

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**№ 56**

Научно-теоретический журнал

*Издается с октября 2005 года*  
*Выходит 4 раза в год*

ISSN 2074-2762

Санкт-Петербург



2019

УДК 3 + 502.52 + 55

ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 56. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019. 197 с.

Представлены статьи по наиболее актуальным современным проблемам изучения природной среды: изменениям климата в региональном и глобальном масштабах; мониторингу, моделированию и прогнозированию физических процессов в атмосфере, водах суши и морской среде; влиянию антропогенной деятельности на разнообразные процессы в биосфере, атмосфере и гидросфере Земли. Материал сгруппирован по специальностям. В разделе «Хроника» освещены события жизни университета.

Журнал предназначен для ученых, широкой категории исследователей природной среды, а также аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

*Редакционный совет:*

**Чилингаров А.Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корреспондент РАН, президент РГГМУ — *председатель совета*  
**Михеев В.Л.**, канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ — *зам. председателя*  
**Мушкет И.И.**, д-р юрид. наук, проф., проректор РГГМУ — *зам. председателя*  
**Вильфанд Р.М.**, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ГМНИЦ РФ; **Кулешов Ю.В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского по учебной и научной работе; **Лил В.У.**, д-р наук, проф. ун-та г. Гамбург (Германия) и ун-та г. Манчестер (Великобритания); **Мохов И.И.**, д-р физ.-мат. наук, академик РАН, зав. отделом исследования климатических процессов ИФА РАН; **Румянцев В.А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН, научный руководитель Института озерадения РАН; **Тимофеева А.Г.**, канд. геогр. наук, ректор Института повышения квалификации Росгидромета; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, научный руководитель программы НИУ СПб ГПУ; **Филатов Н.Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корреспондент РАН, директор Института водных проблем Севера КарНЦ РАН; **Фролов И.Е.**, д-р геогр. наук, проф., член-корреспондент РАН, научный руководитель ГНЦ ААНИИ; **Хуакин Л.**, д-р наук, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Джейнг (КНР); **Шапрон Б.**, д-р наук, ведущий ученый института морских исследований IFREMER (Франция); **Яковенко М.Е.**, руководитель Росгидромета

*Редакционная коллегия:*

**Малинин В.Н.**, д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*  
**Воробьев В.Н.**, канд. геогр. наук, проф. — *зам. главного редактора*  
**Шилина М.Б.**, д-р геогр. наук, проф. — *зам. главного редактора*  
**Гайдукова Е.В.**, канд. техн. наук — *отв. секретарь*  
**Барышников Н.Б.**, д-р геогр. наук, проф.; **Бескид П.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Кондратьев С.А.**, д-р физ.-мат. наук; **Кудрявцев В.Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Рябенко В.А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Тимофеев Ю.М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Угрюмов А.И.**, д-р геогр. наук, проф.; **Фирова И.П.**, д-р эконо. наук, проф.; **Щукин Г.Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 07.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

ISSN 2074-2762

Подписной индекс 78576 в «Каталоге российской прессы "Почта России"».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Полнотекстовые версии опубликованных статей в виде pdf-файлов размещаются в Интернете для свободного доступа на сайте журнала <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> сразу же после его выхода.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2019

© Авторы публикаций, 2019

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

---

THE FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL  
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION  
“RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY”

**PROCEEDINGS**  
OF THE RUSSIAN STATE  
HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

**№ 56**

A theoretical research journal

*Published since October, 2005*  
*4 issues a year*

ISSN 2074-2762

St. Petersburg



2019

UDC 3 + 502.52 + 55

LBC 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 56. St. Petersburg: RSHU Publishers, 2019. 197 p.

The Journal contains articles on the most relevant contemporary problems of studying the environment: climate change in regional and global scales; monitoring, modeling and forecasting of physical processes in the atmosphere, inland and ocean waters; influence of anthropogenic activity on various processes in the biosphere, atmosphere and hydrosphere of the Earth. The material is grouped by specialty. The "Chronicle" section covers the events of the University life.

The Journal is intended for scientists, a broad category of environmental researchers, as well as post-graduate and graduate students of these specialties.

*The Editorial Board:*

**Chilingarov A.N.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of RSHU — *Chairman*

**Mikheyev V.L.**, Candidate of Juridical Sciences, Assistant Professor, Rector of RSHU — *Vice-Chairman*

**Mushket I.I.**, Doctor of Juridical Sciences, Professor, Vice-Rector RSHU — *Vice-Chairman*

**Vilfand R.M.**, Doctor of Engineering Science, Professor, scientific director of Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation; **Kuleshov Yu.V.**, Doctor of Engineering Science, Professor, deputy director of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research; **Leal W.**, Dr., Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (Great Britain); **Mokhov I.I.**, Doctor of Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Research Department Climatic Processes of IAP RAS; **Rumyantsev V.A.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, scientific director of the Institute of Limnology RAS; **Timofeeva A.G.**, Candidate of Geographical Sciences, Rector of the Institute for Advanced Studies of Roshydromet; **Fedorov M.P.**, Doctor of Engineering Science, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Filatov N.N.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Water Problems of the North Karelian Research Centre of RAS; **Frolov I.E.**, Doctor of Geographical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Huaqing Lu**, Dr., Professor, vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Shapron B.**, Dr., leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Yakovenko M.Y.**, the Head of Roshydromet

