атмосфере, которые современным исследователям трудно определить. Изменения в гидросфере определить проще, в особенности после появления такого мощного инструмента исследований, как спутниковая альтиметрия, благодаря которой установлены современные неоднородности поверхности геоида или уровня Мирового океана. Именно в описанных озерах изменения уровня зафиксированы документально.

Что же касается сотого восточного меридиана, то это меридиан, в 20-градусном секторе которого (90–110° в.д.) расположены крупнейшие разломы земной коры, заполненные водой, т.е. озера и морские заливы. К вышеописанным доба-

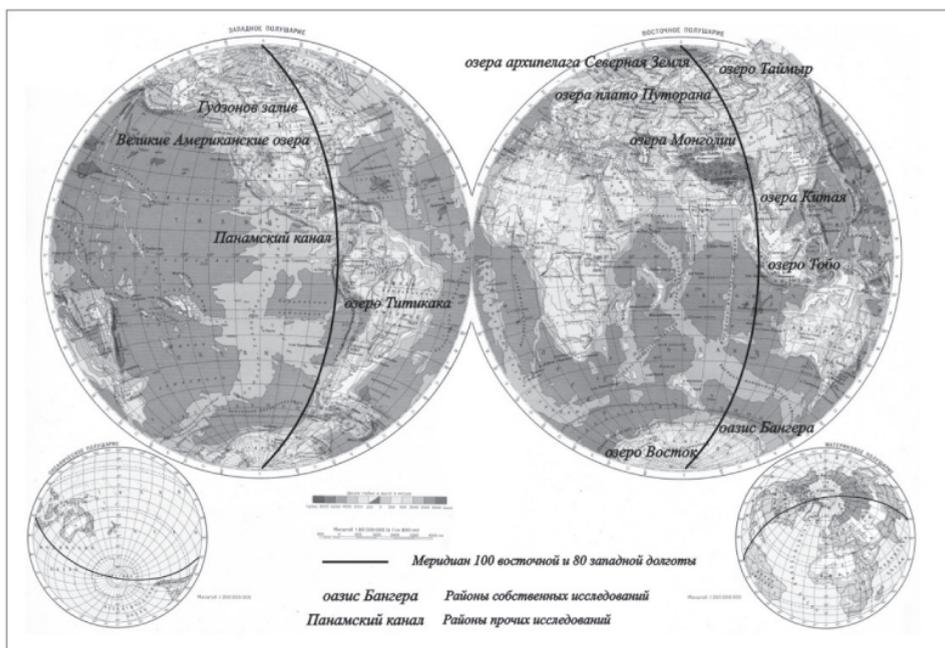


Рис. 4. Сотый меридиан на карте полушарий

вятся такие, как: озера плато Путорана, Байкал, Хубсугул (Монголия), подледное озеро Восток (Центральная Антарктида). На противоположном полушарии в 20-градусном секторе меридиана 80° з.д. расположены Великие американские озера, Гудзонов залив, озера перешейка между Северной и Южной Америками. Крупнейшие тектонические озера приурочены также к 30° в.д. (например, Ладожское, озера африканского рифта), которых значительно меньше, чем вокруг оси сотого меридиана (рис. 4).

В районе сотого же меридиана в Индийском океане, по данным спутниковой альтиметрии, поверхность океана понижена относительно поверхности геоида до 100 м. Полученные наблюдения и выявленные Хизанашвили закономерности флуктуации земной оси вряд ли являются случайными совпадениями. Во всяком случае, имеются факты, которые необходимо проверять. Господствующее ныне в науке мнение об исключительно гляциоэвстатической природе колебаний уровня моря становится малоубедительными, т.к. появляется все больше фактов о заметных колебаниях уровня моря в различных точках земного шара на протяжении последних столетий.

Последние годы исследования озер в Российской Арктике активно ведутся в рамках российско-германского сотрудничества по проекту «Природная система моря Лаптевых», которое дает возможность российским специалистам продолжить ранее начатые исследования и, что также важно, быть приобщенными к современным технологиям отбора и анализа донных озерных отложений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Антарктики. СПб.: ГУНК, 2005. 200 с.
2. *Большаинов Д.Ю.* Осадконакопление в современном приледниковом озере (на примере оз. Изменчивого, архипелаг Северная Земля) // Вестник ЛГУ. 1985. № 7. С. 43–50.
3. *Большаинов Д.Ю.* Основные черты геоморфологического строения оазиса Бангера (Восточная Антарктида) // Информ. бюл. Сов. антаркт. экспед. 1990. Вып. 113. С. 79–90.
4. *Большаинов Д.Ю., Макеев В.М.* Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 217 с.
5. *Большаинов Д.Ю., Федоров Г.Б., Савельева Л.А.* Изменения природной среды полуострова Таймыр в позднем неоплейстоцене и голоцене // Доклады Всерос. научно-метод. совещания «Таймыр. Малочисленные народы, природные условия, фауна, выдающиеся ученые» (Хатанга, 10-12 августа). СПб.; Хатанга, 2001. С. 27–45.
6. *Большаинов Д.Ю., Павлов М.В.* Определение времени Малого ледникового периода в различных частях Российской Арктики по данным изучения донных озерных отложений // Изв. Русск. геогр. об-ва. 2004. Т. 136. Вып. 4. С. 37–50.
7. *Большаинов Д.Ю.* Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. СПб.: ААНИИ, 2006. 296 с.
8. *Говоруха Л.С.* Современные условия накопления осадков в озерах Земли Франца-Иосифа // Проблемы Арктики и Антарктики. 1963. № 13. С. 119–122.
9. *Говоруха Л.С.* Некоторые результаты лимнологических исследований на Земле Франца-Иосифа // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1965. Т. 97. С. 169–175.
10. *Макеев В.М.* Подводные географические исследования // Информ. бюл. Сов. антаркт. экспед. 1971. № 82. С. 14–17.
11. *Хизанашвили Г.Д.* Динамика земной оси вращения и уровней океанов. Тбилиси: Цодна, 1960. 143 с.
12. *Ebel T., Melles M., Niessen F.* Laminated sediments from Levinson-Lessinglake, northern central Siberia: a 30,000 year record of environmental history? // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. P. 425–435.

13. Hagedorn B., Harwart S., van der Loeff M.M.R., Melles M. Lead-210 dating and heavy metal concentration in recent sediments of Lama Lake (Norilsk area, Siberia) // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Dynamics and History, Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. P. 361–376.
14. Zimichev V., Bolshiyarov D., Mesheryakov V., Ginz D. The features of hydrological regime of the lake-river systems of Byrranga Mountains (by the example of Levinson-Lessing Lake) // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Dynamics and History, Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. P. 353–360.

*D.YU.BOLSHIYANOV, A.S.MAKAROV, E.A.MOROZOVA, M.V.PAVLOV, L.M.SAVATYUGIN*

### **POLAR REGIONS ENVIRONMENT DURING LAST MILLENIUM ON THE BASE OF LAKE SEDIMENTS INVESTIGATIONS**

*The article gives the review of researches of lakes and lake sediments in polar areas, carried out by the Russian experts. It also illustrates the role of lake sediments within the Holocene paleoclimate research; the main methods of research of lake sediments, varvometric, geochemical, spore and pollen method, etc. According to the data obtained from research of the Arctic area lake sediments, the time of the Little Ice Age expansion in the Russian Arctic was determined. The results of research of the lakes in Banger oasis (East Antarctica) allowed to reconstruct the floating Line dynamics as result of ocean transgression 2000 years ago, which took place along meridian of 100° E.*

*Key words:* lake sediments, methods of investigations, Arctic, Antarctica, climate and sea level fluctuations, Late Holocene.

## ПОЛЕВОЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ И ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ АВТНОМНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ В АРКТИКЕ

канд. хим. наук *Е.Д.ДОБРОТИНА,*

канд. мед. наук *Ш.Б.ТЕШЕБАЕВ*

<sup>1</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ЛНМИСО Центра полярной медицины, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

*Разработана методика для проведения комплексной оценки антропогенного загрязнения арктических почв и грунтов в условиях, приближенных к полевым. Уровень антропогенной нагрузки оценивается по содержанию в почве органических веществ, определяемому по совокупности тестов с диазотированной сульфаниловой кислотой и раствором нингидрина.*

*Ключевые слова:* антропогенная нагрузка, реакция азосочетания, нингидриновая реакция.

Развитие промышленности, а также расширяющееся использование биосферы и ее ресурсов приводят к возрастающему вмешательству человека в материальные процессы, протекающие на планете. Важнейшим фактором, влияющим на течение биогеохимических процессов и их развитие, становится антропогенная нагрузка, оценка уровня и выраженности которой позволяет прогнозировать динамику изменений в изучаемых природных объектах. Поэтому все большее значение приобретает мониторинг окружающей среды, отслеживающий качественный и количественный характер антропогенной нагрузки. В этом направлении ведутся углубленные исследования как зарубежными, так и отечественными учеными. Однако предлагаемые к реализации методики требуют, как правило, применения сложных в технологическом отношении специализированных операций, требующих специальной химико-аналитической подготовки у исследователя или использования дорогостоящего аналитического оборудования, к работе на котором могут допускаться только высококвалифицированные специалисты-химики. Обычно вывод о степени загрязнения делается или на основании определения какого-либо одного параметра (элемента), доминирующего в данном регионе (например, тяжелые металлы или радиационное загрязнение и т.д.) или по результатам комплексного обследования, требующего наличия хорошо оснащенной лаборатории (анализатор биогенных элементов, нефтеуглеводородов, хроматограф и т.д.). Оба этих подхода широко используются и вполне оправданы при решении конкретных задач, но в полевых условиях имеют свое преимущество пусть менее точные, но простые и быстрые тесты.

Целью нашей работы является создание унифицированных экспресс-методик для контроля антропогенного воздействия на объекты природной среды высокоширотных территорий, выполнение которых было бы доступно любому исследователю, не имеющему специальной квалификации и оборудования, в условиях, приближенных к полевым.

По-видимому, значимым признаком антропогенной нагрузки можно считать наличие в почве или воде органических веществ, как промышленного происхождения (нефтепродукты, фенолы, амины), так и продуктов метаболизма человека и животных. Представляется актуальной проблема разработки простых методов качественной оценки комплексного органического загрязнения. Существующие методы анализа органических загрязнений, как правило, непригодны для использования в полевых условиях.

Мы предполагаем, что важным признаком антропогенной нагрузки можно считать наличие следов биологической контаминации (наблюдающихся в местах постоянного и временного проживания человека). Оценивать наличие и степень выраженности данного фактора предполагается с использованием ряда показательных качественных реакций, указывающих на присутствие в исследуемых пробах продуктов жизнедеятельности человека. Предложенные в литературе [1] методы определения следов мочи и экскрементов в почве весьма длительны и трудоемки и не могут быть рекомендованы для экспертной экспресс-оценки в полевых условиях.

Согласно литературным данным [3, 5, 6], продукты жизнедеятельности представляют собой сложную смесь органических и неорганических веществ и содержат аминокислоты, фрагменты белков, ароматические амины, порфирины и родственные соединения, стероиды, фенолы, мочевины. Известны достаточно простые и наглядные методы обнаружения ароматических аминов, фенолов и азотистых гетероциклов, способных вступать в реакцию азосочетания в качестве азосоставляющих [2, 10–13]; также широко применяется на практике обнаружение аминокислот с помощью нингидрина [8–10, 12].

В связи с этим мы предлагаем использовать для индикации антропогенной нагрузки совокупность тестов проб воды (или водной вытяжки из пробы почвы) с диазотированной сульфаниловой кислотой и раствором нингидрина. Простая, показательная методика, легко выполнимая в полевых условиях натуральных исследований, позволит эксперту за короткий срок получить необходимые объективные результаты о характере и интенсивности антропогенного воздействия на изучаемые объекты природных экосистем и даже сделать вывод об источниках данного загрязнения, что, в свою очередь, позволит сформулировать предложения по снижению уровня неблагоприятных воздействий на природные объекты. Разработанные показатели могут найти применение при плановых и экстренных обследованиях изучаемых полярных территорий и могут быть рекомендованы для освоения студентами географических, океанологических, экологических, природоохранных высших и средних учебных заведений.

**Диазотированная сульфаниловая кислота** вступает в реакцию азосочетания с ароматическими аминами, фенолами, протопорфинами и некоторыми азотис-

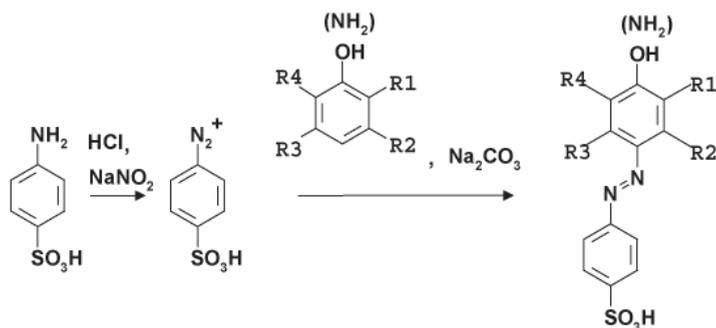


Рис. 1. Реакция азосочетания с диазотированной сульфаниловой кислотой

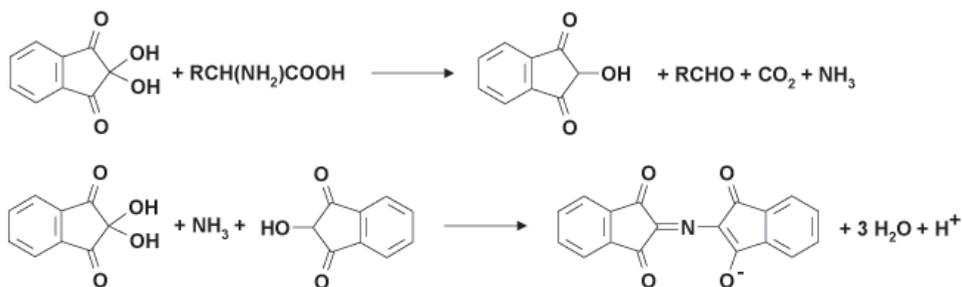


Рис. 2. Нингидриновая реакция

тыми гетероциклами, образуя окрашенные азокрасители. Субстрат не должен содержать сильных акцепторных заместителей и групп, стерически затрудняющих азосочетание [7]. Таким образом, тест чувствителен как к промышленному загрязнению поверхностных вод (фенолы, анилины), так и к продуктам метаболизма человека и животных.

**Нингидрин** дает окрашенные соединения с аммиаком, алифатическими и алициклическими первичными аминами. Вторичные, третичные и четвертичные амины, амиды и аминокзамещенные ароматические соединения дают слабую реакцию или не дают вовсе. Раствор нингидрина применяется в качестве группового локализирующего агента на аминокислоты и пептиды [4]. Тест позволяет обнаруживать следы биологической контаминации в воде (почве).

Для каждой пробы воды (почвы) проводят одновременно оба теста; вывод об антропогенном загрязнении делают по совокупности результатов. По-видимому, в случае биологической контаминации почвы обе реакции должны демонстрировать загрязнение сравнимой интенсивности; при промышленном загрязнении, вероятно, первая должна превалировать.

Оптимальные условия для проведения тестов были подобраны нами с помощью модельных соединений (фенол, 1-нафтиламин – для реакции азосочетания; аргинин – для нингидриновой реакции).

Затем мы провели анализы в выбранных условиях водных растворов био-контаминантов, установили чувствительность предложенной методики и составили цветовую шкалу. Однако при последующем анализе водных вытяжек реальных загрязненных почв было обнаружено, что мутность и окраска вытяжки, зависящие от типа почвы, значительно искажают цвет реакционного раствора. Поэтому мы разработали цветовую шкалу для оценки уровня антропогенной нагрузки (табл. 1, 2), используя искусственно приготовленные песчаные и глинистые почвы с известными концентрациями загрязняющих веществ. Вариации цвета в пределах строки вызваны различиями мутности и окраски исходной вытяжки.

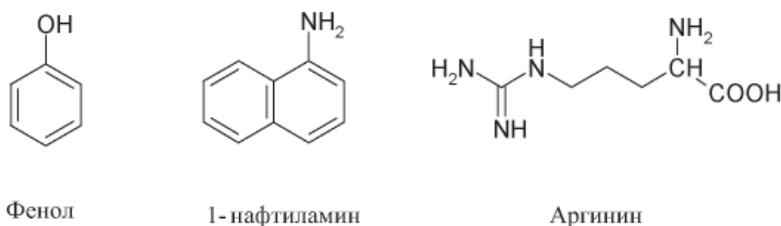


Рис. 3. Модельные соединения

Таблица 1

## Реакция азосочетания

Обознач.	Описание	Концентрация фенола в воде, мг/л	Концентрация 1-нафтиламина в воде, мг/л	Концентрация биоконтaminантов в водной вытяжке (в воде), мг/л	Содержание сухих биоконтaminантов в пробе почвы, г/кг почвы	Вывод о загрязненности почвы
0	практически бесцветный	$X < 0,5$	$X < 0,4$	$X < 10$	$X < 0,12$	практически чистая
0+	соломенно-желтый, светло-желтый	$0,5 < X < 2,5$	$0,4 < X < 2$	$10 < X < 50$	$0,12 < X < 0,6$	незначительное органич. загрязнение
+	желтый, ярко-желтый, крон желтый	$2,5 < X < 10$	$2 < X < 10$	$50 < X < 300$	$0,6 < X < 3,6$	слабое органическое загрязнение
++	крон желтый К, оранжевый	$10 < X < 25$	$10 < X < 40$	$300 < X < 700$	$3,6 < X < 8,4$	среднее органич. загрязнение
+++	темно-оранжевый, светло-коричневый (йод, светлый йод)	$25 < X$	$40 < X$	$700 < X$	$8,4 < X$	сильное органич. загрязнение

Таблица 2

## Нингидриновая реакция

Обознач.	Описание	Концентрация аргинина в воде, мг/л	Концентрация биоконтaminантов в водной вытяжке (в воде), мг/л	Содержание сухих биоконтaminантов в пробе почвы, г/кг почвы	Вывод о загрязненности почвы
0	практически бесцветный	$X < 10$	$X < 50$	$X < 0,6$	практически чистая или незначительное органич. загрязнение
0+	чуть желтоватый, желтоватый	$10 < X < 40$	$50 < X < 300$	$0,6 < X < 3,6$	слабое органическое загрязнение
+	серовато-желтоватый, желтый	$40 < X < 100$	$300 < X < 500$	$3,6 < X < 6$	умеренное органическое загрязнение
++	светло-фиолетовый, светло-синий	$100 < X < 150$	$500 < X < 700$	$6 < X < 8,4$ г/кг	среднее органическое загрязнение
+++	синий, фиолетовый	$150 < X$	$700 < X$	$8,4$ г/кг $< X$	сильное органическое загрязнение

Таблица 3

## Результаты анализа проб почвы на станции Новолазаревская

Обозначение пробы	Место отбора пробы	Оценка антропогенной нагрузки			Микробиологическая оценка СМЧ, м.т./г	Содержание неорганических анионов в водной вытяжке из почвенного образца, мг/л (по данным ионхроматографа)				
		Нитририновая реакция	Реакция азосочетания	Вывод		Cl	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>
8	Склад открытого хранения техники и материалов (участок в центре склада)	0+	0+	незначит. орг. загрязнение (антропог.)	3,00E+05	26,276		0,139		45,89
9	Склад открытого хранения (участок, загрязненный ГСМ)	0+	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	только плесень	5,78		0,008		8,958
10	Участок дороги возле ДЭС (загрязненный ГСМ)	0+	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	4,00E+03	26,128		0,123		37,828
11	Участок у емкостей с ГСМ	0	++	среднее орг. загрязнение (промышл.)	2,00E+05	3,52		0,251		8,04
12	Участок у емкостей с ГСМ	0	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	1,90E+04	6,794		0,427		11,056
13	Участок у входа на ДЭС	0	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	7,00E+06	9,654		0,679		184,588
15	Участок у волокуши с пищевыми отходами (в 5 м от кают-компаний)	+	+	среднее орг. загрязнение (антропог.)	1,15E+07	38,732		5,362	18,176	11,551
16	Участок свалки у старой станции	0+	++	среднее орг. загрязнение (промышл.)	1,00E+06	10,116		0,62		44,374
17	Участок дороги на свалку у старой станции	0+	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	1,00E+05	2,297		0,213		7,007
18	Участок дороги на старой станции	0+	0+	незначительное орг. загрязнение (антропог.)	6,00E+05	7,182		0,071		14,017
22	У входа на теплый продовольственный склад	0	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	7,40E+06					
24	У входа в геодом	+	+	среднее орг. загрязнение (антропог.)	9,40E+06					
25	Участок слива из геодома	++	++	сильное орг. загрязнение (антропог.)	1,57E+07	142,673		0,509	188,59	99,625
26	У сточной ямы в 25–30 м от геодома	++	++	сильное орг. загрязнение (антропог.)	2,37E+07					
31	Дальний берег о. Станционного, у старой станции	0	0+	незначительное орг. загрязнение (промышл.)	2,60E+04					

Анализы реальных образцов почв доказали применимость методики в полевых условиях и ее информативность (табл. 3, 4). Полученные результаты экспресс-диагностики коррелируют с микробиологической оценкой (рис. 4), с исследованием анионного (рис. 5) состава пробы.