*Editors:*

**Malinin V.N.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor — *Editor in Chief*

**Vorobyev V.N.**, Candidate of Geographical Sciences, Professor — *Deputy Editor in Chief*

**Shilin M.B.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor — *Deputy Editor in Chief*

**Gaidukova E.V.**, Candidate of Engineering Sciences — *Executive editor*

**Baryshnikov N.B.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **Beskid P.P.**, Doctor of Engineering Science, Professor;

**Kondratiev S.A.**, Doctor of Physics and Mathematics; **Kudryavtsev V.N.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor;

**Ryabchenko V.A.**, Doctor of Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S.P.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor;

**Timofeev Yu.M.**, Doctor of Physics and Mathematics; **Ugryumov A.I.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor;

**Firova I.P.**, Doctor of Economics, Professor; **Shchukin G.G.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

The Journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, which should publish the main results of theses for the Doctor and Candidate of sciences degree.

The Journal is registered in the Russian Federal Surveillance Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection in the North-Western Federal District.

Certificate ПИ № ФС2-8484 of July 02, 2007.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geocology, geophysics, social and human sciences.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

Subscription index 78576 in «Catalogue of the Russian press "Post of Russia"».

The Journal is included in the «Russian Science Citation Index» database (RSCI), based on the platform of the National Electronic Library (<http://elibrary.ru>). Full-text versions of published articles as pdf-files are posted on the Internet for free access on the Journal's website <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/> immediately after its publication, afterwards being available on the National electronic library website (<http://elibrary.ru>).

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Office address: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia.

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2019

© Authors of publications, 2019

ISSN 2074-2762

## СОДЕРЖАНИЕ

### Метеорология

- Антонов С.В., Бычков А.А., Корнеев В.П., Сергеев Б.Н., Частухин А.В., Щукин Г.Г.* О применении беспилотных летательных аппаратов с целью обеспечения работ по активному воздействию на облака и туманы . . . . . 9
- Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Погорельцев А.И.* Диагностика нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн . . . . . 19
- Гусейнов Н.Ш., Агаева А.А.* Применение индексов неустойчивости атмосферы к оперативному прогнозированию грозы на основе модельных данных . . . . . 30
- Рыбанова А.Ю., Фокичева А.А., Воробьева Л.Н., Кориунов А.А.* Экономическая ценность информационной деятельности гидрометеорологической службы . . . . . 38
- Фокина К.В., Булгаков К.Ю., Восканян К.Л.* Численное моделирование бризовой циркуляции . . . . . 50
- Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В.* Особенности изменчивости летних центров действия атмосферы над Дальним Востоком и климатические экстремумы в период 1980—2017 гг. . . . . 61

### Океанология

- Войнов Г.Н.* Общая характеристика приливов на основе новых значений гармонических постоянных в Финском заливе . . . . . 81
- Малинин В.Н., Вайновский П.А.* Когда наступит безледный режим регионов Арктики? . . . . . 98

### Геоэкология

- Кровнин А.С., Мельников С.П., Никитенко А.И., Мурый Г.П.* Влияние современных изменений климата на сообщества морских рыб в Североатлантическом регионе . . . . . 110
- Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О.* Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) . . . . . 126
- Чурюлина А.Г., Бочарников М.В.* Ареал березы шерстистой (*betula lanata* (regel) v. *Vassil*) и влияние на него изменений климата . . . . . 133

### Гидрология

- Клюев П.В., Лебедев С.А.* Климатическая изменчивость ледового режима Рыбинского водохранилища по данным СВЧ-радиометра, ориентированного в надир . . . . . 145

## Социально-гуманитарные науки

<i>Брейдер Н.А., Урютова Ю.А.</i> К вопросу контроля качества образования как инструмента эффективного управления образовательным процессом вуза.....	157
<i>Лазар М.Г.</i> Плагиат в научных коммуникациях современной эпохи .....	166

## В порядке дискуссии

<i>Шмакова М.В., Кондратьев С.А.</i> Транспортирующая способность речного потока.....	176
<i>Католиков В.М.</i> О статье «Транспортирующая способность речного потока».....	188
Сведения об авторах .....	194

# CONTENTS

## Meteorology

<i>Antonov S.V., Bychkov A.A., Korneev V.P., Sergeev B.N., Chastuchin A.V., Shchukin G.G.</i> The use of unmanned aerial vehicles for support of works on weather modification of clouds and fog. . . . .	9
<i>Didenko K.A., Ermakova T.S., Kovall A.V., Pogoreltsev A.I.</i> Diagnostics of nonlinear interaction of stationary planetary waves. . . . .	19
<i>Huseynov N.Sh., Agayeva A.A.</i> Application of atmospheric instability indexes for operational thunder forecasting based on the model data. . . . .	30
<i>Rybanova A.Yu., Fokicheva A.A., Vorobyova L.N., Korshunov A.A.</i> Economic value of information activities of the hydrometeorological service . . . . .	38
<i>Fokina K.V., Bulgakov K.Yu., Voskanyan K.L.</i> Numerical modelling of breeze circulation . . . . .	50
<i>Shatilina T.A., Tsitsiashvili G.Sh., Radchenkova T.V.</i> Features of the summer atmospheric force centers variability over the Far East and climatic extremes in the period 1980—2017. . . . .	61

## Oceanology

<i>Voinov G.N.</i> General characteristics of tides as the base the new of harmonic constants in the gulf of Finland . . . . .	81
<i>Malinin V.N., Vainovsky P.A.</i> When will ice-free regime of different Arctic regions come on? . . . . .	98

## Geocology

<i>Krovnin A.S., Melnikov S.P., Nikitenko A.I., Moury G.P.</i> Climate change impact on fish communities in the North Atlantic region. . . . .	110
<i>Lazarev I.S., Kochetova Zh.Yu., Bazarsky O.V., Baklanov I.O.</i> Monitoring and forecasting contamination of land next to the airfield (for example, Engels). . . . .	126
<i>Churiulina A.G., Bocharnikov M.V.</i> Geographical distribution of the betula lanata (regel) v. Vassil and the impact of climate change on its dynamics. . . . .	133

## Hydrology

<i>Klyuev P.V., Lebedev S.A.</i> Climatic variability of the Rybinsk reservoir ice regime based on the nadir-oriented microwave radiometer . . . . .	145
--	-----

## Social science and humanities

<i>Breider N.A., Uryutova Y.A.</i> Quality control in education as a tool for effective management of higher education . . . . .	157
<i>Lazar M.G.</i> Plagiarism in scientific communications of the post-modern era. . . . .	166

### **In order of discussion**

<i>Shmakova M.V., Kondratyev S.A.</i> Transporting capacity of river flow . . . . .	176
<i>Katolikov V.M.</i> About article “Transporting capacity of the river flow” . . . . .	188
List of authors . . . . .	194

## О ПРИМЕНЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТ ПО АКТИВНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОБЛАКА И ТУМАНЫ

*С.В. Антонов<sup>1</sup>, А.А. Бычков<sup>1</sup>, В.П. Корнеев<sup>1</sup>, Б.Н. Сергеев<sup>1</sup>,  
А.В. Частухин<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> АНО «Агентство атмосферных технологий», attech@mail.ru

<sup>2</sup> Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Приводятся результаты экспериментальных исследований (численных экспериментов) по оценке возможности применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении работ по активному воздействию (АВ) на облака и туманы. Представлено описание разработанных технических средств, которыми оснащаются БПЛА для проведения работ по АВ и обеспечения этих работ данными о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы.

*Ключевые слова:* активные воздействия, беспилотные летательные аппараты, пограничный слой атмосферы, низкая облачность, переохлажденный туман.

## THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR SUPPORT OF WORKS ON WEATHER MODIFICATION OF CLOUDS AND FOG

*S.V. Antonov<sup>1</sup>, A.A. Bychkov<sup>1</sup>, V.P. Korneev<sup>1</sup>, B.N. Sergeev<sup>1</sup>,  
A.V. Chastuchin<sup>1</sup>, G.G. Shchukin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> The Autonomous Nonprofit Organization «Agency of Atmospheric Technologies»

<sup>2</sup> Mozhaisky Military Space Academy

The article considers the results of numerical experiments aimed to assess the possibility of weather modification of clouds and fog by means of unmanned aerial vehicles. The authors present a description of UAV equipment that is intended for weather modification works and provides data on the vertical wind profile in the atmospheric boundary layer.

*Keywords:* unmanned aerial vehicles, sensing of the atmospheric boundary layer, work on weather modification of supercooled fog.

### Введение

Активные воздействия на различные формы облачности и туманы в интересах тех или иных отраслей экономики по-прежнему представляют собой одно из востребованных направлений деятельности [3].

С точки зрения используемых технических средств технологии воздействия на облака можно разделить на два типа: самолетные и наземные.

К самолетным средствам воздействия относятся генераторы, стационарно устанавливаемые на борту самолета, и генераторы, отстреливаемые с борта самолета непосредственно в облако.

Современные самолетные технологии АВ широко применяются для борьбы с градом, при проведении работ по искусственному регулированию осадков, в том числе работы по искусственному увеличению осадков (ИУО) в интересах гидроэнергетики и сельского хозяйства, работы по борьбе с лесными пожарами и работы по искусственному уменьшению летних и зимних осадков в интересах коммунальных служб крупных городов.

В наземных технологиях в первую очередь используются генераторы, которые диспергируют реагент непосредственно с поверхности Земли. В результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований, выполненных как в России, так и за рубежом, были разработаны технические средства и методики их применения в стационарном и мобильном вариантах [7]. Так, в 2001 г. на их основе была разработана автоматизированная система воздействия, позволяющая проводить работы по АВ с целью рассеяния переохлажденных туманов на автодорогах и в аэропортах. Следует отметить, что в мировой практике проведения работ по АВ наземные генераторы (НАГ) нашли широкое применение при проведении работ с целью ИУО и для борьбы с градом [3].

В настоящее время активно ведутся работы по модернизации существующих и разработке новых технических средств воздействия с целью уменьшения стоимости работ по АВ. Достичь максимального снижения стоимости выполнения работ по АВ без снижения эффективности возможно с привлечением к выполнению работ по АВ беспилотных летательных аппаратов [3, 4].

До последнего времени трудно было представить возможность использования беспилотных систем при проведении работ по АВ ввиду узкой направленности сферы их применения. Все ранее разрабатываемые беспилотные системы использовались в основном в военных целях и в большинстве случаев выполняли свой полет на большой высоте вне полей облачности.