С целью проверки точности и воспроизводимости результатов были приготовлены водные растворы шести различных образцов биоконтаминантов; из каждого концентрированного раствора методом разбавления были получены по семь растворов с известным содержанием биоконтаминантов. После этого проводился анализ полученных растворов в соответствии с разработанной методикой параллельно двумя аналитиками. Несовпадающие результаты параллельных анализов

Таблица 4

Результаты анализа проб почвы на станции Молодежная

Обозначение пробы	Место отбора пробы	Оценка антропогенной нагрузки			Микробиологическая оценка СМЧ, м.г./г	Содержание неорганических анионов в водной вытяжке из почвенного образца, мг/л (по данным ионохроматографа)				
		Нитрифицирующая реакция	Реакция азосочетания	Вывод		Cl	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>
31	Вершина сопки рядом со знаком в 30 м от антенны ИСЗ	0	0	практически чистая	8,10E+04	2,511	0,025	0,552	0,603	2,593
32	Вершина сопки около антенны ИСЗ	0	0	практически чистая	7,40E+04	9,533		14,676	0,711	3,236
33	На склоне сопки в половине расстояния между антенной и эстакадой	0+	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	2,97E+05	1,184	0,034	0,091	0,399	1,64
34	Павильон ВЗА (пусковой)	0+	0+	незначительное орг. загрязнение (антропог.)	4,10E+04	1,518	0,037	0,115	0,69	1,622
36	Участок сопки над складом «Бананис»	0+	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	7,60E+06	4,235		2,43	0,913	2,704
41	Берег о. Лагерного, место стоянки автотранспорта для закачки воды	0+	0+	незначительное орг. загрязнение (антропог.)	3,10E+05	4,788		0,153		2,056
42	Участок дороги в 15–20 м от места водозабора	+	0+	слабое орг. загрязнение (биолог.)	1,75E+05	27,522	0,223	2,99	0,405	9,708
43	Участок берега о. Лагерного, ближайший к станции в 30 м от водозабора	0	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	1,24E+06	3,63		1,919	0,562	2,397
44	Участок берега о. Лагерного, противоположный месту забора воды	0	0+	незначительное орг. загрязнение (промышл.)	1,50E+04	1,142		0,083		1,55
45	Водораздел между о. Лагерным и системой о. Разливное – о. Глубокое	0+	+	слабое орг. загрязнение (промышл.)	6,30E+03	4,604		0,293		3,364

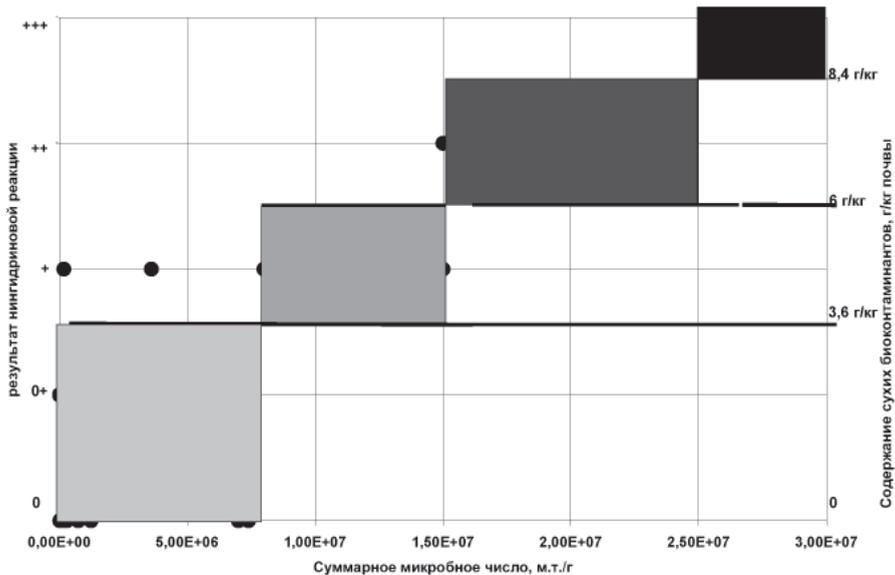


Рис. 4. Сравнение результатов цветных реакций с данными микробиологической оценки

разными операторами составляли 8,33 % для реакции азосочетания и 10,4 % для нингидриновой реакции. Все несовпадающие результаты принадлежат соседним интервалам окраски.

Несколько больше несовпадение для растворов с различными биоконтантантами, но одинаковой их концентрацией: 22,9 % и 20,8 % соответственно; это объясняется сложным и неодинаковым комплексным составом органического загрязнения биологического происхождения. Следует отметить, что большинство расходящихся результатов относится к граничным точкам интервалов окраски.

Процедура анализа заключается в приготовлении водных вытяжек из проб грунта либо взятии проб воды, добавлении готовых реактивов, пятнадцатиминутной выдержке (при комнатной температуре для реакции азосочетания и в кипящей водяной бане для нингидринового теста) и последующей оценке окраски

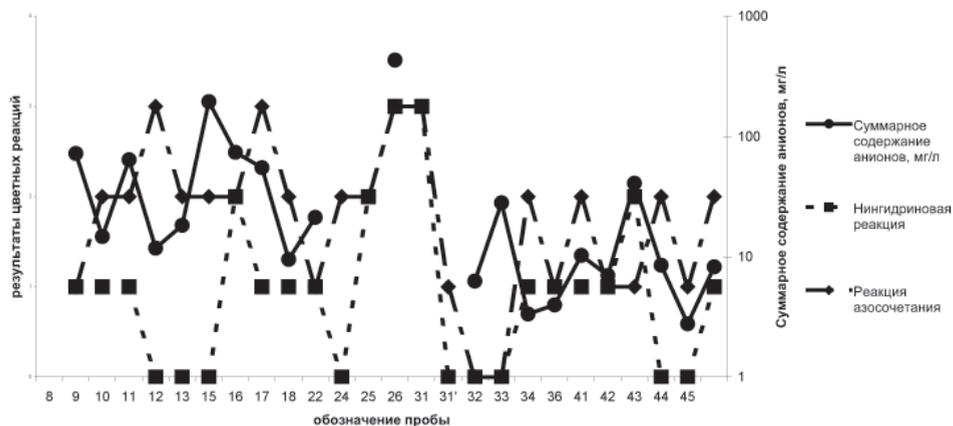


Рис. 5. Сравнение результатов цветных реакций с данными анализа анионного состава

с помощью цветовой шкалы. Лимитирующая по времени стадия – приготовление водных вытяжек из проб почвы. После этого время анализа 10 проб составляет 1 ч (включая затраты времени на нагревание, охлаждение и выдержку). Полный набор посуды, оборудования и готовых растворов реагентов для анализа 100 проб помещается в чемодан массой 8 кг.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Приготовление растворов

*Соляная кислота (0,1 н):* из фиксаля. Содержимое ампулы количественно переносят в литровую мерную колбу и разбавляют дистиллированной водой до метки.

*Нитрит натрия (2 %-й раствор):* взвешивают 1 г  $\text{NaNO}_2$ , переносят в мерную колбу на 50 мл, растворяют в небольшом количестве дистиллированной воды. Полученный раствор разбавляют дистиллированной водой до метки и хранят в посуде из темного стекла в защищенном от света месте.

*Раствор соды (1 н):* взвешивают 53 г  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (или 143 г  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$ ), переносят в литровую мерную колбу, растворяют в дистиллированной воде и доводят объем раствора до метки. Полученный раствор хранят в стеклянной бутылке с плотно завинчивающейся пробкой.

*Раствор сульфаниловой кислоты:* берут точную навеску сульфаниловой кислоты (~2,0918 г), переносят в литровую мерную колбу и растворяют в 0,1 н  $\text{HCl}$ . Объем раствора доводят до метки. Полученный раствор хранят в бутылке из темного стекла с плотно завинчивающейся пробкой.

*Нингидрин (0,25 %-й раствор в ацетоне):* навеску нингидрина (0,25 г) растворяют в 100 мл ацетона. Полученный раствор хранят в бутылке из темного стекла с плотно завинчивающейся или притертой пробкой.

Все эти растворы при соблюдении условий хранения достаточно стабильны, они могут быть приготовлены заранее в условиях лаборатории и взяты в экспедицию. Указанных в прописи количеств хватает на анализ 200 проб воды (почвы).

*Диазореагент (готовят непосредственно перед проведением анализа):* к охлажденному раствору сульфаниловой кислоты в 0,1 н  $\text{HCl}$  по каплям при перемешивании добавляют расчетное количество 2 %-ного нитрита натрия. Полученный раствор стабилен в течение нескольких часов при температуре 2–6 °С; при нагревании до комнатной температуры нестабилен.

Для анализа 9–10 проб: для исходной навески сульфаниловой кислоты  $2,092 \pm 0,01$  г – 2,2 мл 2 %-ного раствора  $\text{NaNO}_2$  прибавляют к 50 мл раствора кислоты.

Для других навесок и количеств проб необходимые объемы смешиваемых растворов рассчитываются по формулам:

$$V_{\text{кислоты}} = 5 \times n_{\text{проб}},$$

$$V_{\text{NaNO}_2} = 0,103 \times m_{\text{кислоты}} \times n_{\text{проб}},$$

где  $V_{\text{кислоты}}$  – объем раствора сульфаниловой кислоты в 0,1 н  $\text{HCl}$ , мл;  $V_{\text{NaNO}_2}$  – объем 2 %-ного раствора нитрита натрия, мл;  $m_{\text{кислоты}}$  – исходная навеска сульфаниловой кислоты, г;  $n_{\text{проб}}$  – количество анализируемых проб воды (почвы).

### Анализ проб воды (почвы)

#### Приготовление водной вытяжки

Навеску (~25 г) свежезятой или замороженной почвы отбирают с помощью градуированного пластикового стаканчика, помещают в пластиковую банку емкостью 500 мл и приливают 75 мл дистиллированной воды. Банку закрывают пробкой и энергично встряхивают в течение 3 минут. Полученную суспензию фильтруют с помощью воронки Бюхнера в колбу Бунзена (с помощью ручного вакуум-насоса

NALGENE). Осадок на фильтре промывают 25 мл дистиллированной воды. Фильтрат, объединенный с промывной водой, переносят в чистую пластиковую банку. Получают ~100 мл водной вытяжки.

Переносят по 5–6 мл приготовленной водной вытяжки в две пробирки для проведения нингидринового теста и для сравнения; с остатком проводят реакцию азосочетания.

#### *Реакция азосочетания (тест с диазотированной сульфаниловой кислотой)*

К приготовленной водной вытяжке добавляют пипеткой (или по каплям шприцом) 5 мл диазореагента, перемешивают встряхиванием и осторожно, по каплям, при перемешивании добавляют 5 мл 1 н раствора соды. Через 15 мин 5–6 мл полученного раствора переносят в пробирку и оценивают окраску с помощью шкалы (табл. 1), учитывая окраску исходной водной вытяжки.

#### *Нингидриновая реакция*

В пробирку с водной вытяжкой добавляют 0,5 мл раствора нингидрина в ацетоне, перемешивают встряхиванием и нагревают на кипящей водяной бане в течение 15 мин. Затем оценивают окраску полученного раствора (табл. 2), учитывая окраску исходной водной вытяжки.

#### **Набор для проведения анализа 100 проб в полевых условиях**

Банка объемом 50 мл для приготовления диазореагента – 1.

Банки с пробками для приготовления водной вытяжки объемом 500 мл – 10.

Колба Бунзена – 1.

Воронка Бюхнера – 1.

Фильтры бумажные – 150.

Ручной вакуум-насос NALGENE – 1.

Водяная баня – 1.

Держатель для пробирок – 2.

Канистра с дистиллированной водой – 1.

Ложка для почвы – 1.

Мерный цилиндр на 100 мл для дистиллированной воды – 1.

Мерный цилиндр на 50 мл для кислоты – 1.

Пипетка на 5 мл (для нитрита) – 3.

Пипетка пластиковая на 1 мл (для раствора нингидрина) – 10.

Пластиковые стаканчики для отбора почв – 10.

Пробирки для нингидринового теста и оценки окраски – 40.

Стаканы пластиковые – 2.

Шприц на 5 мл (для диазореагента) – 10.

Шприц на 5 мл (для раствора соды) – 10.

Штатив для пробирок – 2.

Чемодан для хранения набора – 1.

#### *Реактивы*

Раствор нингидрина в ацетоне – пластиковая бутылка 0,05 л.

Раствор нитрита – пластиковая бутылка 0,05 л.

Раствор соды – пластиковая бутылка 0,5 л.

Раствор сульфаниловой кислоты в HCl – пластиковая бутылка 0,5 л.

Хромовая смесь – пластиковая бутылка 0,25 л.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабов Д.М., Надворный Н.Н. Руководство к практическим занятиям по гигиене с техникой санитарно-гигиенических исследований. М.: Медицина, 1976. С. 52–53.

2. Ванюшин И. Домашний анализ воды // Аквариум. 1994. № 2. URL: <http://www.fishing.kiev.ua:80/aquasfera/voda/vod0002.html> (дата обращения 12.02.2009)
3. Данилова Л.А. Анализы крови и мочи. СПб.: ООО «Издательство Деан», 1999. 128 с.
4. Досон Р., Эллиот Д., Эллиот У., Джонс К. Справочник биохимика. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 544 с.
5. Кольман Я., Рем К.-Г. Наглядная биохимия. Пер. с нем. М.: Мир, 2000. С. 196, 317–318.
6. Кухта В.К., Морозкина Т.С., Таганович А.Д., Олецкий Э.И. Основы биохимии: Учебник. М.: Медицина, 1999. 416 с.
7. Марч Дж. Органическая химия. Реакции, механизмы и структура: Углубленный курс для университетов и химических вузов: В 4 т. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. С. 337–338, 479–481.
8. Практикум по биохимии / Под ред. С.Е.Северина и др. 2-е изд., перераб и доп. М.: Изд. МГУ, 1989. 508 с.
9. Раков Э.Г. Химия и криминалистика. URL: <http://him.1september.ru/articlef.php?ID=200002101> (дата обращения 12.02.2009)
10. Рево А.Я. Практикум по органической химии (Качественные микрохимические реакции): Учебн. пособие для медицинских вузов. 3-е изд. М.: Высшая школа, 1971. 208 с.
11. Ронин В.С., Старобинец Г.М., Утевский Н.Л. Руководство к практическим занятиям по методике клинических лабораторных исследований. М.: Медицина, 1968. 264 с.
12. Хроматография в тонких слоях / Под ред. Э.Шталя. М., 1965. С. 476–492.
13. Maschke J. Die chemische wasseruntersuchung-Bestimmung von Harn und Fakalien im Schwimmbadwasser // Naturwiss. Unterr., Phys./Chem./Biol. 1975. В. 23 (2), S. 75–76 (Ger.).

*E.D.DOBROTINA, SH.B.THESHEBAEV*

## FIELD METHOD OF THE COMPLEX ESTIMATION OF ANTHROPOGENOUS POLLUTION OF THE SOILS IN AREAS OF AUTONOMOUS SETTLEMENTS IN THE ARCTIC

*The technique is developed for carrying out a complex estimation of anthropogenic pollution of Arctic soils in the conditions approached to field. The level of anthropogenic loading is estimated by the organic substances contain in soil, determined on set of tests with the diazotized sulphanilic acid and with the ninhydrin solution.*

*Key words:* anthropogenic loading, azocoupling, ninhydrin reaction.

## ОСОБЕННОСТИ ВЫНОСА ГЛОБАЛЬНОГО $^{90}\text{Sr}$ С ВОДОСБОРОВ БОЛЬШИХ РЕК СУБАРКТИКИ В СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН

канд. биол. наук *Н.А.БАКУНОВ*, д-р геогр. наук *Д.Ю.БОЛЬШИЯНОВ*,  
д-р геогр. наук *Л.М.САВАТЮГИН*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

Для больших рек европейской и азиатской частей Российского Севера выполнены оценки выноса из почвенного покрова водосборов радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  за период в 30 лет. С повышением суровости климата в направлении с запада на восток снижалось поступление  $^{90}\text{Sr}$  с водосбора в гидрографическую сеть. Для Северной Двины, Печоры и Енисея, Лены вынос  $^{90}\text{Sr}$  составил соответственно ~0,6 и ~0,3 % в год кумулятивного запаса на водосборе. Очищение водосборов рек от глобального  $^{90}\text{Sr}$  (1965–1990 гг.) было низким, так как годовая величина выноса радионуклида с водосбора составляет 0,3–0,6 % кумулятивного запаса, что меньше доли физического распада  $^{90}\text{Sr}$ .