В последние годы стали появляться беспилотные комплексы среднего класса, что позволило расширить сферу применения БПЛА в народнохозяйственных целях. Современные БПЛА позволяют осуществлять подъем полезной нагрузки общей массой от 1 до 30 кг и выполнять полеты длительностью от 2 до 4 часов.

В связи с этим весьма актуальной становится задача по оценке эффективности применения БПЛА в работах по АВ. Одним из основных инструментов, позволяющих произвести такую оценку, является численное моделирование процесса воздействий. Преимуществом такого моделирования является возможность определения степени влияния таких факторов, как метод проведения воздействия, тип применяемых технических средств и режим их функционирования, на эффективность работ по АВ с учетом конкретных синоптико-климатических и географических условий, характерных для данного района.

Целью данной работы является выполнение численных расчетов по оценке эффективности применения беспилотных летательных аппаратов при проведении работ по активному воздействию на облака и туманы.

### Использование БПЛА для АВ на облака

С целью определения возможности применения в работах по искусственному увеличению осадков БПЛА и оценки их эффективности были проведены численные эксперименты по моделированию активных воздействий на облака с борта БПЛА с помощью трехмерной численной модели SeedDisp [1].

Модель SeedDisp предназначена для расчета переноса реагента в заданном трехмерном поле ветра. Модель ограничена мезомасштабной областью расчета с размерами по горизонтали от нескольких десятков до нескольких сотен километров и по вертикали включает всю тропосферу. В качестве исходных данных в модели используются данные наземных метеорологических наблюдений, радиозондирования атмосферы, а также данные о рельефе местности. Результаты расчетов, выполненных с помощью модели, позволяют определить, как осуществляется перенос реагента в подоблачном слое, достигает ли реагент нижней границы облака и какова при этом его концентрация при проведении АВ генераторами различных типов с использованием в качестве реагента йодистого серебра и жидкого азота.

С целью проверки эффективности применения БПЛА в работах по АВ на облака были выполнены численные расчеты переноса поля реагента в подоблачном слое при проведении АВ с помощью самолетных аэрозольных генераторов AgI, установленных как на самолете (рис. 1 а), так и на БПЛА (рис. 1 б).

Технические характеристики генераторов AgI приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики пиротехнических генераторов AgI

Время работы	4 мин
Расход состава	0,3 г/с
Выход льдообразующих ядер при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1,0 \cdot 10^{13}$ част./г
при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0,2 \cdot 10^{13}$ част./г

Расчеты были проведены для реальных метеорологических условий с учетом рельефа местности для территории Крымского полуострова.

В качестве исходной информации использовались следующие данные:

- наземной метеорологической станции (г. Севастополь);
- аэрологической станции радиозондирования (г. Симферополь);
- о рельефе местности;
- высота воздействия 2000 м;
- длительность воздействий 1 ч;
- скорость полета
  - для самолета 340 км/ч,
  - для БПЛА 120 км/ч.

Ниже представлены горизонтальные сечения полей концентрации частиц реагента на высоте 2 км через 1 ч после начала воздействия, выполненного с помощью БПЛА (рис. 2 а) и с помощью самолета (рис. 2 б).

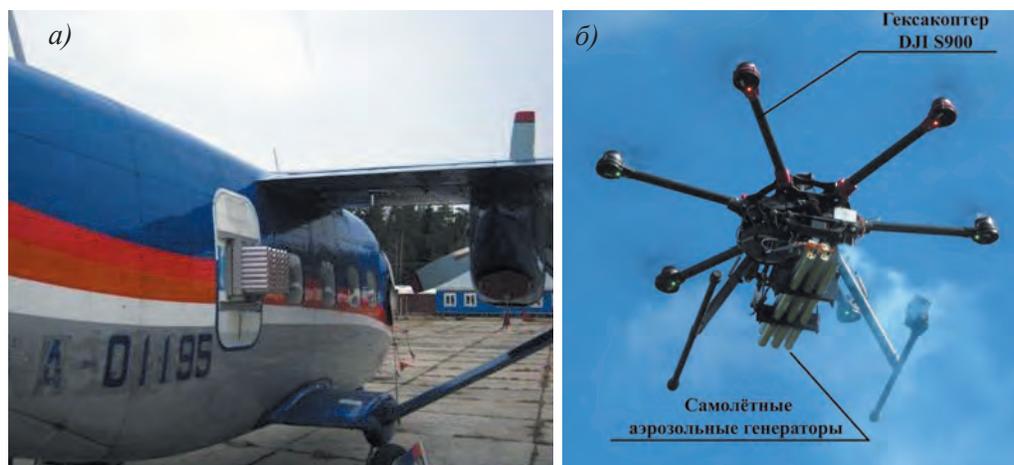


Рис. 1. Общий вид генераторов AgI, установленных на самолете Ан-28 (а) и БПЛА (б).