Ключевые слова:  $^{90}\text{Sr}$ , вынос, водоразделы рек Северная Двина, Печора, Енисей, Лена.

Длительное время Российская Субарктика не рассматривалась в качестве региона, ориентированного на использование атомных электрических станций (АЭС) для выработки электрической и тепловой энергии для нужд крупных городов и портов. Инвестиции государства в проекты строительства плавучих АЭС с планами их последующего размещения в районах Крайнего Севера потребует решения вопросов обеспечения радиационной безопасности этих объектов.

Современные воззрения на техногенные катастрофы и риски от них не исключают инцидентов на ядерных реакторах с инжекцией искусственных радионуклидов (ИРН) в атмосферу и перенос их на значительные расстояния [9, 11, 13]. Поэтому важно превентивно располагать оценками как краткосрочных, так и долговременных последствий загрязнения водоемов и их водосборных территорий долгоживущими ИРН.

Широко распространенные в природе химические элементы 2 группы таблицы Д.И.Менделеева (Ca, Sr) относятся к водным мигрантам, которым свойственна большая подвижность в ландшафтах гумидной, чем аридной областей. Эти элементы в природе не имели радиоактивных аналогов, но в процессе освоения человеком энергии ядер урана и плутония в биосферу Земли были введены разнообразные ИРН, в том числе и  $^{90}\text{Sr}$  с полупериодом распада ~30 лет. Осознание опасности, исходящей от  $^{90}\text{Sr}$ , являющегося химическим аналогом жизненно важного элемента Ca, потребовало длительных исследований поведения  $^{90}\text{Sr}$  в окружающей среде, накопления в живых организмах и воздействия на них.

В биосфере земли радиоактивный Sr представлен  $^{90}\text{Sr}$  бомбового и промышленного генезиса. В первом случае это  $^{90}\text{Sr}$ , рассеянный по поверхности земли глобально, а во втором — это  $^{90}\text{Sr}$ , выведенный за пределы технологических циклов в атомной промышленности в природную среду. Промышленный  $^{90}\text{Sr}$  присут-

ствует в почвенном покрове зон радиационных аварий (Великобритания, г. Уиндсгейл, 1957 г.; Россия, г. Кыштым, 1957 г.; Украина, г. Чернобыль, 1986 г.), а также в составе воздушных выбросов от ядерных промышленных установок (АЭС) и утечек в водоемы-охладители АЭС.

При относительно высокой изученности поведения  $^{90}\text{Sr}$  в гидросфере, по сравнению с другими ИРН, отдельные вопросы его водной миграции с водосборов северных рек исследованы недостаточно. Различия между регионами Российского Севера по климатическим, физико-географическим и ландшафтным условиям [6, 7, 8] предопределяли возможность неодинакового выноса глобального  $^{90}\text{Sr}$  из почвенного покрова водосборных территорий в гидрографическую сеть.

Задача исследований состояла в установлении наиболее общих тенденций, закономерностей и особенностей в стоке  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов северных рек, расположенных в европейской и азиатской частях Российского Севера. Для решения поставленной задачи был привлечен глобальный  $^{90}\text{Sr}$ , используемый в качестве метки почвенного покрова водосборов, с которых в течение нескольких десятилетий  $^{90}\text{Sr}$  выносился в речную сеть.

Методика расчета стока глобального  $^{90}\text{Sr}$  (1961–1990 гг.) с водами рек Европейского Севера ЕТС России, изложенная ранее [1], применена для расчета стока  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов рек Сибири.

Концентрация глобального  $^{90}\text{Sr}$  в речной воде ( $C$ ) и сток радионуклида с водами реки за год ( $R$ ) находились из следующих выражений:

$$C = QP/V, \quad (1)$$

$$R = CV, \quad (2)$$

где  $Q$  – кумулятивный запас  $^{90}\text{Sr}$  на водосборе реки;  $P$  – доля (%) ежегодного выноса  $^{90}\text{Sr}$  от кумулятивного запаса на водосборе;  $V$  – сток реки.

Величина кумулятивного запаса ( $Q$ )  $^{90}\text{Sr}$  на водосборе рек Европейского Севера на конкретные даты временного ряда (1961–1990 гг.) определялась [1] исходя из плотности отложения  $^{90}\text{Sr}$  на почвенный покров ( $A$ ) и площади ( $S$ ) водосбора реки ( $Q = AS$ ).

Значение плотности отложения  $^{90}\text{Sr}$  на почвы водосбора после 1965 г. рассчитывалось по двухкомпонентной экспоненциальной модели

$$A_t = A_{\max} \{K_1 \exp(-0,693t/T_1) + K_2 \exp(-0,693t/T_2)\}, \quad (1)$$

где  $A_t$  и  $A_{\max}$  концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в почвенном покрове ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ) в момент времени  $t$  и в 1965 г. соответственно;  $T_1$  и  $T_2$  полупериоды потерь  $^{90}\text{Sr}$  из почвы (годы), обусловленные стоком  $^{90}\text{Sr}$  «свежих» выпадений, еще не закрепившихся в почвенной среде, и с длительным сроком «старения»  $^{90}\text{Sr}$  в почвах соответственно;  $K_1$  и  $K_2$  – вклады первой и второй компонент.

Распространение многолетнемерзлых пород (ММП) в районе водосборов рек Восточной Сибири, большая продолжительность ледостава и различие в распределении стоков по сезонам года не позволили априорно утверждать, что количественные показатели выноса  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов рек Европейского Севера будут пригодны для определения его стока с водами сибирских рек.

В расчетах стока  $^{90}\text{Sr}$  с водами рек Европейского Севера ЕТС [1] принято, что вынос  $^{90}\text{Sr}$  за 1961–1964 гг. составлял 2 % кумулятивного запаса на водосборе, а в последующие годы – 0,6 %. Эти вводные условия в рекогносцировочном расчете стока  $^{90}\text{Sr}$  с водами Енисея были сохранены, за исключением показателя выноса за 1961 г., который был принят равным 0,6 % по следующей причине: масштабные ядерные испытания в атмосфере начались в конце сентября, к моменту начала ледостава на реках Сибири, поэтому атмосферные выпадения конца

1961 г. не могли повлиять на величину стока  $^{90}\text{Sr}$  из-за экранирования русел рек льдом, а водосборов – снежным покровом. Определение  $^{90}\text{Sr}$  в воде Енисея в четвертом квартале 1961 г. не показало увеличения его концентрации по сравнению с третьим кварталом [12].

Сопоставление рассчитываемых стоков  $^{90}\text{Sr}$  из почвенного покрова водосборов Северной Двины с таковыми для рек Восточной Сибири встретило определенные затруднения из-за наличия у Оби и Енисея дополнительного загрязнения вод промышленным  $^{90}\text{Sr}$ . Данные мониторинга вод Оби и Енисея [5, 14] представлены суммарным значением концентрации  $^{90}\text{Sr}$  (глобального и промышленного). В такой ситуации расчет стока глобального  $^{90}\text{Sr}$  для Енисея представлялся предпочтительным, так как на его водосборе в отличие от Оби (Кыштым, 1957 г.), не было масштабного аварийного загрязнения водосбора промышленным  $^{90}\text{Sr}$ . На водосборе Енисея широко распространены многолетнемерзлые грунты, что сближает его (по этой характеристике) с другими реками Восточной Сибири. Вариабельность водного стока рек Енисея и Лены меньше, чем у Оби.

По расчету сток  $^{90}\text{Sr}$  с водами Енисея за 1961–1990 гг. составил 720, а по опытным данным из [14] – 372 ТБк (см. табл. 1). По-видимому, реальный показатель выноса  $^{90}\text{Sr}$  из почвенного покрова водосбора Енисея был примерно в два раза ниже того, с помощью которого удовлетворительно рассчитывался сток радионуклида с водосборов Северной Двины и Печоры (табл. 1).

В отличие от Енисея на водосборах Северной Двины и Печоры лишь в низовьях локально распространены (ММП) со средней температурой от +3 до –1 °С и мощностью мерзлых пород от 0 до 100 м [6]. Водосбор Енисея характеризуется зоной сплошного распространения ММП с температурой от –1 до –3 °С и мощностью мерзлых пород 50–100 м. Более суровые условия присущи водосборам Лены и ее притоков, где температура ММП на водосборе изменяется от –5 до –9 °С, а их мощность превышает 400 м. Из-за различий по температуре мерзлых пород, подстилающих почвенный покров водосборных территорий, глубина оттаивания в летний сезон верхнего слоя почвы на водосборах не будет одинаковой, как и продолжительность времени, в течение которого часть кумулятивного запаса  $^{90}\text{Sr}$  почвы будет мигрировать в речную сеть. В почвах перенос  $^{90}\text{Sr}$  происходит с потоками влаги при участии ионного обмена, а также в результате диффузии [2, 3, 10]. Эти транспортные механизмы участвуют в формировании выноса  $^{90}\text{Sr}$  из поверхностных слоев почв водосборов в различные водоемы гидрографической сети. Процессы ионного обмена в системе почвенная влага– $^{90}\text{Sr}$ –почва, как и диффузия радионуклида в почве, зависят от температуры. В природных условиях увеличение температуры почвы на 10 °С сопровождается повышением коэффициента диффузии в 2–2,5 раза [10].

Снижение выноса  $^{90}\text{Sr}$  с водосбора Енисея также связано с режим падением водного стока реки в зимний период, который у рек Европейского Севера выражен слабее. У многих притоков сибирских рек из-за промерзания русел до дна зимой сток прекращается.

Таблица 1

Динамика стока  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов рек, ТБк (1961–1990 гг.)  
(числитель – расчетные, знаменатель – экспериментальные данные [14])

Река	Сток $^{90}\text{Sr}$ с водами рек						
	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990	1961–1990
Сев. Двина	36,1/36	18,9/23	14,6/10,7	12,4/14,5	10,7/10,8	9,6/7,0	102,3/102
Печора	32,5/28	17,0/16,5	13,2/12	11,2/10	9,7/7,4	8,6/6,2	92,2/80,1
Енисей	126,9/122	66,1/69	51,7/86	43,3/27	37,7/29	33,4/39	359/372
Лена	119/100	64,6/67	49,9/39	42,3/32	36,9/37	32,7/17	345,3/292

При повторном расчете стока  $^{90}\text{Sr}$  с водами Енисея величина  $P$  выноса радионуклида с водосбора принята равной 0,3 % в год на 1961 и 1965–1990 гг. и 1,0 % – на 1962–1964 гг. от запаса на водосборе. Сток, рассчитанный по этим условиям, оказался близким (360 ТБк) к найденному опытным путем (табл. 1). Стоки характеризовались сходной тенденцией изменения во времени. Поскольку в экспериментальной оценке стока (372 ТБк) присутствуют глобальный и промышленный  $^{90}\text{Sr}$ , то долю промышленного можно определить по их разности. На промышленный  $^{90}\text{Sr}$  пришлось ~3,5 % общего количества, поступившего в бассейн Северного Ледовитого океана. В такой ситуации результаты мониторинга концентраций  $^{90}\text{Sr}$  в воде реки на значительном удалении от Красноярского горно-химического комбината должны быть близки к таковым глобального  $^{90}\text{Sr}$ . По экспериментальным данным [14] концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде Енисея (п. Игарка) с 1978 по 1981 г. колебались от 9 до 14 Бк/м<sup>3</sup>, а по расчету на 1979 г. составили 13,3 Бк/м<sup>3</sup>. Согласованность в оценках концентраций  $^{90}\text{Sr}$ , определенных расчетом и экспериментальным путем, является удовлетворительной.

Правомерность корректировки выноса  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов, занятых ММП, в сторону снижения  $P$  проверялась на примере водосбора р. Лены, не имеющего загрязнения промышленным  $^{90}\text{Sr}$ . Расчетные значения стока  $^{90}\text{Sr}$  для Лены (1961–1990 гг.) близки к установленным экспериментальным путем (табл. 1), но с тенденцией к более высоким значениям к концу временного ряда. Такая тенденция, видимо, связана как с истощением содержания глобального  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных слоях почв водосборов, так и отсутствием свежих выпадений радионуклида из атмосферы. Совпадение расчетной и экспериментальной оценок стока  $^{90}\text{Sr}$  для Лены позволило принять вынос глобального  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов Енисея и Лены (1965–1990 гг.) равным 0,3 % запаса на водосборе. Эта величина относится к выносу с водосборов рек, у которых почвенный покров подстилается толщей ММП и грунтов.

Водосбор Северной Двины находится на широте ~60–70°, а Лены – 54–70° с.ш. Несмотря на более южное расположение значительной части водосбора р. Лены (притоки Витим, Олекма) по сравнению с таковым Северной Двины вынос  $^{90}\text{Sr}$  с водосбора Лены (0,3%) оставался низким. Пониженный вынос  $^{90}\text{Sr}$  с водосбора Лены обусловлен повсеместным распространением мерзлоты и особенностью поверхностного стока. Из-за слабого оттаивания весной верхних слоев почв водосбора происходит быстрый сток талых вод, как и вод дождевых паводков. Промерзание русел малых и средних притоков Лены в зимний период дополнительно приводит к снижению выноса  $^{90}\text{Sr}$  рекой.

Из-за более суровых климатических условий на водосборах Яны, Индигирки и Колымы правомерно ожидать понижения выноса  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов, так как промерзание зимой русел у притоков рек наступает рано, вследствие чего Яна, Индигирка и Колыма имеют небольшой водный сток в зимний период. Правомерно допустить, что температурный фактор в условиях Севера доминирует среди других по влиянию на перенос  $^{90}\text{Sr}$  из почвенного покрова в речную сеть. По В.Н.Димо [8] в Полярном поясе сумма активных температур для почвы равна 130, а в двух областях Бореального пояса – 1290 и 1570. В полевых опытах было показано [3], что повышение температуры почвы на 10 °С приводит к 2–3-кратному увеличению коэффициента диффузии  $^{90}\text{Sr}$ . Различия по сумме активных температур для почв рассматриваемых поясов достаточны, чтобы вызвать изменения в коэффициентах диффузии  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и повлиять на скорость обменных реакций в системе почвенный раствор,  $^{90}\text{Sr}$  – почвенный поглощающий комплекс (ППК) почв.

Сток  $^{90}\text{Sr}$  с водами Енисея (опытные значения) в отличие от Лены имел максимум, приходящийся на 1971–1975 гг. (см. табл. 1). Появление этого максимума, не свойственного стоку  $^{90}\text{Sr}$  у других рек, по-видимому, связано с заполнением на Енисее водохранилищ (Братское, Красноярское), которое могло вызвать

дополнительное поступление  $^{90}\text{Sr}$  из почвенно-растительного покрова затопляемых территорий в речную воду. Глобальным  $^{90}\text{Sr}$  в 1971–1975 гг. были загрязнены не только верхние слои почв водосборов, но и ветви, хвоя, кора и стволы деревьев и кустарников, оказавшихся в зоне затопления.

К Лене по величине годового стока близка североамериканская река Маккензи ( $346,5 \text{ км}^3$ ) с водосбором севернее  $60^\circ$  с.ш. На основе установленных значений выноса глобального  $^{90}\text{Sr}$  (0,3–0,6 %) с водосборов больших рек Российского Севера можно допустить, что вынос радионуклида с водосбора р. Маккензи будет близким к этому диапазону величин.

С помощью глобального  $^{90}\text{Sr}$ , использованного в качестве метки почвенного покрова водосборов, были выявлены различия в выносе радионуклида с речным стоком в бассейн Северного Ледовитого океана. Доля  $^{90}\text{Sr}$ , выносимого с водосборов рек Восточной Сибири, была в  $\sim 2$  раза ниже, чем у рек Европейского Севера ЕТС. В показателе выноса  $^{90}\text{Sr}$  – 0,6 % (Северная Двина, Печора) и 0,3 % (Енисей, Лена) от запаса на водосборе интегрально отразился весь комплекс природных воздействий на миграционный перенос  $^{90}\text{Sr}$  в системе почвы водосбора – сток в реки, что позволяет для рек проводить превентивные оценки возможных последствий загрязнения водосборов  $^{90}\text{Sr}$ . Очищение водосборов рек от глобального  $^{90}\text{Sr}$  (1965–1990 гг.) было низким, так как годовая величина выноса радионуклида составляет 0,3–0,6 % кумулятивного запаса, что меньше доли физического распада  $^{90}\text{Sr}$ . Установленные размеры выноса  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов могут послужить ориентиром в оценках миграции отдельных поллютантов, поступающих на водосборы северных рек аэральным путем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов Н.А. Оценка выноса  $^{90}\text{Sr}$  из почвенного покрова с речным стоком // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 2. С. 198.
2. Бакунов Н.А. Миграция  $^{90}\text{Sr}$  в толще нарушенного сложения: идентификация механизма переноса // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1356.
3. Белова Е.И., Погодин Р.И., Козотков А.Я. Роль диффузии в перемещении  $^{90}\text{Sr}$  по профилю почвы // Инф. бюл. Радиобиология. 1971. № 13. С. 51.
4. Бобовникова Ц.И., Махонько К.П. К вопросу о миграции  $^{90}\text{Sr}$  в пресных водах суши // Радиэкология водных организмов. Рига: Зинатне, 1973. Т. 2. С. 30.
5. Бочков Л.П., Вакуловский С.М. и др. О содержании цезия-137 в поверхностных водах суши // Метеорология и гидрология. 1983. №. 8. С. 79.
6. Водные ресурсы СССР и их использование. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 302 с.
7. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 350 с.
8. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
9. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М. и др. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 295 с.
10. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М.: Энергоиздат, 1981. 96 с.
11. Радиация. Дозы, эффекты, риск. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 80 с.
12. Серёда Г.А., Бобовникова Ц.И. Радиоактивные изотопы в атмосфере и их применение в метеорологии. М.: Атомиздат, 1965. С. 361–372.
13. Baklanov A.A., Mahura A.G. et al. Statistical Analysis of Atmospheric Transport from the Nuclear Risk Sites in the Arctic Region. The 5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic. St.Petersburg. Russia, 2002. P. 119.
14. Chumichev V.B. Sr-90 discharge with main rivers of Russia into the Arctic Ocean during 1961–1990. Scientific Committee of the Environmental Radioactivity in Arctic and Antarctic, Norwegian Radiation Protection Authority. Osteras, Norway, 1995. P. 79–83.