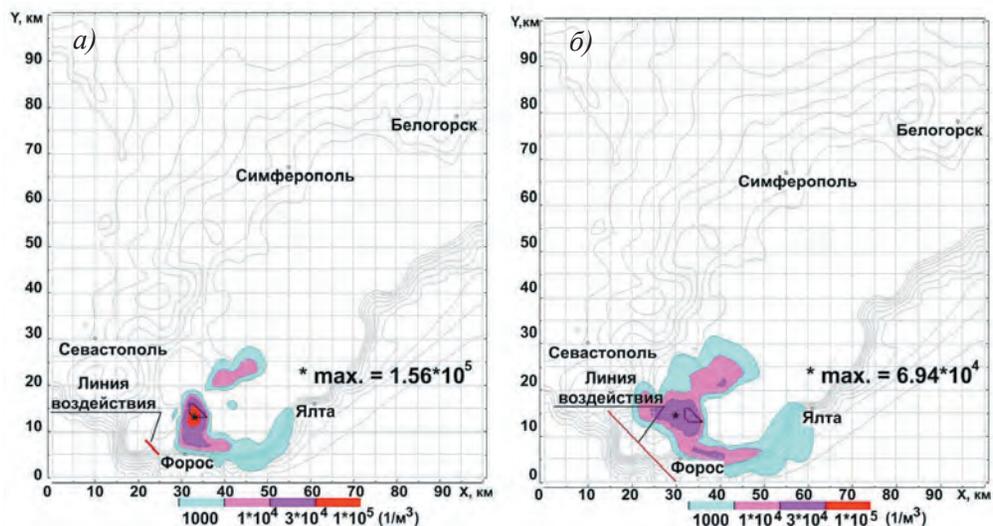


Рис. 2. Горизонтальное сечение полей концентрации частиц реагента на высоте 2 км через 1 ч после начала воздействия с борта БПЛА (а) и самолета (б).

Из рис. 2 видно, что полученные в результате расчетов максимальные значения концентрации частиц реагента в подоблачном слое при воздействии как с самолета, так и с борта БПЛА достигают значений, которые позволяют реализовать микрофизическую концепцию засева облаков (не менее  $10^4$  част./м<sup>3</sup>) и обеспечить искусственное увеличение количества осадков [3].

При этом следует отметить, что использование БПЛА для АВ на облака накладывает на них определенные требования:

- длительное нахождение БПЛА в условиях высокой влажности и низких температур при полете в облаках, а также в подоблачном слое;
- устойчивость БПЛА к условиям сильной турбулентности;
- наличие на борту БПЛА антиобледенительной системы;
- включение в штатную систему управления БПЛА канала для управления средствами воздействия;
- обеспечение требований безопасности при организации и выполнении полетов.

### Использование БПЛА для АВ на переохлажденные туманы

Для оценки возможности применения БПЛА в работах по АВ на переохлажденный туман и определения их эффективности были выполнены численные эксперименты по моделированию АВ с использованием нестационарной трехмерной численной модели FogSeeding. Эта модель позволяет производить численное моделирование АВ на туман с целью его рассеяния при отрицательной температуре воздуха с помощью стационарных и мобильных азотных генераторов. Данная численная модель подробно описана в работе [6].

Для иллюстрации результатов численного моделирования воздействия на переохлажденный туман рассмотрим реальную ситуацию. 10 февраля 2015 г. в Московской области в районе пересечения трассы М5 «Урал» с выездной дорогой из г. Жуковский наблюдались синоптические условия, при которых образовался туман с дальностью видимости менее 30 м, в результате чего произошло крупное ДТП.

В качестве исходной метеорологической информации использовались наземные данные о температуре и относительной влажности воздуха, направлении и скорости ветра, а также данные радиозондирования атмосферы, полученные на станциях Лыткарино и Электроугли.

С помощью модели FogSeeding проведены численные эксперименты по оценке результативности воздействия на переохлажденный туман с использованием БПЛА с помощью пиротехнических генераторов (AgI) и мобильных наземных аэрозольных генераторов (НАГ) жидкого азота ( $N_2$ ).

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики применяемых реагентов [5].

Таблица 2

Характеристики применяемых реагентов

Реагент	Выход льдообразующих ядер с 1 г
Пиротехнический состав АД-1 (8 % AgI)	$1 \cdot 10^{13}$
Жидкий азот ( $N_2$ )	$4 \cdot 10^{11}$

Воздействие с помощью мобильного НАГ (AgI) осуществлялось при движении по дороге, а воздействие с помощью НАГ жидкого азота ( $N_2$ ) — с борта БПЛА