**PECULIARITIES OF GLOBAL  $^{90}\text{Sr}$  RUNOFF FROM WATERSHEADS  
OF SUBARCTIC BIG RIVERS TO THE ARCTIC OCEAN**

*Estimations of  $^{90}\text{Sr}$  runoff from soils of the Russian North watersheds during the period of 1961–1990 have been made.  $^{90}\text{Sr}$  supply to rivers lowered from the west to the east with increasing of climate severity.  $^{90}\text{Sr}$  supply to Severnaya Dvina River and to Pechora River was 0,6% of reserves during one year and 0,3% in a year for Yenisey River and Lena River.*

*Key words:*  $^{90}\text{Sr}$ , runoff, watersheds of Severnaya Dvina River, Pechora River, Yenisey River, Lena River

## РИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ СПЕКТРА ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ НА АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

науч. сотр. В.А.УЛЬЕВ<sup>1</sup>, вед. инж. И.В.МОСКВИН<sup>1</sup>,  
д-р физ.-мат. наук М.И.ТЯСТО<sup>2</sup>, науч. сотр. О.А.ДАНИЛОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@ari.nw.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, e-mail: marta@mt4697.spb.edu

Предложен новый метод (риометрический метод) расчета жесткости геомагнитного обрезания спектра потоков протонов солнечных космических лучей, проникающих в нижнюю ионосферу высоких широт после мощных солнечных вспышек. Метод основан на совместном использовании материалов риометрических наблюдений, полученных во время явлений возрастания поглощения коротких радиоволн в полярных районах (поглощение типа полярной шапки – ППШ), спутниковых наблюдений потоков солнечных протонов, вызывающих ППШ, а так же результатов модельных расчетов повышения поглощения коротких радиоволн в нижней ионосфере в периоды ППШ.

Риометрическим методом определены значения ЖГО (ЖГО<sub>р</sub>) на станции Диксон. Для этой станции так же проведены расчеты поглощения во время 3-х ППШ с использованием риометрических значений ЖГО (ЖГО<sub>р</sub>), а также значений ЖГО, полученных спутниковым методом (ЖГО<sub>с</sub>) и с помощью траекторных расчетов (ЖГО<sub>т</sub>). Сопоставление расчетных данных с экспериментальными показывает, что применение значений ЖГО<sub>р</sub>, рассчитанных риометрическим методом, дает более точные величины поглощения, чем при использовании значений ЖГО<sub>с</sub> или ЖГО<sub>т</sub>. Вычислены коэффициенты пересчета спутниковых и траекторных значений ЖГО при использовании их в ионосферных расчетах поглощения во время ППШ.

**Ключевые слова:** жесткость геомагнитного обрезания, потоки солнечных протонов, риометрические измерения, расчетная модель ППШ.

### ВВЕДЕНИЕ

После мощных солнечных вспышек в ионосферу высоких широт проникают потоки протонов (ПП) солнечного происхождения. Наиболее существенное возмущение ионосферы происходит на высотах 50–90 км (ионосферный слой D), куда проникают ПП с энергией 1–100 МэВ. ПП ионизуют атмосферу, в результате происходит возрастание скорости ионообразования ( $Q$ ), электронной концентрации ( $N_e$ ) и поглощения коротких радиоволн ( $A$ ) (поглощение типа полярной шапки – ППШ).

При модельных расчетах параметров возмущенной ионосферы ( $Q$ ,  $N_e$  и  $A$ ) в модель вводятся значения интенсивности ПП в различных диапазонах энергий от 1–100 МэВ. Спектр ПП, проникающих в данную точку на авроральных широтах, ограничен со стороны малых энергий. Эта граничная энергия называется жесткостью геомагнитного обрезания (ЖГО) спектра ПП. Величина ЖГО зависит от геомагнитной широты пункта (чем ниже геомагнитная широта, тем выше ЖГО), от местного времени (чем ближе к местному полудню, тем выше ЖГО) и высоты (чем меньше высота, тем выше ЖГО). Значения ЖГО определяются экспериментальными или расчетными методами.

Экспериментально ЖГО определяется при регистрации ПП на низколетящих спутниках с полярной орбитой, на ракетах, баллонах и нейтронных мониторах.

Данные нейтронных мониторов, баллонов и ракетного зондирования не могут быть использованы в ионосферных расчетах вследствие различных причин: высокие энергии детектируемых протонов (нейтронные мониторы, баллоны), нерегулярность данных (ракетное зондирование). Спутниковые данные непрерывны и включают необходимый для ионосферных расчетов спектр ПП [1]. Однако спутниковые значения ЖГО могут приводить к ошибкам, так как они получены на высотах около 400–600 км, тогда как ионосферные расчеты производятся для высот около 50–90 км (высота, на которой отдают энергию потоки протонов, вызывающие ППШ).

Расчетным методом является метод прослеживания траектории движения заряженной частицы в моделях магнитосферы. Траекторные расчеты определяют ЖГО как минимальную энергию, которая дает возможность частице покинуть магнитосферу при старте из данной точки [2, 4]. Точность определения ЖГО методом траекторных расчетов определяется точностью описания магнитного поля выбранной магнитосферной моделью. При траекторных расчетах ЖГО обычно используются так называемые статические модели магнитосферы. В этих моделях не учитывается изменение траектории движения заряженной частицы под влиянием ряда динамических факторов (питч-угловое рассеяние протонов в плазме кольцевого тока и др.).

В предлагаемой работе описывается третий метод определения значений ЖГО: расчетно-экспериментальный риометрический метод, который позволяет определить более точно значения ЖГО для ионосферных расчетов.

#### **ОПИСАНИЕ РИОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЖГО**

Основные этапы расчета значений ЖГО риометрическим методом заключаются в следующем.

1. Выбирается вариация поглощения авроральной станции во время ППШ с хорошо выраженным спадом поглощения в дневные часы, т.е. с так называемым эффектом полуденного восстановления (ПВ).

2. Производится модельный расчет поглощения на этой станции. Для этого используется модель вычисления дополнительной скорости ионообразования ( $Q$ ), электронной концентрации ( $N_e$ ) и поглощения ( $A$ ) при ионизации ионосферы на высотах 10–90 км протонами с энергией 1–100 МэВ (модель  $QNA$ ) [3]. В модель  $QNA$  вводятся ПП, зарегистрированные в межпланетном пространстве во время рассматриваемого ППШ. Во время эффекта ПВ поглощение уменьшается как результат проявления суточной вариации ЖГО. При этом в межпланетном пространстве интенсивность ПП не изменяется. Для того чтобы при модельном расчете отследить уменьшение поглощения, ПП ограничивается со стороны малых энергий, т.е. производится отсечка протонов малых энергий. Отсечка подбирается таким образом, чтобы расчетное поглощение равнялось наблюдаемому. Эта величина отсечки (в единицах энергии протона – МэВ) является для данной станции жесткостью геомагнитного обрезания спектра ПП, полученной риометрическим методом (ЖГОр).

3. Набор ежечасных значений ЖГОр за каждый час суток составляет суточную вариацию ЖГО на данной станции.

##### *Основные преимущества риометрического метода.*

1. Значения ЖГО получаются непосредственно для той точки пространства, куда проникают ПП, вызывающие ППШ.

2. Расчет риометрических значений ЖГО с использованием модели  $QNA$  требует гораздо меньше машинного времени, чем траекторные расчеты ЖГО.

##### *Недостатки риометрического метода.*

1. Риометрический метод трудно применить, если ППШ обусловлено потоком протонов с жестким спектром. Если спектр ПП очень жесткий, то вклад в поглощение потоков протонов малых энергий незначителен и практически отсутствует изменение наблюдаемого поглощения в дневные часы (очень малая ампли-

туда эффекта ПВ). Поэтому невозможно достаточно точно отследить изменение расчетного поглощения при изменении отсечки спектра.

2. Риометрический метод невозможно применить, если ППШ происходит на фоне очень высокой геомагнитной активности (ГА). При высоком уровне ГА на вариации поглощения ППШ накладываются всплески аврорального поглощения, вызванные потоками протонов и электронов магнитосферного происхождения. Если эти всплески следуют непрерывно друг за другом, то на их фоне невозможно выделить уровень поглощения ППШ, обусловленный ПП солнечного происхождения.

### АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные вариации поглощения на ст. Диксон за одни сутки каждого из 3-х явлений ППШ: 20 марта 1990 г. (рис. 1 а), 14 апреля 1969 г. (рис. 1 б) и 22 апреля 1998 г. (рис. 1 в) с эффектом полуденного восстановления (ПВ). Поглощение ППШ в эти дни развивалось на фоне низкого уровня геомагнитной активности ( $K_p < 3_0$ ).

Расчетные величины поглощения вычислены при использовании значений ЖГО, полученных тремя методами: риометрическим (ЖГО<sub>р</sub>), спутниковым (ЖГО<sub>с</sub>) и траек-

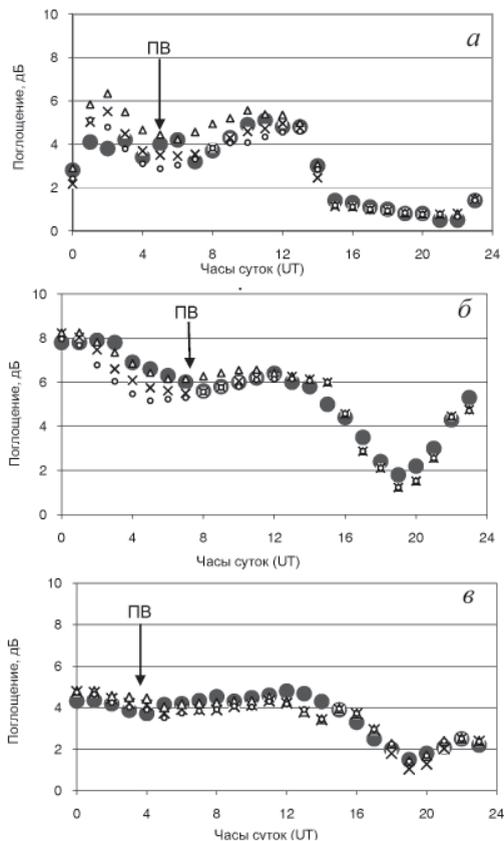


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения поглощения во время трех явлений ППШ: 20 марта 1990 г. (а), 14 апреля 1969 г. (б), 22 апреля 1998 г. (в):

• – экспериментальные значения, × – расчетные значения при использовании ЖГО<sub>р</sub>, Δ – расчетные значения при использовании ЖГО<sub>с</sub>, о – расчетные значения при использовании ЖГО<sub>т</sub>, ↓ – минимум эффекта полуденного восстановления (ПВ)

торным (ЖГОт). Спутниковые значения ЖГО взяты из работы [5]. Траекторные расчеты ЖГО для ст. Диксон выполнены М.И.Тясто и О.А.Даниловой. Риометрические значения ЖГО были определены указанным выше методом. Для этого было отобрано несколько явлений ППШ, происшедших в осенне-весенний сезон года при низком уровне геомагнитной активности. Значения ЖГО за один и тот же час каждого явления ППШ были суммированы, и найдены средние из этих значений. Суточный набор этих средних часовых значений вводился в модельные расчеты.

Из рис. 1 видно, что наиболее близкое значение к экспериментальным данным (зачерненные кружки) имеют расчетные значения поглощения, полученные при использовании значений ЖГО<sub>р</sub> (крестики).

Для статистического подтверждения этого вывода вычислены отношения расчетных величин поглощения к экспериментальным для каждого часа дневной половины суток (с 0 до 11 час UT или с 05 до 16 час местного времени для ст. Диксон) для всех 3-х явлений ППШ:

$$M_p = A_p/A_n, \quad M_c = A_c/A_n, \quad M_m = A_m/A_n,$$

где  $A_p$ ,  $A_c$ ,  $A_m$  – расчетные величины поглощения на ст. Диксон, соответственно, при использовании значений ЖГО<sub>р</sub>, ЖГО<sub>с</sub> и ЖГО<sub>т</sub>.

Значения  $M_p$ ,  $M_c$ ,  $M_m$  представлены на рис. 2. Видно, что разброс значений  $M_p$  относительно ординаты «1» меньше, чем значений  $M_c$  и  $M_m$ .

Вычислены средние за весь дневной период величины  $\bar{M}_p$ ,  $\bar{M}_c$  и  $\bar{M}_m$

$$\bar{M}_p = 1; \quad \bar{M}_c = 1,1; \quad \bar{M}_m = 0,9.$$

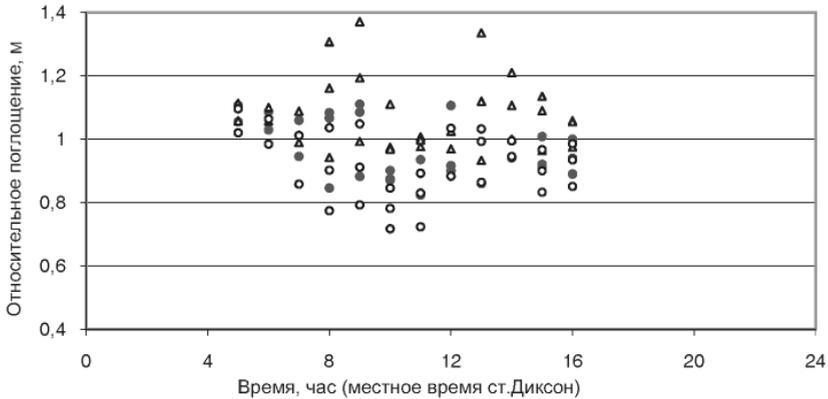


Рис. 2. Относительное поглощение на ст. Диксон в дневные часы для 3-х явлений ППШ: 14 апреля 1969 г., 20 марта 1990 г., 22 апреля 1998 г.

• –  $M_p$ ,  $\Delta$  –  $M_c$ ,  $\circ$  –  $M_m$

Таким образом расчетные величины поглощения, полученные с использованием ЖГО<sub>р</sub>, в среднем равны экспериментальным величинам, а с использованием ЖГО<sub>с</sub> или ЖГО<sub>т</sub> в среднем примерно на 10 % соответственно выше или ниже экспериментальных.

На рис. 3 представлены в местном времени данные ст. Диксон: суточные вариации ежечасных абсолютных значений ЖГО<sub>р</sub>, ЖГО<sub>с</sub> и ЖГО<sub>т</sub> (рис. 3 а) и суточные вариации ежечасных относительных значений жесткости геомагнитного обреза  $K_c$  и  $K_m$  (рис. 3 б):

$$K_c = \text{ЖГО}_c / \text{ЖГО}_p, \quad K_m = \text{ЖГО}_t / \text{ЖГО}_p.$$

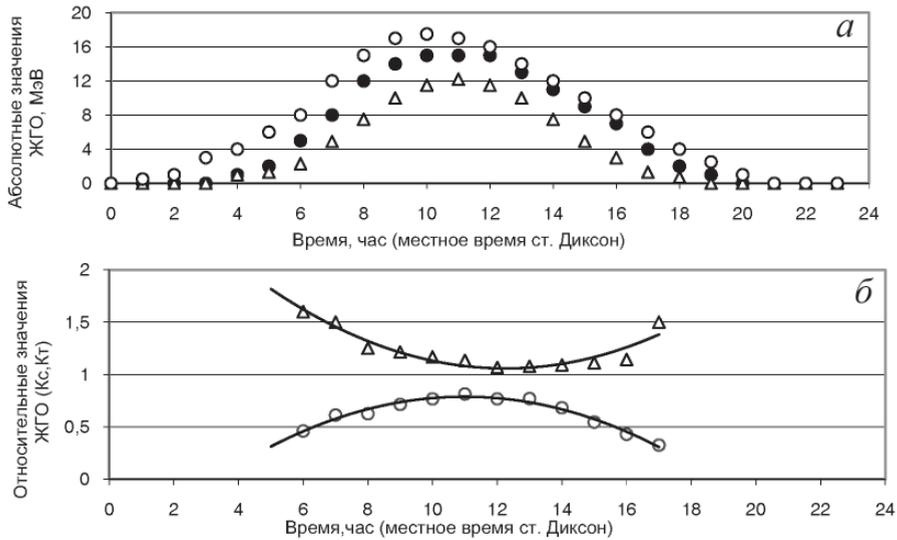


Рис. 3. Суточные вариации абсолютных (а) и относительных (б) значений ЖГО на ст. Диксон. а: • – ЖГО<sub>р</sub>, Δ – ЖГО<sub>с</sub>, о – ЖГО<sub>т</sub>; б: Δ –  $K_c$  (относит. значения ЖГО<sub>с</sub>), о –  $K_t$  (относит. значения ЖГО<sub>т</sub>)

Суточный ход  $K_c$  и  $K_m$  аппроксимирован кривыми, имеющими аналитическое выражение в виде полиномов второй степени:

$$K_c = -0,01t^2 + 0,3t + 0,8, \quad K_m = 0,03t^2 - 0,7t + 5,1,$$

где  $t$  – местное время ст. Диксон в диапазоне от 6 до 18 час.

Из рис. 3 а, 3 б видно, что значения ЖГО<sub>р</sub> больше, чем ЖГО<sub>с</sub>, и меньше, чем ЖГО<sub>т</sub>, при этом различие уменьшается в часы, близкие к полудню (по местному времени ст. Диксон). В среднем значения ЖГО, полученные риометрическим методом, примерно на 40 % больше спутниковых и на 30 % меньше траекторных:

$$\bar{K}_c = \sum K_c / 12 = 0,6, \quad \bar{K}_m = \sum K_m / 12 = 1,3.$$

Более точное соотношение между ЖГО<sub>р</sub> с одной стороны и ЖГО<sub>с</sub> (ЖГО<sub>т</sub>) – с другой для каждого часа в диапазоне местного времени от 6 до 18 час могут быть представлены аналитическими формулами:

$$\text{ЖГО}_р = \text{ЖГО}_с / K_c = \text{ЖГО}_с / (-0,01t^2 + 0,3t + 0,8),$$

$$\text{ЖГО}_р = \text{ЖГО}_т / K_m = \text{ЖГО}_т / (0,03t^2 - 0,7t + 5,1).$$

Выявленные тенденции отличия ЖГО<sub>р</sub> от ЖГО<sub>с</sub> (ЖГО<sub>т</sub>) могут быть объяснены следующим образом. Риометрический метод позволяет определить ЖГО на высотах нижней ионосферы (около 70 км), где протоны теряют свою энергию на ионизацию. На высоту 70 км не могут проникнуть ПП малой энергии и ПП с большими питч-углами, регистрируемые на спутниках на больших высотах (около 600 км). Поэтому риометрические значения ЖГО больше экспериментальных спутниковых.

Траекторные расчеты ЖГО<sub>т</sub> проводились для высот  $h \sim 20$  км над поверхностью Земли в магнитном поле модели магнитосферы Цыганенко 1989 г. [4]. Реальная ионизация ионосферы потоками солнечных протонов, вызывающими ППШ, происходит на высотах 50–90 км. Кроме того в реальной магнитосфере динамические факторы обуславливают проникновение солнечных протонов малых энергий на внутренние оболочки магнитосферы. Следовательно, реальная ионизация ионосферы на высотах 50–90 км в рассматриваемом пункте обусловлена потоками

протонов более низких энергий, чем это следует из траекторных расчетов. Поэтому риометрические значения ЖГО меньше траекторных.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов, полученных в данной работе, можно сделать следующие выводы.

1. Значения ЖГО на авроральных геомагнитных широтах могут быть получены экспериментально-расчетным риометрическим методом с использованием экспериментальных данных по потокам солнечных протонов и по риометрическому поглощению ППШ с эффектом ПВ и модель расчета поглощения ППШ.

2. Величины поглощения, вычисленные с использованием риометрических значений ЖГО, более точны, чем с использованием спутниковых или траекторных.

3. Значения ЖГО, полученные риометрическим методом, в среднем примерно на 30 % больше спутниковых и меньше траекторных.

Таким образом, при модельных расчетах возрастания скорости ионизации, электронной концентрации и поглощения во время ППШ в пунктах, расположенных на авроральных широтах, следует применять значения ЖГО, полученные риометрическим методом, или значения ЖГО, полученные на спутниках или при траекторных расчетах, умножив их на соответствующие пересчетные коэффициенты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тясто М.И., Данилова О.А. и др.* Жесткости обрезания космических лучей в период геомагнитных бурь: сравнение магнитосферных моделей // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. № 3. С. 296–302.
2. *Fanselow J.L. and E.C. Stone.* Geomagnetic cutoffs for cosmic-ray protons for seven energy intervals between 1.2 and 39 MeV // J. Geophys. Res. 1972. Vol. 77. P. 3999–4009.
3. *Patterson J.D., Armstrong T.P., Laird C.M.* Correlation of solar energetic protons and polar cap absorption // J. Geophys. Res., 2001. Vol. 106. № A1, January 1. P. 149–163
4. *Smart D.F., Shea M.A. and E.O. Fluckiger.* Calculated Vertical Cutoff Rigidities for the Int. Space Station during Magnetically Quiet Times // Proc.26<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. 1999. Vol. 7. P. 394–397.
5. *Tsyganenko N.A.* A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet // Planet. Space Sci. 1989. Vol 37. P. 5–20.

V.A.ULYEV, I.V.MOSKVIN, M.I.TYASTO, O.A.DANILOVA

### RIOMETER METHOD OF CALCULATION OF GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITY OF SPECTRUM OF SOLAR PROTONS ON AURORAL LATITUDES

*A new method (riometer method) of calculation of geomagnetic cutoff rigidity of spectrum of solar protons penetrating on auroral latitudes after powerful solar flashes is offered. The method is based on using the riometer data during polar cap absorption (PCA) with midday recovery (MDR) effect, fluxes of solar protons causing PCA and models of calculation of increase of short radio wave absorption in the bottom ionosphere during PCA.*

*Calculations of absorption are spent during several PCA with MDR for station Dickson. Comparison of calculated and observable values of absorption, and also statistical analysis of calculated results show that application of geomagnetic rigidity values received by the riometer method, gives more exact values of absorption, than using the geomagnetic rigidity values received on experimental data (satellite measurements) or by trajectory calculations. Factors of recalculation of the satellite and trajectory geomagnetic rigidity values for computation of ionization rate, electron concentration and absorption during PCA are calculated.*

*Keywords:* geomagnetic rigidity, solar protons fluxes, riometer measurements, computational model of PCA.

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ЦИРКУЛЯЦИИ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК (ЦЕНТРАЛЬНАЯ АНТАРКТИДА)

науч. сотр. Г.В.КАЗКО

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@ari.nw.ru

*Обсуждается проблема моделирования циркуляции подледникового озера Восток. Для решения данной проблемы предлагается применить специально разработанную гидродинамическую модель конвективной циркуляции в переменных завихренности – векторный потенциал, не использующую гидростатическое приближение. Приводятся некоторые результаты расчетов конвективных течений в бассейне кубической формы, демонстрирующие эффективность модели.*

*Ключевые слова:* Антарктика, подледниковое озеро, циркуляция, моделирование

Интерес к различным явлениям, сопутствующим существованию такого уникального труднодоступного объекта, каким является озеро Восток, в частности, возможность обитания в нем микроорганизмов, длительное время эволюционировавших независимо от изученных биологами экосистем, стимулировал появление ряда теоретических работ, в которых делаются попытки рассчитать его циркуляцию. В работах [1] и [2] к решению проблемы привлечены не непосредственно уравнения термогидродинамики, а различные балансовые соотношения. Эти соотношения имеют ясный физический смысл и, в принципе, позволяют, сделав разумные предположения и упрощения, качественно оценить различные аспекты исследуемого явления. Преимуществом такого подхода к решению проблемы является отсутствие необходимости длительных вычислений, к недостаткам – то, что успех в решающей степени зависит от физической интуиции исследователя, и то, что результатом в любом случае могут быть ответы лишь на весьма ограниченный список вопросов. Альтернативный подход – моделирование циркуляции при помощи гидродинамических моделей – использован в работах [3] и [4]. В этих исследованиях применялись модификации известной трехмерной гидродинамической модели в примитивных уравнениях с гидростатическим приближением, изначально разработанной для расчетов циркуляции океана [5]. Преимущества гидродинамического моделирования состоят в том, что оно требует минимального количества упрощающих предположений, позволяя, при правильном выборе модели, получить наиболее подробное и внутренне согласованное представление об исследуемом объекте. Необходимо, тем не менее, сделать одно замечание, касающееся правильности выбора модели. Известно, что характерной особенностью океанской циркуляции является резкое различие модулей горизонтальных и вертикальной компонент вектора скорости воды (на подавляющей части акватории Мирового океана модуль горизонтальной компоненты на 5–6 порядков больше модуля вертикальной). Данный факт служит обоснованием использования гидростатического приближения (удаления из уравнения баланса вертикальной компоненты импульса всех членов, содержащих вертикальную ком-

поненту скорости) в моделях общей циркуляции океана. Однако такие модели не вполне пригодны для описания конвективных процессов, сопровождающихся большими вертикальными скоростями воды, и при расчетах циркуляции в тех немногочисленных районах Мирового океана, где последние наблюдаются (Гренландское море, море Уэдделла), приходится применять специальные «конвективные приспособления» — производить «перемешивание» слоев воды, расположенных на разных глубинах, основываясь на балансовых соотношениях, имеющих лишь косвенное отношение к уравнениям гидродинамики. Оценки параметров циркуляции озера Восток, сделанные при помощи двумерной негидростатической модели [6], показали, что модули горизонтальных и вертикальной компонент скорости воды в озере отличаются лишь на один порядок, поэтому использование гидростатического приближения в моделях циркуляции озера представляется малообоснованным. Существует еще один аспект данной проблемы. Уравнения модели с гидростатическим приближением содержат только первые производные вертикальной компоненты скорости по пространственным переменным. Следовательно, при математической формулировке задачи граничные условия для вертикальной компоненты скорости не могут быть поставлены на всех границах расчетной области. В то же время корректная постановка задачи расчета течения вязкой жидкости в замкнутой области с твердыми границами требует задания условия прилипания (равенства нулю всех компонент скорости) на всех границах. Данное противоречие приводит, вообще говоря, к появлению при расчетах фиктивных источников массы, способных исказить картину циркуляции. Отказ от гидростатического приближения решает обе вышеназванные проблемы (правда, ценой усложнения модели и резкого повышения требований к вычислительным ресурсам).

Предлагаемая гидродинамическая негидростатическая модель циркуляции озера Восток, по замыслу автора, позволит с наибольшей (в настоящий момент) надежностью получить следующие результаты:

- детальную картину циркуляции и распределения температуры воды в озере;
- распределение скоростей намерзания и таяния льда на ледяном потолке озера;
- суммарный баланс намерзания и таяния льда, который, в свою очередь, с учетом скорости перемещения накрывающего озера ледника позволит оценить время полного обновления водной массы озера;
- вывод о возможной связи озера Восток с другими подледниковыми водоемами (в случае нарушения вышеупомянутого баланса);
- размеры взвешенных в воде частиц и места их повышенной концентрации, перспективные с точки зрения поиска обитающих в озере организмов;
- траектории и скорости распространения загрязняющих веществ, которые могут попасть в водное тело озера в случае проникновения в него бурового снаряда и оказаться губительными для гипотетической озерной биоты.

Модель основана на трехмерных уравнениях гидродинамики в переменных завихренность — векторный потенциал без гидростатического приближения и уравнении баланса тепловой энергии, записанных в правой декартовой системе координат с осью  $x$ , направленной на восток, осью  $y$ , направленной на юг, осью  $z$ , направленной вниз перпендикулярно границе раздела лед—вода (Южное полушарие):

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \zeta_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\zeta_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta_x) + \frac{\partial}{\partial z}(w\zeta_x) - \zeta_x \frac{\partial u}{\partial x} - \zeta_y \frac{\partial u}{\partial y} - \zeta_z \frac{\partial u}{\partial z} + \\
 & + 2\omega \left( -\frac{\partial u}{\partial x} \cos\Theta_x + \frac{\partial u}{\partial y} \cos\phi \cos\Theta_y - \frac{\partial u}{\partial z} \sin\phi \cos\Theta_z \right) = \\
 & = \frac{g}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} \cos\Theta_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} \cos\Theta_y \right) + A \left( \frac{\partial^2 \zeta_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta_x}{\partial y^2} \right) + k \frac{\partial^2 \zeta_x}{\partial z^2};
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\zeta_y) + \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w\zeta_y) - \zeta_x \frac{\partial v}{\partial x} - \zeta_y \frac{\partial v}{\partial y} - \zeta_z \frac{\partial v}{\partial z} + \\ & + 2\omega \left( -\frac{\partial v}{\partial x} \cos \Theta_x + \frac{\partial v}{\partial y} \cos \phi \cos \Theta_y - \frac{\partial v}{\partial z} \sin \phi \cos \Theta_z \right) = \end{aligned} \quad (2)$$

$$= \frac{g}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \cos \Theta_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} \cos \Theta_z \right) + A \left( \frac{\partial^2 \zeta_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta_y}{\partial y^2} \right) + k \frac{\partial^2 \zeta_y}{\partial z^2};$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\zeta_z) + \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta_z) + \frac{\partial}{\partial z}(w\zeta_z) - \zeta_x \frac{\partial w}{\partial x} - \zeta_y \frac{\partial w}{\partial y} - \zeta_z \frac{\partial w}{\partial z} + \\ & + 2\omega \left( -\frac{\partial w}{\partial x} \cos \Theta_x + \frac{\partial w}{\partial y} \cos \phi \cos \Theta_y - \frac{\partial w}{\partial z} \sin \phi \cos \Theta_z \right) = \end{aligned} \quad (3)$$

$$= \frac{g}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \cos \Theta_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} \cos \Theta_x \right) + A \left( \frac{\partial^2 \zeta_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta_z}{\partial y^2} \right) + k \frac{\partial^2 \zeta_z}{\partial z^2};$$

$$\frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial z^2} = -\zeta_x; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial z^2} = -\zeta_y; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial z^2} = -\zeta_z; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial x} + \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{\partial \psi_z}{\partial z} = 0; \quad (7)$$

$$u = \frac{\partial \psi_z}{\partial y} - \frac{\partial \psi_y}{\partial z}; \quad (8)$$

$$v = \frac{\partial \psi_x}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial x}; \quad (9)$$

$$w = \frac{\partial \psi_y}{\partial x} - \frac{\partial \psi_x}{\partial y}; \quad (10)$$

$$\zeta_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}; \quad (11)$$

$$\zeta_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}; \quad (12)$$

$$\zeta_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = A \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (14)$$

$$\rho = \rho(p, T). \quad (15)$$

Здесь  $\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$  – компоненты вектора завихренности,  $\psi_x, \psi_y, \psi_z$  – компоненты векторного потенциала,  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости воды,  $\omega$  – модуль вектора угловой скорости вращения Земли,  $\phi$  – широта (южная),  $g$  – мо-

дуль вектора ускорения свободного падения,  $\rho$  – плотность воды,  $A$  и  $k$  – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена соответственно,  $T$  – температура воды,  $\cos\Theta_x, \cos\Theta_y, \cos\Theta_z$  – направляющие косинусы вектора ускорения свободного падения  $\mathbf{g}$  относительно соответствующих координатных осей, связанные известным соотношением  $\cos^2\Theta_x + \cos^2\Theta_y + \cos^2\Theta_z = 1$ . В качестве уравнения состояния использовано уравнение ЮНЕСКО.

Формулировка задачи в переменных завихренность – векторный потенциал позволяет использовать консервативную конечно-разностную схему, что при интегрировании конвективной задачи на длительный срок весьма полезно, если не необходимо. Несколько необычная ориентация координатных осей (ось  $z$  не вертикальна) обусловлена желанием аппроксимировать негоризонтальную, но почти плоскую поверхность раздела вода–лед, вблизи которой происходят важные процессы, такие как таяние и намерзание льда, плоскостью  $z=0$ . (Если бы данная ось была вертикальной, то эта поверхность аппроксимировалась бы «ступенчатой» функцией.)

Расчетной областью является односвязное объединение параллелепипедов с ребрами, равными  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , аппроксимирующее водное тело озера Восток. Граничные условия ставятся только на участках плоскостей, ортогональных координатным осям. Условия прилипания для воды (все компоненты скорости на границах равны нулю), использованные в модели, в данной постановке имеют следующий вид.

Для завихренности:

$$\text{на участке плоскости, ортогональной оси } x: \zeta_x = 0, \zeta_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \zeta_z = \frac{\partial v}{\partial x},$$

$$\text{на участке плоскости, ортогональной оси } y: \zeta_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \zeta_y = 0, \zeta_z = -\frac{\partial u}{\partial y},$$

$$\text{на участке плоскости, ортогональной оси } z: \zeta_x = -\frac{\partial v}{\partial z}, \zeta_y = \frac{\partial u}{\partial z}, \zeta_z = 0.$$

Для векторного потенциала:

$$\text{на участке плоскости, ортогональной оси } x: \Psi_y = \Psi_z = \frac{\partial \Psi_x}{\partial x} = 0,$$

$$\text{на участке плоскости, ортогональной оси } y: \Psi_x = \Psi_z = \frac{\partial \Psi_y}{\partial y} = 0,$$

$$\text{на участке плоскости, ортогональной оси } z: \Psi_x = \Psi_y = \frac{\partial \Psi_z}{\partial z} = 0.$$

Для температуры на всех вертикальных участках границы ставится условие равенство нулю потоков тепла:  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$  ( $n$  – вектор нормали), на верхних горизонтальных участках границы (ледяном потолке) задается температура замерзания воды. На нижних горизонтальных участках границы задается геотермальный

поток:  $Q = -\rho C_v k \frac{\partial T}{\partial z}$  ( $C_v$  – удельная теплоемкость воды при постоянном объеме).

Уравнения (1) – (14) и граничные условия дискретизированы центральными разностями на конечно-разностной сетке с разнесенными узлами, обеспечивающей абсолютную консервативность конечно-разностной схемы. Интегрирование по времени конечно-разностных уравнений осуществляется как с помощью метода Кранка–Николсона (адвективные члены и члены, описывающие эффект растяжения вихревых нитей), так и полностью неявным методом (диссипативные

и кориолисовы члены). Эллиптические уравнения (4) – (6) решаются методом верхней релаксации. Таким образом обеспечивается безусловная устойчивость по Нейману численной схемы с ошибкой аппроксимации порядка  $O(\Delta t^2, \Delta x^3, \Delta y^3, \Delta z^3)$ . Модель прошла стадию отладки и проведения тестовых расчетов течений в бассейнах идеализированной формы, имевших целью проверку устойчивости и консервативных свойств конечно-разностной схемы.

На рис. 1 представлены распределения температуры в вертикальных меридиональной и зональной и горизонтальной плоскостях, проходящих через центр бассейна, рассчитанные на разных этапах эксперимента, в котором моделировалась циркуляция при наличии на дне локального термального источника. О веро-

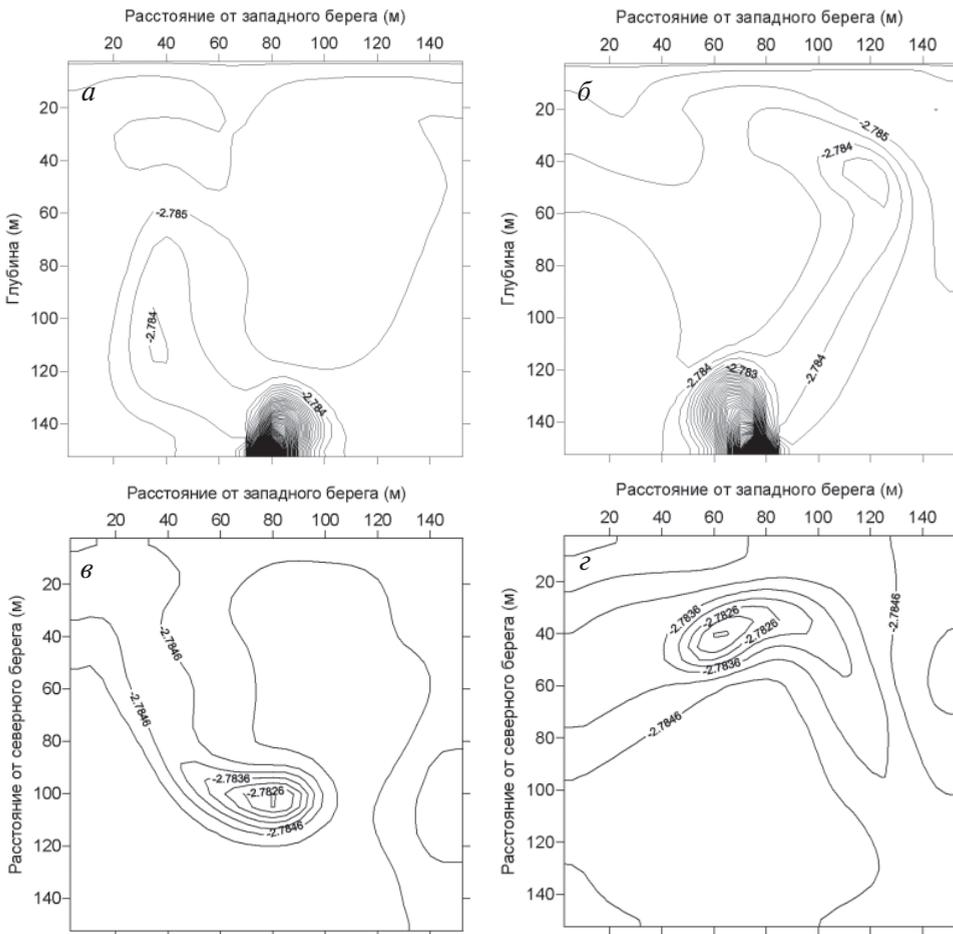


Рис. 1. Поле температуры, сформированное расположенным на дне источником тепла мощностью 50 кВт:

*а* – распределение температуры на зональной вертикальной плоскости, проходящей через центр бассейна (5 суток после начала эксперимента); *б* – распределение температуры на зональной вертикальной плоскости, проходящей через центр бассейна (11 суток после начала эксперимента); *в* – распределение температуры на горизонтальной плоскости, проходящей через центр бассейна (5 суток после начала эксперимента); *г* – распределение температуры на горизонтальной плоскости, проходящей через центр бассейна (11 суток после начала эксперимента)