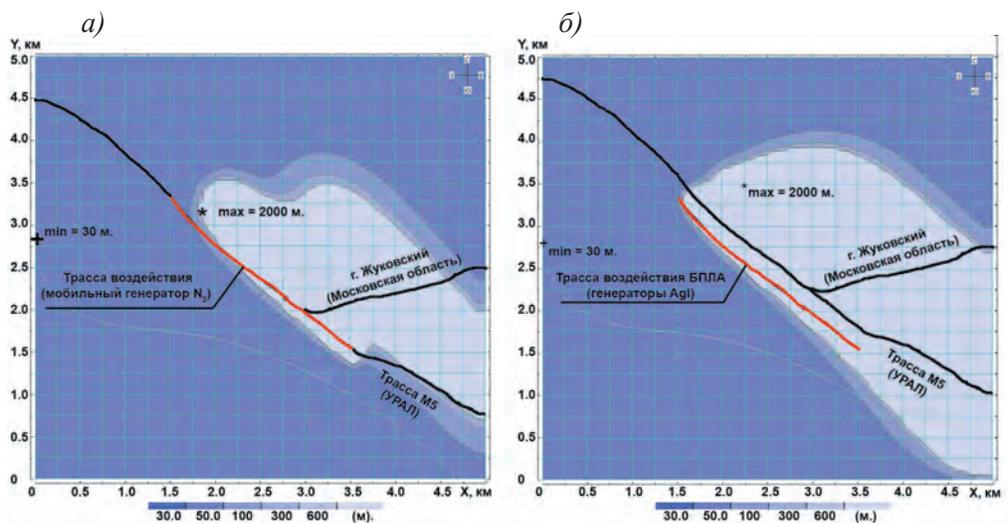


Рис. 3. Горизонтальные сечения дальности видимости через 30 минут после начала воздействия мобильным наземным аэрозольным генератором ( $N_2$ ) (а) и БПЛА с пиротехническими аэрозольными генераторами AgI (б).

на высоте 100 м по траектории, построенной с учетом скорости и направления ветра в приземном слое. Все воздействия производились в течение одного часа. По результатам выполненного численного моделирования оценено изменение дальности видимости в районе проведения работ за время проведения воздействия, а также в течение последующих 30 минут с интервалом 10 минут.

На рис. 3 приведены результаты расчета зон искусственного рассеяния тумана. Как видно из рисунков, воздействия с помощью пиротехнических аэрозольных генераторов (AgI) с борта БПЛА и мобильного НАГ ( $N_2$ ) позволили увеличить дальность видимости на уровне поверхности Земли с 30 до 2000 м. При этом площадь максимального увеличения дальности видимости при воздействиях с помощью БПЛА составила 6,9 км<sup>2</sup>, а при воздействиях с использованием мобильного НАГ — 4,3 км<sup>2</sup>. Столь значительная разница в результативности рассеяния переохлажденного тумана объясняется высотой проведения воздействия.

Следует отметить, что представленные на рис. 3 горизонтальные сечения дальности видимости подтверждают важность учета скорости и направления ветра при построении траекторий для проведения воздействий. Так, в результате воздействия с борта БПЛА по траектории, учитывающей скорость и направление ветра, удалось увеличить горизонтальную дальность видимости не только вдоль автомобильной дороги, но и на удалении до 250 м от нее.

Таким образом, результаты численного моделирования воздействия на переохлажденный туман подтверждают перспективу использования БПЛА в работах АВ на переохлажденные туманы.

## Использование БПЛА для обеспечения работ по АВ

Многолетний опыт проведения работ с применением НАГ показал, что одним из ключевых факторов, определяющих распространение аэрозольного облака льдообразующих частиц, образующегося в результате их работы, является вертикальный профиль скорости и направления ветра в пограничном слое атмосферы.

Оперативно получаемая информация о профиле ветра в пограничном слое атмосферы необходима как для определения мест установки генераторов и режима их работы на этапе планирования АВ, так и для контроля результатов работ.

В настоящее время основным источником данных о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы являются данные радиозондирования атмосферы. В то же время редкий выпуск радиозондов (один-два раза в сутки) и ограниченное число пунктов радиозондирования практически не позволяют использовать эти данные в качестве оперативного источника информации о вертикальном профиле ветра.

Среди других методов оперативного получения профиля ветра в пограничном слое достаточно широко используются дистанционные методы зондирования атмосферы [4].

В результате анализа существующих методов и средств ветрового зондирования атмосферы в Агентстве атмосферных технологий была создана мобильная система получения данных о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы с использованием дропзонда (рис. 4), сбрасываемого с борта БПЛА.

Основные технические характеристики системы приведены в табл. 3.

Проверка работы системы ветрового зондирования была выполнена в 2016 г. с использованием гексокоптера DJI S900 (рис. 5 а) в ряде натуральных экспериментов, а в октябре 2018 г. был проведен эксперимент по сбросу дропзонда с разработанного БПЛА самолетного типа Skywalker 1680 (рис. 5 б).

Летно-технические характеристики разработанных БПЛА приведены в табл. 4.

В качестве примера на рис. 6 представлено сравнение данных о направлении и скорости ветра, полученных в ходе эксперимента при сбросе дропзонда в дер.

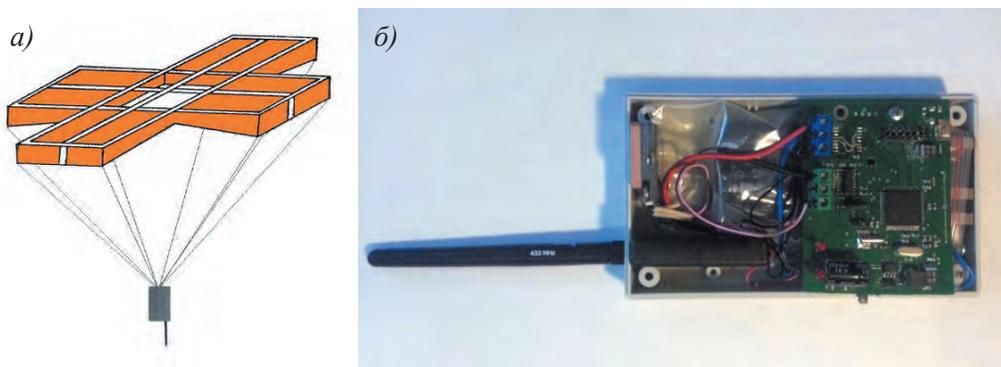


Рис. 4. Общий вид дропзонда.