ятности существования подобных источников свидетельствует факт обнаружения в аккреционном льду термофильных бактерий. Расчетной областью являлся бассейн кубической формы с длиной ребра 150 м, в котором задавались условия, характерные для акватории озера Восток (такие же давление, температура и ориентация угловой скорости вращения Земли относительно декартовой системы координат с осью  $z$ , направленной вертикально вниз, осью  $y$  – на юг). Соленость полагалась равной нулю. На границах бассейна задавались условия прилипания для скорости воды и нулевые потоки тепла на всех границах, кроме верхней, на которой задавалась температура таяния льда (*in situ*), и расположенного в центре нижней границы квадрата размером  $10 \times 10$  м, на котором задавался равномерно

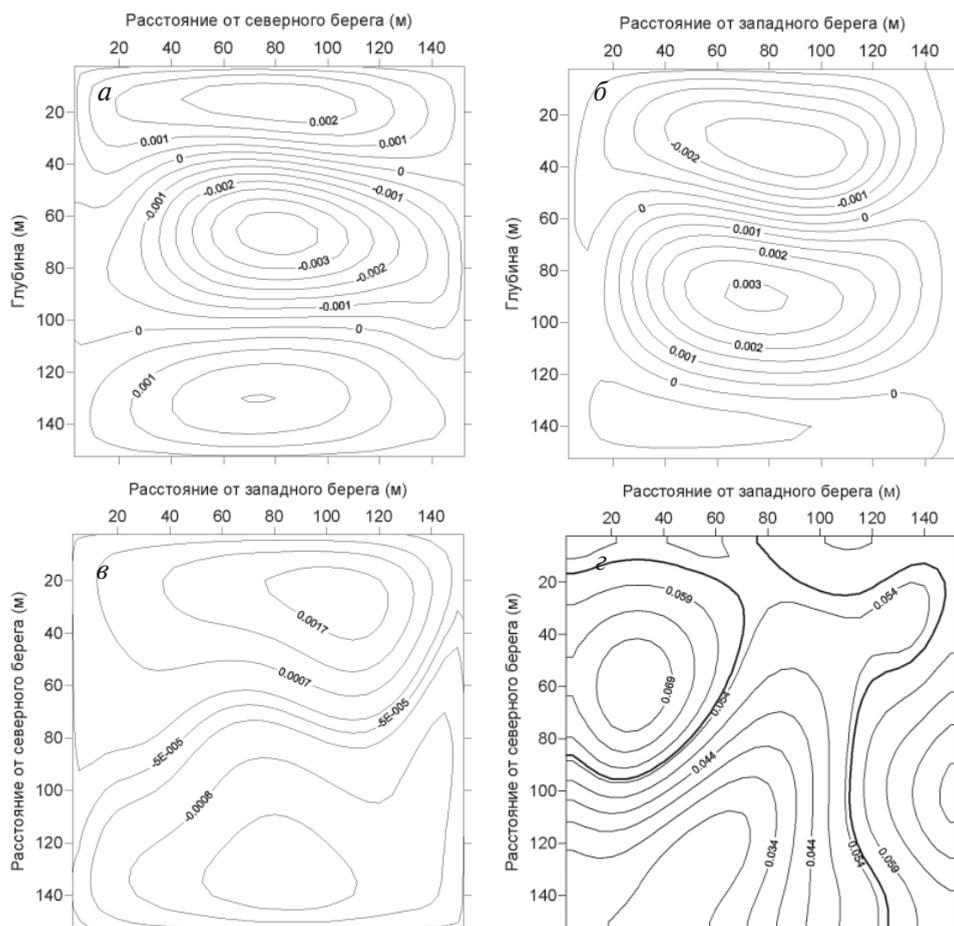


Рис. 2. Циркуляция в бассейне с наклонным ледяным потолком через 32 дня после начала эксперимента:

*a* – распределение зональной компоненты скорости на меридиональной вертикальной плоскости, проходящей через центр бассейна, положительное значение скорости соответствует восточному направлению; *б* – распределение меридиональной компоненты скорости на зональной вертикальной плоскости, проходящей через центр бассейна, положительное значение скорости соответствует южному направлению; *в* – распределение вертикальной компоненты скорости на горизонтальной плоскости, проходящей через центр бассейна, положительное значение скорости соответствует направлению вниз; *г* – распределение потока тепла на верхней границе бассейна, жирная изолиния соответствует геотермальному потоку

распределенный поток тепла суммарной мощностью 50 кВт. В начальный момент времени вода в бассейне находилась в состоянии покоя. Обращает на себя внимание ярко выраженный нестационарный характер циркуляции при стационарности порождающей ее причины.

На рис. 2 представлены некоторые результаты другого численного эксперимента. В нем при тех же начальных условиях, что и в первом эксперименте, моделировалась циркуляция в таком же кубическом бассейне, наполненном пресной водой, но при других граничных условиях. Бассейн был ориентирован относительно вектора ускорения свободного падения таким образом, что наклон его верхней границы (относительно горизонтальной поверхности) совпадал с наклоном ледяного потолка озера. При этом ось  $y$  была направлена на юг. Для скорости воды задавались условия прилипания на всех границах, для температуры – условие теплоизолированности боковых границ, температура таяния льда на верхней и условие, соответствующее геотермальному потоку тепла, равному  $0,056 \text{ Вт/м}^{-2}$ , на нижней границе. В этом эксперименте течение также оказалось нестационарным при стационарности граничных условий.

Можно отметить, что воспроизводимые моделью модули горизонтальных и вертикальных компонент скорости воды, по крайней мере с точностью до порядка, совпадают с их оценками, приведенными в работах [1], [2], [3].

В настоящее время модель адаптируется для расчетов конвективной циркуляции в области, аппроксимирующей водное тело озера Восток. На рис. 3 показана перевернутая для наглядности «вверх дном» расчетная область с разрешением  $25 \times 25 \times 25$  ячеек. Любопытно, что даже при таком грубом разрешении, позволяющем производить численные эксперименты с использованием имеющихся в распоряжении автора вычислительных ресурсов, расчетная область воспроизводит основные особенности рельефа дна озера Восток.

Изложенное позволяет, по мнению автора, сделать вывод о пригодности предложенной модели к изучению конвективных течений и, в частности, к исследованию циркуляции озера Восток с целью получения перечисленных выше результатов.

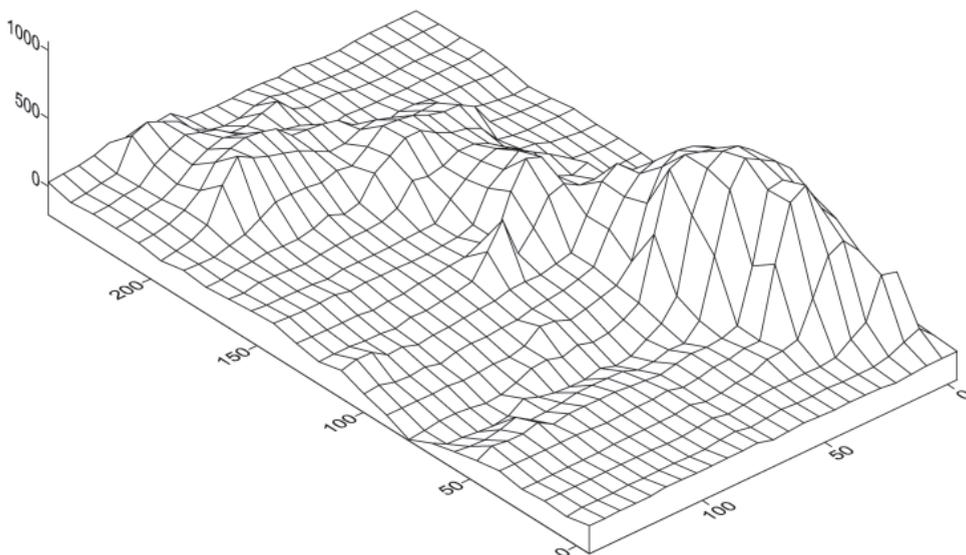


Рис. 3. Перевернутая «вверх дном» расчетная область с разрешением  $25 \times 25 \times 25$  ячеек

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wüest A., Carmack E.* A priori estimates of mixing and circulation in the hard-to-reach water body of Lake Vostok // *Ocean Modelling*. 2001. Vol. 2. P. 29–49.
2. *Petit J.-R.* Geophysical, geochemical, glaciological and energy balance model constraints to the lake Vostok // *Материалы гляциологических исследований*. М., 2004. Вып. 97. С. 91–100.
3. *Williams M.J.M.* Application of a three-dimensional numerical model to Lake Vostok: An Antarctic subglacial lake // *Geophysical research letters*. 2001. Vol. 28. № 3. P. 531–534.
4. *Mayer C., Grosfeld K., Siegert M.J.* Salinity impact on flow a lake ice in Lake Vostok, Antarctica // *Geophysical research letters*. 2003. Vol. 30. № 14. P. 81–84.
5. *Gerdes R.* A primitive equation ocean circulation model using a general vertical transformation. Part 1: Description and testing of the model // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. № 14. P. 683–701.

*G.V.KAZKO*

### **ON THE MODELLING OF SUBGLACIAL LAKE VOSTOK CIRCULATION (CENTRAL ANTARCTICA)**

*Different approaches to a problem of subglacial lake Vostok circulation modelling and main goals of the study are discussed. The hydrodynamical non-hydrostatic water circulation model based on vorticity vectorial potential variables is developed to solve the problem. Some results of convective circulation modelling in rectangular basin to illustrate the model efficiency are presented.*

*Keywords:* Antarctica, subglacial lake, circulation, modelling.

## СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ И ПЛАЗМЕ КРОВИ НАСЕЛЕНИЯ ПРИУРАЛЬСКОГО РАЙОНА

*д-р мед. наук А.Н.МАРТИНЧИК<sup>1</sup>, канд. мед. наук В.Н.ШЕПОВАЛЬНИКОВ<sup>2</sup>,  
мл. науч. сотр. Е.В.ПЕСКОВА<sup>1</sup>, рук. лаборатории В.А.ОНОШКО<sup>2</sup>,  
вед. инж. А.В.ДОМАШЕНКО<sup>2</sup>, мл. науч. сотр. Е.Н.ЛИСЕНКОВА<sup>2</sup>,  
гл. врач В.И.АСАУЛЕНКО<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> – Научно-исследовательский институт питания РАМН, г. Москва

<sup>2</sup> – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@aari.nw.ru

<sup>3</sup> – Харпская городская больница, г. Харпск

Представлены результаты исследования содержания тяжелых металлов хрома, никеля и кадмия в пищевых продуктах местного происхождения (дикоросы, рыба) и в суточных рационах питания организованных коллективов детей и взрослых в трех населенных пунктах Ямало-Ненецкого автономного округа в экологически неблагоприятном поселке Харп и фоновых экологически чистых селах Аксарка и Белоярск. Содержание кадмия в исследованных продуктах не превышало допустимые уровни. Содержание никеля и хрома в рыбе, выловленной в реке Сось вблизи поселка Харп, в десятки раз превышает содержание этих металлов в рыбе, выловленной в реке Щучья вблизи села Белоярск. Высокие величины содержания никеля и хрома обнаружены также в ряде пищевых источников, собранных в природе вблизи поселка Харп. Исследовано также содержание металлов в сыворотке крови волонтеров, проживающих в этих населенных пунктах. Содержание кадмия в сыворотке крови жителей Белоярска достоверно выше, чем его содержание у жителей села Аксарка и поселка Харп. В то же время, содержание никеля в крови жителей Харпа оказалось выше, чем у жителей Аксарки и Белоярска. Получены доказательства возможности контаминации пищевых источников, собранных в окрестностях поселка Харп, никелем и хромом, а также загрязнение этими металлами внутренней среды организма жителей этого поселка.

*Ключевые слова:* тяжелые металлы, пищевые продукты, сыворотка крови, население Ямало-Ненецкого Автономного округа.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования было население поселка Харп, неблагоприятного с экологической точки зрения, и контрольных экологически чистых сел Аксарка и Белоярск.

Поселок Харп расположен в предгорьях Северного Урала и оценивался как экологически благополучный. Однако начиная с 2000 г. в шестидесяти километрах от поселка началась разработка руды, содержащей хром и, частично, никель. Кроме того, недалеко от поселка проводилась добыча щебня, преимущественно из амфиболитов, в которых находится повышенное содержание кадмия. Руда и щебень хранятся практически на территории поселка, где подвергаются дроблению и перевозятся в непосредственной близости от детских лечебных учреждений.

Экологами были проведены исследовательские работы, которые показали высокую загрязненность не только воздушной среды поселка, но и внутренних помещений в детском саду, школе, больнице и санатории-профилактории.

В почве, растительности, в воде реки Сось и ее донных отложениях было обнаружено наличие хрома и никеля, в десятки раз превышающее предельно допустимые концентрации (ПДК).

Рассматриваются пути поступления тяжелых металлов в организм человека с продуктами питания и дикоросами. Исследовано содержание тяжелых металлов в крови 75 волонтеров, проживающих в поселке Харп и селах Аксарка и Белоярск.

#### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ (КАДМИЙ, НИКЕЛЬ, ХРОМ) В СУТОЧНЫХ РАЦИОНАХ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ

Для исследования влияния тяжелых металлов на организм жителей Приуральского района были изучены рационы питания населения поселка Харп и села Белоярск.

В ходе экспедиции в окружающей среде п. Харп были отобраны следующие объекты, используемые жителями в пищу: рыба щекур, ягоды голубики, плоды шиповника, грибы маслята и волнушки, корень родиолы розовой. Кроме того в п. Харп и с. Белоярск были собраны полные суточные рационы организованных групп детей и взрослых.

В отобранных образцах пищевых продуктов и сырья исследовали содержание кадмия, никеля и хрома официально признанным методом атомно-абсорбционной спектрометрии [1]. Результаты анализа сравнивали с существующими нормативами (при наличии нормативов) или с литературными данными.

Результаты исследования содержания тяжелых металлов в пищевом сырье, собранном в окружающей природе (за исключением оленины в п. Харп, которая завозится из других районов Ямало-Ненецкого автономного округа – ЯНАО), представлены в табл. 1. Содержание кадмия в исследованных продуктах не превышало допустимые уровни, регламентированные СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». Только в ягодах голубики из окружающего Харп леса содержание кадмия было приближено к ПДК.

Обращает на себя внимание тот факт, что содержание никеля и хрома в рыбе, выловленной в реке Сось вблизи п. Харп, в десятки раз превышает содержание этих металлов в рыбе, выловленной в реке Щучья вблизи с. Белоярск.

Высокие величины содержания никеля и хрома обнаружены в ряде пищевых источников, собранных в природе вблизи п. Харп. Так, содержание никеля и хрома в маслятах, собранных непосредственно в лесу, примыкающем к п. Харп, составляло 10 и 20 мг/кг сырой массы соответственно. В то же время в грибах волнушках содержание этих металлов было в 10–20 раз ниже – 0,44 и 1,81 г/кг соответственно. Высокое содержание никеля и хрома отмечено также в корнях родиолы розовой, зафиксировано высокое содержание хрома в плодах шиповника. К сожалению, не удалось в ходе экспедиции собрать для сравнительного анализа аналогичные образцы лесных пищевых источников в с. Белоярск или Аксарка, так как на момент экспедиции выпал снег.

Таблица 1

Название продукта	Кадмий		Никель	Хром
	Содержание мг/кг	Допустимые уровни, СанПиН 2.3.2.1078-01, мг/кг, не более		
Рыба щекур, Белоярск	0,03 ± 0,007	0,2	< 0,02	< 0,01
Рыба щекур, Харп	< 0,01	0,2	0,72 ± 0,18	0,71 ± 0,18
Оленина, Белоярск	< 0,01	0,05	0,13 ± 0,03	7,046 ± 1,80
Оленина, Харп	< 0,01	0,05	0,61 ± 0,15	0,59 ± 0,15
Грибы маслята, Харп	0,15 ± 0,04	0,5	10,32 ± 2,6	20,38 ± 5,10
Грибы волнушки, Харп	< 0,01	0,5	0,44 ± 0,11	1,81 ± 0,45
Ягоды голубики, Харп	0,028 ± 0,007	0,03	0,33 ± 0,08	2,71 ± 0,68
Родиола розовая корень, Харп	0,05 ± 0,01	нет норматива	4,57 ± 1,10	3,24 ± 0,81
Шиповник, Харп	< 0,01	0,03	0,83 ± 0,21	16,24 ± 4,10

Только сравнение образцов рыбы, выловленной вблизи п. Харп и с. Белоярск, однозначно свидетельствует о существенно более высоком содержании никеля и хрома в рыбе реки Сось вблизи п. Харп. При этом содержание кадмия в обоих образцах рыбы не превышало допустимого уровня.

Отсутствие санитарно-химических нормативов, регламентирующих допустимые уровни содержания никеля и хрома в индивидуальных пищевых продуктах и пищевом сырье, затрудняет оценку полученных аналитических данных их содержания в исследованном пищевом сырье и продуктах. Представляется возможным лишь сравнить уровни содержания этих элементов в целом, например в растительных объектах или почве. В растительных объектах установлено накопление хрома до 0,20 мг/кг сырой массы, а в мышцах диких животных содержание хрома составляет 0,04–0,48 мг/кг сырой массы. Согласно Сан ПИН 2.3.2 10-78-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов», содержание хрома в пищевых продуктах варьирует в диапазоне 0,005–0,25 мг/кг сырой массы. Содержание хрома в образцах пищевых источников, собранных в п. Харп, значительно превышает эти величины.

В соответствии с данными работы [2] содержание никеля в основных пищевых продуктах находится в пределах 0,18–1,77 мг/кг сырой массы, при этом наибольшие концентрации обнаружены в орехах и семенах [2]. В нашем исследовании эти величины превышены только в грибах маслятах и корне родиолы розовой, тогда как в других продуктах содержание никеля не превышает 1 мг/кг сырой массы. Тем не менее содержание никеля в рыбе, выловленной в п. Харп, существенно превышает уровень металла в рыбе из с. Белоярск.

Результаты исследования уровня поступления металлов с суточным рационом организованных коллективов детей и взрослых представлены в табл. 2. Зарегистрированный вес суточных рационов позволил провести расчет суммарного поступления металлов с рационом. Наименьшие величины поступления металлов были установлены в детском саду п. Харп и школе-интернате с. Белоярск, не превышающие 0,05 мг/день. Максимальные величины поступления с рационом наблюдались в школе и профилактории п. Харп, достигающие в профилактории 0,7 мг/день по хрому.

Поступление кадмия с суточным рационом необходимо оценивать в соотношении величины поступления с условно переносимой нормой поступления (УПНП), составляющей 7 мкг/кг массы тела в неделю. Если принять за отчет поступление кадмия с рационом в профилактории п. Харп 133 мкг/день и принять в расчет стандартную массу тела 70 кг, то недельное поступление 13,3 мкг/кг/неделю составит 189 % от УПНП. Расчеты поступления кадмия по другим рационам не дают превышения УПНП.