Таблица 3

## Основные технические характеристики системы ветрового зондирования

№ п/п	Наименование характеристики	Значение параметра
<i>Дронзонд</i>		
1	Используемая навигационная система	GPS/ГЛОНАСС
2	Период обновления навигационных данных	1 с
3	Способ передачи данных	По радиоканалу
4	Вид передачи данных	Цифровые пакеты данных переменной длины с проверкой достоверности CRC16
5	Передаваемые данные	Широта, долгота, высота, всемирное время, скорость, курс, число видимых спутников
6	Рабочее положение радиозонда	Свободное падение на парашюте
7	Скорость падения радиозонда	2—3 м/с
8	Максимальная высота сброса радиозонда	5 км
9	Максимальное расстояние передачи данных	15 км
10	Время непрерывной работы радиозонда	3 ч
11	Габаритные размеры радиозонда	120×80×35 мм
12	Масса снаряженного радиозонда	350 г
13	Состав наземной станции	Антенна, радиоприемник, ноутбук
<i>Наземная станция</i>		
1	Диапазон радиочастот	433 МГц, LPD, выделенный для пользования гражданских лиц на всей территории РФ
2	Метод передачи данных	LoRa, широкополосная помехоустойчивая передача данных по радиоканалу малыми мощностями
3	Периодичность обновления и передачи данных	5 с
4	Радиус действия в составе системы	5000 м
5	Высота действия в составе системы	2000 м
6	Условия эксплуатации наземной станции	
	– максимальная высота	3000 м
	– температура окружающего воздуха	от 5 до 40 °С
	– относительная влажность	до 98 %
7	Габаритные размеры: Д×Ш×В	690×336×50 мм
8	Масса	0,925 кг

Таблица 4

## Летно-технические характеристики БПЛА

Параметр	Значение параметра	
	Гексакоптер DJI S900	БПЛА самолетного типа Skywalker 1680
Высота полета	до 2000—2500 м	до 3000 м
Горизонтальная скорость	до 40 км/ч	до 60 км/ч
Вес	3700 г	4200 г
Взлетный вес	8200 г	5200 г
Вес полезной нагрузки	4500 г	до 1000 г
Продолжительность полета	20—30 мин	30—40 г
Габаритные размеры: Д×Ш×В	460×450×36 мм	1720×1180×300 мм



Рис. 5. Общий вид БПЛА на базе гексакоптера DJI S900 (а) и самолетного типа (б).

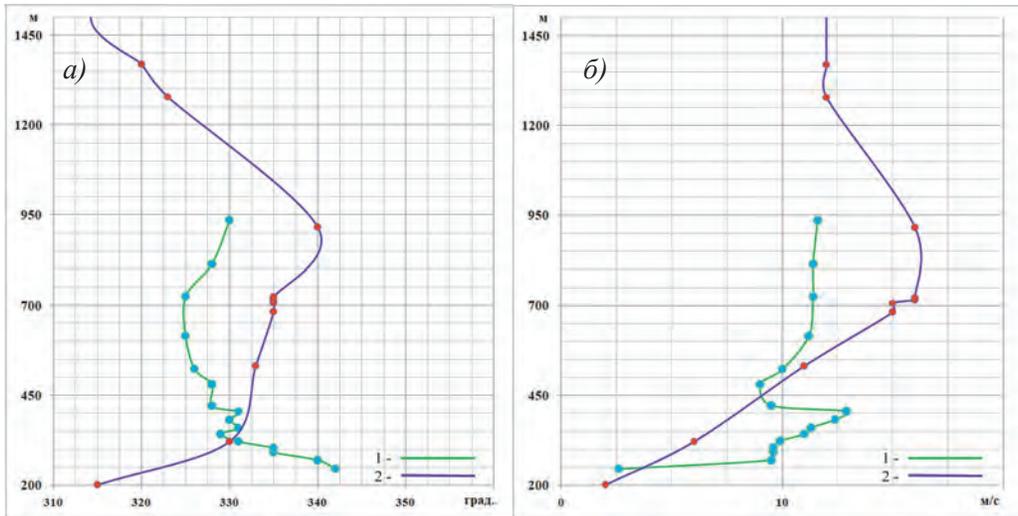


Рис. 6. Вертикальный профиль направления (а) и скорости (б) ветра за 12 ч UTC 13 декабря 2016 г.

1 — данные дрозонда, 2 — результаты радиозондирования.

Федурново (Владимирской области), с данными радиозондирования атмосферы для ст. Долгопрудный (ID 27612) за 12 ч UTC 13 декабря 2016 г.

Анализ рис. 6 показал, что данные о вертикальном профиле ветра, полученные в ходе экспериментальных исследований с помощью многоразового дрозонда, имеют достаточно хорошую сходимость с данными радиозондирования, что позволяет рассматривать возможность использования разработанной системы ветрового зондирования с применением дрозонда, сбрасываемого с беспилотного летательного аппарата для обеспечения оперативных работ по АВ на облака.