Поступление металлов никеля и хрома с рационами представляется возможным оценивать по сравнению с верхними допустимыми уровнями потребления этих металлов. Так, в соответствии с рекомендациями верхний допустимый уровень потребления хрома составляет 250 мкг/сутки.

Таблица 2

Содержание металлов в суточных рационах и дневная нагрузка металлами

№ пр.	Суточные рационы (масса, г)	Кадмий		Никель		Хром	
		мг/кг	мг/сут	мг/кг	мг/сут	мг/кг	мг/сут
3	Харп, школа (1045)	0,046 ± 0,011	0,048	0,12 ± 0,03	0,12	0,33 ± 0,08	0,34
5	Харп, детский сад (2200)	0,02 ± 0,005	0,044	< 0,02	0,044	< 0,01	0,022
12	Харп, профилакторий (2270)	0,059 ± 0,014	0,133	0,094 ± 0,024	0,21	0,31 ± 0,08	0,70
4	Белоярск, школа-интернат (2640)	0,02 ± 0,005	0,053	< 0,02	0,053	< 0,01	0,026
13	Белоярск, больница (1600)	< 0,01	0,016	0,34 ± 0,09	0,54	1,27 ± 0,32	2,03

Оценка поступления никеля затруднена тем, что отсутствуют отечественные рекомендации по допустимым уровням его поступления. В некоторых зарубежных исследованиях указывается допустимый уровень поступления никеля 0,26 мг/сутки. Превышение этого уровня нами выявлено только в рационе больницы с. Белоярск. Высокие величины поступления никеля и хрома с рационом больницы с. Белоярск могут объясняться высоким уровнем содержания металлов, в первую очередь хрома, в оленине, взятой на анализ в больнице с. Белоярск. В то же время в оленине, взятой на анализ в п. Харп, содержание хрома ниже, чем в оленине из с. Белоярск. Известно, что оленина в п. Харп завезена из других районов Ямало-Ненецкого АО. Все эти факты требуют дальнейшего исследования причин высокого содержания металлов в оленине, отобранной в больнице с. Белоярск.

Следует особо подчеркнуть, что, по сведениям работников пищеблока в отобранных рационах в п. Харп не использовались в день отбора продукты, полученные из местного сырья (рыба, ягоды, грибы и др.), а рацион составлен из привозных продуктов.

Проведенные исследования содержания металлов в пищевых продуктах и рационах показали возможность накопления в местных сырьевых источниках пищи металлов кадмия, никеля и хрома. Получены доказательства возможности контаминации пищевых источников, собранных в окрестностях п. Харп, никелем и хромом. Показательным в этом плане является сравнение содержания никеля и хрома в рыбе, выловленной вблизи п. Харп или с. Белоярск. В пользу возможного влияния загрязнения окружающей среды или высокого содержания в почве также свидетельствует высокое содержание никеля и хрома в грибах маслятах, корне родиолы розовой, а также хрома в ягодах голубики и плодах шиповника. Все эти источники пищевых продуктов используются местными жителями. В связи с этим требует более детального исследования возможная нагрузка на организм местных жителей токсичных металлов, содержащихся в объектах окружающей природы – рыбе, ягодах, грибах и других, используемых в пищу.

Так как в рационах, отобранных в п. Харп, не использовались продукты, полученные из местных источников, а именно, из близлежащих объектов окружающей среды (лес, река), то содержание металлов в рационах было на уровнях, опубликованных в литературе и близких к допустимому уровню потребления.

Оценивая значимость полученных свидетельств высокого содержания никеля и хрома в источниках пищевого сырья, следует иметь в виду, что хром относится к незаменимым пищевым факторам, поступление которых с пищей в определенных количествах обязательно. Небольшое превышение допустимых уровней поступления этого металла с пищей не имеет драматических последствий, т.е. неблагоприятного биологического эффекта. Показано, что потребление 1,7 мг/день хрома с пищей не вызывает вредного действия [2]. Однако сам факт возможности загрязнения объектов окружающей среды из внешних источников дает повод для выяснения потенциальной возможности загрязнения другими, более токсичными элементами.

#### **СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ (НИКЕЛЯ, ХРОМА И КАДМИЯ) В КРОВИ ЖИТЕЛЕЙ ПОСЕЛКА ХАРП И СЕЛ АКСАРКА И БЕЛОЯРСК**

Для сравнительной оценки содержания тяжелых металлов (кадмия, хрома и никеля) в крови жителей п. Харп, где содержание этих металлов значительно выше в почве и растительности, донных отложениях реки Сось, в воздухе, и в предположительно экологически чистых селах Аксарка и Белоярск были отобраны группы добровольцев по 25 человек, у которых для исследования была взята кровь в вакуумной пробирке по 5мл.

Цель испытаний – физико-химическое исследование указанных биологических компонентов на наличие кадмия, никеля, хрома.

Перечень средств измерений: анализатор вольтамперометрический «АКВ-07-МК», спектрометр атомно-абсорбционный «МГА-915», СВЧ-минерализатор «Минотавр-1».

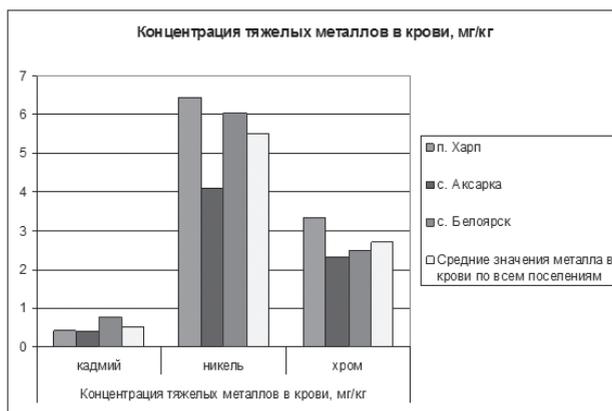


Рис. 1. Усредненные значения содержания кадмия, никеля и хрома в крови 75 волонтеров сел Аксарка, Беляорск и поселка Харп

Средние значения содержания кадмия, никеля и хрома в крови 75 волонтеров п. Харп и сел Аксарка, Беляорск представлены на рис. 1.

Установлено, что референтные пределы по содержанию тяжелых металлов в крови человека составляют для кадмия у некурящих людей от 0,3 до 1,2 мкг/л, у курящих людей — от 0,6 до 3,9 мкг/л, для никеля — от 80 до 120 мкг/л, для хрома — от 1 до 28 мкг/л.

Как видно из рисунка, ни один из показателей содержания тяжелых металлов в крови не превышает референтных пределов. Этот вывод является основным для проведенных исследований.

Вероятно, дефицит микроэлементов может возникать при голодании или однообразном несбалансированном питании, а также при низком содержании какого-либо микроэлемента в почве и воде данной местности. В нашем случае обнаруженные концентрации металлов в крови указывают на достаточное содержание этих элементов (соединений), находящихся в пределах физиологических норм.

Вместе с тем, нами был рассчитан критерий достоверности различия средних величин (*T*-тест, или критерий Стьюдента). Для данных содержания кадмия в крови эти показатели оказались достоверными для Беляорска и Аксарки и Беляорска и Харпа и составили 0,03 при уровне статистической достоверности, т.е. содержание кадмия в крови жителей Беляорска достоверно выше, чем его содержание у жителей с. Аксарка и п. Харп.

Содержание никеля в крови жителей Харпа оказалось выше, чем у жителей Аксарки и Беляорска. При этом уровень достоверности различия средних величин оказался очень высок. Для Харпа и Аксарки он составил 0,01, для Аксарки и Беляорска — 0,02. Различие значений содержания никеля в крови жителей Беляорска и Харпа не достигает уровня статистической достоверности.

Содержание хрома в крови жителей Харпа оказалось статистически достоверно выше, чем у жителей Аксарки и Беляорска. Причем уровень достоверности показателей содержания хрома у жителей Харпа по сравнению с жителями Аксарки достигал уровня статистической достоверности 0,02, а при сравнении средних показателей крови жителей Харпа и Беляорска — 0,05. Статистически достоверных различий между показателями содержания хрома в крови жителей Аксарки и Беляорска получено не было.

Подводя итоги выполненных исследований, следует отметить, что, несмотря на тот факт, что ни один из показателей содержания тяжелых металлов (кадмий, никель, хром) не превышал референтных пределов для этих металлов в крови жителей, тем не менее выявлены статистически значимые различия показателей

средних величин для кадмия в крови жителей Белоярска по сравнению с Аксаркой и Харпом, а также статистически достоверное различие средних показателей содержания никеля в крови жителей Харпа по сравнению с жителями Аксарки и Белоярска и статистически достоверное различие средних показателей по содержанию хрома у жителей Белоярска по сравнению с жителями Аксарки и Харпа.

Эти данные заставляют задуматься о необходимости более тщательного изучения содержания тяжелых металлов в почве, растительности, воде в районе с. Белоярск. Поскольку крупными источниками поступления кадмия в наземные экосистемы помимо химических и горно-обогатительных производств может служить сжигание ископаемого топлива и различных отходов, а металлический кадмий является существенным загрязняющим веществом в навозе, компостах и илах сточных вод, необходимость санитарной и гигиенической оценки территории села Белоярск очевидна.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экологическое состояние поселка Харп Приуральского района Ямало-Ненецкого автономного округа начало резко изменяться с 1999 года. В этот период была начата промышленная разработка хромосодержащих руд. Руда из рудника на рудовозах завозилась непосредственно в поселок, где дробилась, складировалась и загружалась в вагон для отправки на обогатительную фабрику. В результате загрязнения окружающей среды была установлена высокая запыленность воздушной среды непосредственно в п. Харп, высокое содержание хрома и никеля в воде реки Собь, грунте и растениях поселка, а также в районе лесотундры, прилегающей к трассе из рудника в поселок. Содержание хрома и никеля в этих местах в десятки раз превысило ПДК. Были изучены пищевые рационы коренного и пришлого населения п. Харп и контрольных экологически чистых сел Аксарка и Белоярск. Эти исследования показали возможность накопления тяжелых металлов, получаемых из местных сырьевых источников пищи: оленины, рыбы, дикоросов: грибов, кореньев, ягод, шиповника. Наибольшие концентрации хрома и никеля встречались в рационах жителей п. Харп. Исследования содержания тяжелых металлов (хром, никель, кадмий) не выявили превышения ПДК ни у одного из волонтеров. Вместе с тем оказалось, что содержание никеля и хрома достоверно выше в крови у жителей п. Харп по сравнению с аналогичными показателями у жителей сел Аксарка и Белоярск. Таким образом, загрязненность тяжелыми металлами (хром, никель, кадмий) п. Харп, а также анализ пищевых продуктов, поступающих в организм жителей этих населенных пунктов, и анализ крови на содержание тяжелых металлов могут свидетельствовать об определенном патологическом воздействии прежде всего хрома и никеля на организм жителей п. Харп.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов / Под ред. И.М.Скурихина, В.А.Тутельяна. М.: Брандес. Медицина, 1998. 342 с.
2. *Ferré-Huguet N., Martí-Cid R., Schuhmacher M., Domingo J.L.* Risk assessment of metals from consuming vegetables, fruits and rice grown on soils irrigated with waters of the Ebro River in Catalonia, Spain // *Biol Trace Elem Res.* 2008. Vol. 123. P. 1–3, 66–79.

*A.N.MARTINCHIK, V.N.SHEPOVALNIKOV, E.V.PESKOVA, V.A.ONOSHKO,  
A.V.DOMASHENKO, E.N.LISENKOVA, V.I.ASAULENKO*

#### CONTENTS OF HEAVY METALS IN FOODS AND BLOOD SERUM OF PEOPLE LIVING IN NEAR URALS AREA OF YAMAL-NENETS AUTONOMOUS OKRUG

*The heavy metal contents in local foods (wild berries mushrooms and herbs, fish) and in whole daily food items of institutionalized groups of people in three settlements of Yamal-Nenets Autonomous*

*Okrug were studied. Content of cadmium in foods were lower than maximum allowable levels. Contents of nickel and chromium in fish of local river Sob near settlement Harp were ten times higher than in fish caught in river Schuchja nerar settlement Beloyarsk. High levels of nickel and chromium were detected in various wild berries, mushrooms and herbs got out in forest near Harp. Level of cadmium in blood serum of volunteers living in Beloyarsk was higher than level in serum of Aksarka's and Harps residents. In the same time the serum levels of nickel and chromium were higher in Harps residents. There are possibilities of real contamination of local food items in area of settlement Harp and heavy metals loading on people living in this area.*

*Key words:* heavy metals, foods, blood serum, population of Yamal-Nenets Autonomous Okrug.

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 91.(091); 91.(092)

Поступила 3 марта 2008 г.

## ИМЕНА СОТРУДНИКОВ ААНИИ НА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КАРТАХ

В 2010 г. Арктическому и антарктическому научно-исследовательскому институту исполняется 90 лет.

История ААНИИ началась в 1920 г. с организации Северной научно-промышленной экспедиции для научно-технической поддержки и развития Северных территорий. В 1925 г. экспедиция была преобразована в Институт по изучению Севера. С 1936 г. институт стал называться Арктическим научно-исследовательским институтом, а в конце 1950-х гг. получил свое современное название Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

История института это не просто научные достижения и публикации, не просто экспедиционные исследования и сеть полярных станций. История института это, прежде всего, его сотрудники.

Рядовые техники и инженеры, начальники отделов, директора, — именно они творили историю института, каждодневным трудом внося вклад в освоение Арктики и Антарктики, отдавая при этом все свои силы, а порой и жизнь.

Многие события истории со временем стираются из памяти. Уходят из жизни очевидцы, теряются отчеты, гибнут архивные документы. Но, сколько бы ни прошло лет, географические карты будут неизменно хранить историю нашего института, запечатленную в названиях островов, ледников и заливов, носящих имена его сотрудников.

Именно им сотрудникам ААНИИ, чьи имена присвоены географическим объектам, — посвящается этот цикл статей «Имена сотрудников ААНИИ на географических картах».

Директор института,  
Председатель редакционного совета  
И.Е.Фролов

## АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ ГАУДИС

н.с. М.В.Дорожкина, д-р геогр. наук Л.М.Саватюгин

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
г. Санкт-Петербург, aaricoop@aari.nw.ru



А.И.Гаудис. 1950-е годы.  
Фото из архива ААНИИ

Недалеко от нефтебазы в районе причала №1 российской антарктической станции Молодежная в бухту Фрит вдается мыс Гаудиса. Не одно поколение полярников видело этот приметный мыс, стоя на борту экспедиционного судна на рейде, пролетая над станцией, выполняя маршруты в ходе сезонных и зимовочных работ или же просто глядя на карту Земли Эндерби. Название мыс Гаудиса можно найти на страницах научно-технических отчетов, оно упоминается в докладах конференций, звучит в разговорах полярников. Но мало кто знает и помнит, что этот далекий мыс на 67° 41' ю.ш. и 45° 46' в.д. был назван в 1965 г. в память о сотруднике нашего института Александре

Ивановиче Гаудисе, погибшем во время испытания новой аэрофотосъемочной аппаратуры при аварии самолета на мысе Шелагский. Имя А.И.Гаудиса есть и на карте Арктики. В 1963 году Архангельский облисполком решением № 651 от 26 августа утвердил в память об инженер-гидрологе ААНИИ Александре Ивановиче Гаудисе название ледник Гаудиса на острове Кейна архипелага Земля Франца-Иосифа.

Александр Иванович родился 24 июня 1916 г. в городе Уфе. Отца своего он не знал, мать, Валентина Борисовна, проживавшая на иждивении сестры, воспитывала его в одиночку. В 1918 г. вместе с матерью Саша переехал на Украину в город Полтаву, где жили родители матери. Здесь Валентина Ивановна устроилась на работу воспитателем, а затем заведующей детским домом. В 1924 г. она вышла замуж за Ивана Леонтьевича Гаудиса, ремонтного рабочего железной дороги, который усыновил мальчика. Вскоре в их семье появилось еще двое детей. В 1929 г. А.И.Гаудиса отправили в Ленинград, где его взяла на воспитание сестра матери, работавшая врачом. В 1934 г. он окончил среднюю школу и поступил на восьмимесячные курсы техника-гидрографов. Летом 1935 г. уже в качестве техника-гидрографа А.И.Гаудис впервые принял участие в экспедиционных работах в Арктике.

По возвращении из экспедиции, осенью 1935 г. он поступил в Гидрографический институт ГУ СМП. Во время учебы в институте в летний период он ежегодно принимал участие в арктических экспедициях, выполняя обязанности техника-гидрографа, техника-гидролога, помощника капитана. Без отрыва от учебы, по комсомольскому набору, в 1938—1939 гг. он окончил школу пилотов при Ленинградском аэроклубе. В декабре 1939 г. А.И.Гаудис женился на Татьяне Сергеевне Жеребцовой. В июне 1940 г. окончил институт, получив специальность инженера-гидрографа. Сразу после окончания института он был призван в ВМФ и зачислен в качестве производителя аэрофотосъемочных работ в Гидрографическую экспедицию Краснознаменного Балтийского Флота.

Великая Отечественная война застала А.И.Гаудиса на Балтийском море, где он занимался выполнением аэрофотосъемки. 28 августа 1941 г. А.И.Гаудис получил тяжелое ранение в области позвоночника. После ле-

чения в госпитале он вновь вернулся в строй и продолжил нести боевую службу на Ленинградском фронте, где принимал участие в создании системы стереофотограмметрического метода засечек батарей противника, обстреливавших Ленинград. С помощью этой системы, действовавшей до февраля 1944 г., был обнаружен 1181 объект противника, в том числе 1025 орудий. Через год, в октябре 1942 г., А.И.Гаудиса перевели в Гидрографический отдел Краснознаменного Балтийского Флота на должность аэрофотосъемщика. С 1943 г. А.И.Гаудис жил в незарегистрированном браке с Таисией Евгеньевной Ивановой. (В 1947 г. он попытается развестись с первой женой, однако ввиду ее несогласия, суд откажет ему в разводе. За нарушение советского закона о браке и семье в 1953 году Парткомиссия Главного Политического Управления вынесет ему строгий выговор.)

В ноябре 1943 г. А.И.Гаудис был откомандирован в город Баку на Высшие Гидрографические курсы офицерского состава. По окончании класса аэрофотосъемки в августе 1944 года А.И.Гаудис был назначен младшим преподавателем кафедры гидрометеорологии, а затем геодезии Высшего Военно-Морского училища им. Фрунзе в Ленинграде. В 1946 г. он был переведен на должность преподавателя, а в 1951 г. на должность старшего преподавателя училища. В ноябре 1945 г. Политотделом училища А.И.Гаудис был принят в члены ВКП(б). Одновременно с чтением курса «Аэрофотосъемка» в Высшем Военно-Морском училище им. Фрунзе А.И.Гаудис читал курсы «Аэрофотосъемка», «Аэрофотография» и «Стереофотограмметрия» в Военно-Морской академии кораблестроения им. А.Н.Крылова, Высшем арктическом морском училище им. С.О.Макарова и Ленинградском государственном университете. В 1947 г. инженер-майор А.И.Гаудис работал по совместительству консультантом по съемке волнений в Гидровоенпроекте. В 1949—1950 гг. он являлся консультантом по аэрофотосъемочным работам в Ленгиппроречтрансе, занимался подготовкой кадров по аэрофотосъемочным специальностям и участвовал в составлении «Практического руководства по изысканиям на реках» (1952 г.). В 1951—1952 гг. в качестве консультанта по аэрофотосъемке инженер-подполковник А.И.Гаудис принимал участие в формировании отдела изыс-

каний Ленморпроекта. В период с 1947 по 1952 г. он участвовал в экспедиционных исследованиях на Белом, Балтийском и Азовском морях, а также в полевых изысканиях на строительстве Волго-Донского канала. В 1953 г. в звании инженера-подполковника А.И.Гудис был демобилизован из рядов Военно-морских сил.

За время службы А.И.Гудис был награжден медалью «За оборону Ленинграда» (1943), орденом Отечественной войны (1944), медалью «За победу над Германией» (1945), медалью «Тридцать лет Советской Армии» (1948) и медалью «За боевые заслуги» (1950).

В январе 1954 года А.И.Гудис был зачислен младшим научным сотрудником в Арктический научно-исследовательский институт (АНИИ). Летом он уже принимал участие в экспедиции института «А-66» в качестве аэрофотосъемщика. Через год, в январе 1955 г., А.И.Гудиса перевели в лабораторию аэрометодов института, а в апреле 1957 в отдел ледовых прогнозов. Начиная с 1954 г. А.И.Гудис ежегодно принимал участие в арктических экспедициях. Летом 1957 г. в качестве гидролога-ледового разведчика он участвовал в Высокоширотной воздушной экспедиции «Север-9». За активное участие в подготовке экспедиции и ее успешное проведение приказом директора АНИИ А.И.Гудису была объявлена благодарность. В том же году за разработку аэрофотосъемочной аппаратуры для обеспечения навигации он был отмечен благодарностью приказом Министра Морского флота.

20 июля 1959 года А.И.Гудис вновь был командирован в Арктику для испыта-

ния аппаратуры быстрой печати аэропленки на борту самолетов ледовой разведки в Восточно-Сибирском море. 10 августа 1959 г. самолет ЛИ-2 (бортовой номер 04210) с группой сотрудников АНИИ, возглавляемой А.И.Гудисом, возвращался с ледовой разведки. В состав группы входили слесарь В.С.Суворов, гидролог-разведчик А.С.Федоров, стажер О.Романов. Самолет пилотировал экипаж под командованием Ю.М.Кулева. Неожиданно для всех второй пилот решил не обходить мыс Шелагский, а пройти над ним прямо на аэропорт Апапельхино. На подходе к мысу самолет, который летел на автопилоте, стоковым ветром бросило вниз. Второй пилот с запозданием успел отключить автопилот и задраить нос самолета. Но перевалить через мыс самолету не удалось. Машина ударилась в вершину мыса, подпрыгнула вверх и врезалась в огромный валун. А.И.Гудис получил тяжелое ранение и скончался на месте катастрофы. Всего в трагедии на мысе Шелагский погибло 7 человек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бородачев В.Е., Шильников В.И.* История ледовой авиационной разведки. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 441 с.
1. *Масленников Б.* Морская карта рассказывает. М.: Воениздат, 1986. 367 с.
2. Топонимика морей Советской Арктики // Сост. Попов С.В., Троицкий В.А. Л., 1972. 316 с.
3. *Трибуц В.Ф.* Балтийцы сражаются. М.: Воениздат, 1985. 464 с.
4. Архив отдела кадров АНИИ. Оп. 1. Д. 3030.

**ВИТАЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БОГОРОДСКИЙ**  
(1919–1986)*д-р физ.-мат. наук Г.А.ЛЕБЕДЕВ**ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
г. Санкт-Петербург, aaricoop@aari.nw.ru*

22 апреля 2009 г. исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося советского ученого в области радиофизики, гляциологии и дистанционного зондирования окружающей среды Виталия Васильевича Богородского.

Он родился в г. Пошехоно-Володарское Ярославской области, далеко от научных центров страны. Но его способности к точным наукам: математике, физике, химии — привели его в 1939 г. в Ленинград, где он поступил на физический факультет Ленинградского государственного университета. Великая Отечественная война 1941–1945 гг. резко изменила научные планы Виталия Васильевича. Войну он встретил под Сталинградом рядовым бойцом артиллерийского полка, а закончил в звании капитана и должности начальника штаба артиллерийского полка, пройдя боевой путь от Сталинграда до Вены в составе частей Южного, 2-го и 3-го Украинских фронтов. Его смелость и отвага в боевых действиях были отмечены двумя орденами Отечественной войны I степени, орденом Отечественной войны II степени, орденом Красной Звезды, а также многочисленными медалями, среди которых: «За победу в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За оборону Кавказа», «За взятие Вены», «За освобождение Белграда». В июне 1945 г. капитан В.В.Богородский участвовал в историческом Параде Победы на Красной площади в Москве.

После демобилизации из рядов вооруженных сил в 1946 г. Виталий Васильевич поступил на спецфакультет Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ) и окончил его с отличием в 1951 г. Его склонность к научной ра-



боте, проявившаяся еще во время учебы, определила его поступление в аспирантуру ЛЭТИ сразу после окончания института в 1955 г., он успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Вся дальнейшая творческая жизнь Виталия Васильевича была связана с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом, куда он пришел на работу после защиты диссертации и где в

1956 г. организовал и возглавил лабораторию гидроакустики. Эта лаборатория в последующие годы выросла под его руководством в крупный отдел физики льда и океана, ставший одним из ведущих в стране научных центров по разработке и применению физических методов для исследования полярных районов Земли.

Именно в это время гидроакустические исследования в Арктическом бассейне стали приобретать комплексный характер, причем их направленность определялась как задачами развития фундаментальной науки, так и практическими требованиями создания совершенной гидроакустической аппаратуры широкого применения.

Все это определило широкий спектр исследований, направленных как на изучение особенностей собственно гидроакустических полей в различных районах Арктического бассейна, так и на анализ их связей с океанологической, ледовой и метеорологической обстановкой в исследуемых районах.

В общей сложности этими исследованиями охвачен период с 1956 по 1990 г. Они проводились с использованием последних достижений в области радиофизики, электроники, радиотехники, гидроакустики и сейсмоакустики в широкой кооперации с дру-

гими организациями страны на 23 научно-исследовательских дрейфующих станциях «Северный полюс» (начиная с СП-6 и кончая СП-30, включая организацию специализированных дрейфующих станций). Сам Виталий Васильевич неоднократно лично возглавлял работы радиофизического отряда в высокоширотных экспедициях «Север».

Наиболее важное направление исследований, определившее приоритет ученых ААНИИ в отечественной и мировой полярной гидроакустике, связано с изучением пространственно-временных и спектрально-энергетических характеристик подледного шумового поля для различных условий его формирования и динамики.

Большой объем теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в различных районах СЛО учениками Виталия Васильевича (А.В.Гусевым, Г.А.Лебедевым, В.П.Гаврило, А.П.Поляковым, И.К.Поповым, В.А.Спицыным), позволил развить ряд новых направлений изучения акустики океана и льда и разработать на их основе новые методы изучения ледовых образований, динамических и термических процессов в ледяном покрове, его дрейфа и изменения толщины во времени.

Эти исследования явились основой для разработки специализированной гидроакустической аппаратуры широкого назначения, оптимизации параметров антенных систем и схем оптимальной обработки информации, создания специализированных баз данных и выделения классификационных признаков шумов, формируемых различными источниками, а также решения обратных задач гидроакустики.

За комплекс гидроакустических исследований в Арктике, имеющих большое значение для развития фундаментальной науки и решения прикладных задач, В.В.Богородскому вместе с рядом ученых АН СССР и промышленных организаций была присуждена в 1969 г. Государственная премия СССР в области науки.

Указанные исследования, а также исследования, связанные с радиолокацией ледяных покровов, теоретические и методические основы которых были заложены в известной работе В.В.Богородского совместно с В.Н.Рудаковым «К вопросу об определении толщин ледников электромагнитными методами», явились основой его диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в 1966 г.

К середине шестидесятых годов уже можно было говорить о сформировавшейся

научной школе В.В.Богородского, в состав которой входили молодые научные работники, большинство из которых стали впоследствии крупными учеными и руководителями собственных научных школ и направлений. Среди них профессора и доктора наук Л.Т.Тучков, Г.А.Лебедев, А.В.Гусев, А.И.Козлов, А.И.Логвин, В.П.Гаврило, А.В.Оганесян, Р.Х.Вагапов, Г.Е.Смирнов, К.К.Сухоруков и др.

Активная научная деятельность и крупные научные результаты, полученные В.В.Богородским и его коллегами, привели к признанию Виталия Васильевича одним из авторитетных в масштабах страны ученых в области радиофизики, гляциологии, акустики и физики льда и океана, и в 1970 г. он был избран член-корреспондентом Академии наук СССР.

К числу важнейших проблем физики и механики льда, на решение которых были сосредоточены усилия ряда подразделений отдела физики льда и океана под руководством В.В.Богородского в 1970-е г., относятся исследования, направленные на изучение взаимодействия льда с инженерными сооружениями, разработку и совершенствование на этой основе методов расчета ледовых нагрузок и несущей способности ледяного покрова, методов активной борьбы со льдами, включая изучение проблем обледенения, создание эффективных методов и технических средств разрушения льда, его термобурения и терморезания.

Направленность этих исследований и их практическая значимость определялись задачами промышленного освоения шельфовой зоны арктических морей, требованиями круглогодичной навигации на трассах Северного морского пути, строительством и эксплуатацией гидротехнических сооружений в замерзающих морях, различными инженерными работами на припайных и дрейфующих льдах.

Результаты новых исследований в области физики льда и гляциологии были опубликованы в монографиях В.В.Богородского «Физика пресноводного льда» (совместно с А.В.Гусевым и Г.П.Хохловым, 1971 г.), «Лед. Физические свойства, современные методы гляциологии» (совместно с В.П.Гаврило, 1980 г.), «Разрушение льда. Методы, технические средства» (совместно с В.П.Гаврило, О.А.Недошивиным, 1983 г.).

О важности указанных исследований в обеспечении народнохозяйственных и оборонных нужд страны и высоком научном уровне их осуществления свидетельствует

присуждение в 1983 г. Виталию Васильевичу с коллегами второй Государственной премии СССР в области науки и техники за цикл работ этого направления.

В конце 1960-х — начале 1970-х гг. Виталия Васильевича все больше интересуют проблемы дистанционного зондирования и мониторинга окружающей среды методами активной и пассивной радиолокации. Успехи в этом направлении приходят через достаточно небольшой промежуток времени, и очень скоро школа Виталия Васильевича занимает одно из лидирующих мест в стране и в этом научном направлении. Результаты этих исследований публикуются в четырех монографиях Виталия Васильевича, написанных совместно с учениками и коллегами, «Радиотепловое излучение земных покровов» (совместно с А.И.Козловым и Л.Т.Тучковым, 1977 г.), «Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов» (совместно с Д.Б.Канарейкиным и А.И.Козловым, 1981 г.), «Микроволновая радиометрия земных покровов» (совместно с А.И.Козловым и А.И.Логвиным, 1985 г.); «Проникающая радиолокация морских и пресноводных льдов с цифровой обработкой сигналов» (совместно с А.В.Оганесяном, 1987 г.).

Нельзя не отметить и широкое мировое признание Виталия Васильевича как одного из ведущих ученых в мире в области физики льда, гляциологии, радиолокационных методов дистанционного зондирования и контроля за состоянием окружающей среды. Его многократно приглашали для участия и выступлений на международных научных конгрессах и симпозиумах, проходивших в США, Франции, Канаде, Финляндии и других странах. Результатом международного сотрудничества явилась написанная совместно с известными западными учеными Ч.Бентли и П.Гудмансеном монография «Радиогляциология», изданная в 1983 г.

Виталий Васильевич — автор свыше 250 научных статей и работ, большинство из которых опубликовано в самых престижных советских и западных изданиях: в ДАН

СССР, Журнале экспериментальной и теоретической физики, Proceedings of IEEE и других.

Активную научную деятельность Виталий Васильевич сочетал с большой педагогической работой, ему в 1968 г. было присвоено ученое звание «профессор». Он подготовил и прочитал курс лекций по математической физике в Ленинградском гидрометеорологическом институте и курс лекций по электронным приборам в Ленинградском электротехническом институте, где он в 1972–1978 гг. был заведующим кафедрой фотоэлектронных приборов. В течение многих лет Виталий Васильевич являлся научным консультантом в аспирантуре Центрального научно-исследовательского института «Морфизприбор» и внес существенный вклад в подготовку специалистов высшей квалификации для отечественной гидроакустики, обеспечивших становление и развитие гидроакустического вооружения флота нашей Родины.

Виталий Васильевич был человеком энциклопедических знаний по самому широкому кругу научных проблем: физика и механика льда, гидроакустика и гидрооптика, активная и пассивная радиолокация, дефектоскопия и лазерная техника в применении к изучению геофизических объектов, методы контроля окружающей среды и методы искусственного управления свойствами ледяного покрова.

Он был удивительно скромным, чутким и душевным человеком. Его дом всегда был открыт для многочисленных друзей и учеников.

Всю свою жизнь Виталий Васильевич особое внимание уделял подготовке молодых ученых. Не случайно среди его учеников в возглавляемом им отделе выросли 6 докторов наук и 21 кандидат наук. И сегодня, по прошествии более 20 лет со дня его смерти, научная школа Виталия Васильевича продолжает жить в его многочисленных учениках, развивающих сформированные им научные направления.

## **ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»**

1. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста в формате Microsoft Word с полуторным интервалом, включая список литературы, таблицы и рисунки.
2. Статьи должны быть представлены в распечатанном виде и переданы в электронном формате на CD или flash-накопителе (только при личной явке автора) в соответствии с нижеприведенными требованиями. Допускается пересылка файлов со статьей по электронной почте.
3. В комплект статьи, присылаемой автором, должны входить:
  - Основной текст статьи на русском языке (включает в себя подрисовочные подписи и библиографический список).
  - Иллюстративный материал в виде отдельных файлов любого из графических форматов в соответствии с нижеприведенными требованиями.
  - Текст аннотации на русском и английском языках.
  - Ключевые слова на русском и английском языках.
  - Название статьи, инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках.
  - Сведения об авторах (ученая степень (или должность при отсутствии степени), название организации, город, электронная почта и телефон (в статье не публикуется)) только на русском языке.
  - УДК статьи.
  - Акт экспертизы и сопроводительное письмо, подписанное руководителем организации или учреждения, где работает автор (авторы), или самим автором (авторами).
4. Требования к представляемым текстовым файлам:
  - Текст должен быть представлен в формате Word 97–2003. При подготовке текста необходимо использовать стандартный шрифт Times New Roman 12 пт., для набора греческих и некоторых специальных символов использовать шрифт Symbol.
  - Дробные части чисел отделяются от целых ЗАПЯТОЙ, а не точкой.
  - Не допускается:
    - использование цифры 0 и буквы O в надстрочном написании в качестве символа градуса;
    - символа «-» вместо «—»;
    - использование символа «x» вместо символа «X»;
    - использование символов N, O, S, W в качестве указания широты и долготы как в текстах, так и на картах;
    - использование неразрывного пробела.
  - В качестве внешних кавычек используется пара «». При необходимости использования внутренних кавычек набираются кавычки “”.
5. Требования к таблицам:
  - Таблицы должны быть подготовлены в Microsoft Word шрифтом Times New Roman (при необходимости Symbol) 9 пт.
  - В каждой ячейке таблицы НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ более 1 абзаца
  - При подготовке таблиц следует помнить, что максимальная ширина таблицы в книжной ориентации 125 мм, в альбомной 195 мм.
  - Таблицы оформляются разделительными линиями толщиной 0,5 пт.
6. Требования к графическим файлам:
  - Иллюстрации к статье готовятся в любом доступном для автора редакторе или приложении. При этом каждая иллюстрация ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ В ВИДЕ ОТДЕЛЬНОГО ФАЙЛА в одном из графических форматов: \*.jpg, \*.tif, \*.eps, \*.cdr, \*.wmf, \*.ai. НЕ ПРИНИМАЮТСЯ иллюстрации, помещенные в документы Word или нарисованные в нем. Допускается иллюстративный материал в формате \*.xls

(строго БЕЗ рамок). Все иллюстрации должны быть ЕДИНООБРАЗНЫ (шрифт, линии) по стилю.

- Принимаются только черно-белые иллюстрации. Цветные изображения должны быть отредактированы авторами с учетом того, что цвет не является носителем информации и проконвертированы в черно-белые (серые). Растровые иллюстрации должны иметь разрешение не менее 300 пикс/дюйм. НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ использование тоновых заливок.
  - Размер и ориентация иллюстрации подбираются автором исходя из размеров полосы верстки, которая не превышает 195×125 мм (максимальный размер иллюстрации, включая подрисовочную подпись и легенду).
  - Для иллюстраций в векторном формате (рисунке в формате Corel Draw, Adobe Illustrator, Microsoft Excel или файлы, экспортированные в формат \*.wmf) необходимо использовать только стандартные шрифты Windows (Times New Roman, Symbol) или их аналоги Type-1. При использовании иных шрифтов они должны быть проконвертированы в кривые.
  - Для оцифровки осей рисунков необходимо использовать только вышеуказанные шрифты НОРМАЛЬНОГО начертания, размером не более 10 пт. Десятичный знак при оцифровке осей – только ЗАПЯТАЯ.
  - Все карты, схемы, диаграммы, рисунки должны быть на русском языке.
7. Требования к списку литературы:
- Список работ, на которые есть ссылки в тексте, формируется в алфавитном порядке по фамилии первого автора (при отсутствии автора используется первая буква названия работы) и нумеруются. Сначала идет перечень публикаций на русском языке, далее, при сквозной нумерации, иностранных публикаций также в алфавитном порядке. Все работы из списка оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008.
  - Ссылка на номер работы дается в тексте в квадратных скобках [ ].

С полным перечнем требований к статьям можно ознакомиться на web-странице журнала <http://www.aari.ru/main.php>.

Редакция оставляет за собой право делать необходимые редакционные исправления, дополнения, сокращения.

За размещение статей в журнале оплата НЕ ВЗЫМАЕТСЯ.

Всем авторам публикаций бесплатно высылается 1 экземпляр журнала.

Подписано в печать 2.04.2009.  
Формат 70×100 1/16.  
Тираж 500 экз.

Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 10.  
Заказ № 56.

Ротапринт ГНЦ РФ АНИИ  
199397, ул. Беринга, 38