## Заключение

1. Полученные результаты численного моделирования активных воздействий на облака, проводимых с помощью генераторов AgI с борта БПЛА, позволили сформулировать требования к БПЛА с целью обеспечения возможности использования их в работах по АВ. Выполненная оценка эффективности АВ с борта БПЛА позволяет рассматривать их в качестве дополнительного средства доставки реагента в облако.

2. Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о том, что воздействия на переохлажденный туман с использованием пиротехнических генераторов AgI с борта БПЛА позволяют осуществить искусственное рассеяние тумана с высокой степенью результативности.

3. Показана возможность использования дрозонда, сбрасываемого с борта БПЛА, для получения данных о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы в оперативном режиме и обеспечения оперативных работ по АВ на облака.

## Список используемых источников

1. *Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Щужин Г.Г.* Оценка эффективности искусственного увеличения осадков с использованием легких летательных аппаратов // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 47. С. 68—78.
2. *Колосков Б.П.* и др. Численное моделирование переноса реагента при работах по активным воздействиям на облака // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. С. 44—54.
3. *Корнеев В.П.* и др. Искусственное регулирование атмосферных осадков и рассеяние туманов. М.: Грин Принт, 2019. 300 с.
4. *Страшко А.В.* и др. Применение беспилотных летательных аппаратов для определения термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы / В сб.: Труды II Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муромский институт (филиал) ФГБУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2018. С. 493—498.
5. *Сосникова Е.В.* и др. Исследование эффективности наноразмерных кристаллизующих реагентов AgI/SiO<sub>2</sub> / В сб.: Вопросы физики и облаков. Памяти Н.О. Плауде. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД, 2015. С. 323—330.
6. *Частухин А.В.* и др. Моделирования рассеяния переохлажденного тумана с использованием трехмерной численной модели FogSeeding // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 49. С. 47—57.
7. *Charry H.A., Lininder R.L.* The AWS handbook of ground-based cold fog dissipation using vented liquid propane // Report AWS-TR-75-255. 1975. V. 1. AIR Weather Service, United States AIR Force, Illinois. 55 p.

## ДИАГНОСТИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН

*К.А. Диденко<sup>1, 2</sup>, Т.С. Ермакова<sup>2</sup>, А.В. Коваль<sup>1</sup>,  
А.И. Погорельцев<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
didenko.xeniya@yandex.ru

Представлен метод анализа нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн на основе уравнения баланса потенциальной энтропии. С использованием данных реанализа ERA5, показано, что во время развития внезапного стратосферного потепления (ВСП) происходит усиление нелинейных взаимодействий волна — волна. Наибольший вклад в изменчивость возмущения потенциальной энтропии вносят слагаемые, отвечающие за взаимодействие волны со средним потоком, причем адвективный перенос наиболее значим перед развитием события ВСП.

*Ключевые слова:* стационарные планетарные волны, потенциальный вихрь Эртеля, энтропия.

## DIAGNOSTICS OF NONLINEAR INTERACTION OF STATIONARY PLANETARY WAVES

*K.A. Didenko<sup>1, 2</sup>, T.S. Ermakova<sup>2</sup>, A.V. Koval<sup>1</sup>, A.I. Pogoreltsev<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup> St. Petersburg State University

<sup>2</sup> Russian State Hydrometeorological University

The article considers a method to analyze nonlinear interactions of stationary planetary waves. The method is based on the potential enstrophy balance equation. The ERA5 reanalysis results have proved that nonlinear wave-wave interactions are amplified during the development of sudden stratospheric warming (SSW). Factors responsible for interaction between waves and mean flow make a significant contribution to the variability of the eddy potential enstrophy, the advective transport being most noticeable before the SSW event.

*Keywords:* stationary planetary waves, Ertel's potential vorticity, enstrophy.

### Введение

Одним из основных объектов исследования динамических процессов в стратосфере являются волны планетарного масштаба. В настоящей работе рассматриваются вынужденные волны, такие как стационарные планетарные волны (СПВ). С одной стороны, взаимодействуя со средним потоком, СПВ приводят к торможению (иногда даже обращению) стратосферного струйного течения зимой, а с другой стороны, условия их распространения зависят от среднего потока. В результате возникают так называемые стратосферные васцилляции, т. е. нерегулярные колебания амплитуды СПВ и интенсивности среднего потока [6]. Такие эффекты обусловлены главным образом нелинейным взаимодействием по типу волна — волна и волна — средний поток в стратосфере. Кроме этих нерегулярных колебаний

среднего потока и амплитуды СПВ, наблюдаются также долгопериодные осцилляции в тропиках (Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК), осцилляция Маддена — Джулиана (ОМД) и т.д.), которые оказывают существенное влияние на динамику внетропической стратосферы [1—3]. Для диагностики и интерпретации процессов, ответственных за такое воздействие, необходимо также привлекать анализ нелинейного взаимодействия ЭНЮК и ОМД со средним потоком на высотах тропосферы, которое приводит к изменению последнего и вследствие этого к изменению условий распространения СПВ из тропосферы в стратосферу. В настоящей работе рассмотрен способ такого анализа, основанный на исследовании изменчивости возмущения потенциальной энтропии (квадрат потенциального вихря Эртеля), обусловленной нелинейными взаимодействиями по типу волна — средний поток и волна — волна [8]. Целью настоящей работы является исследование вклада различных слагаемых в баланс возмущения потенциальной энтропии для стационарных планетарных волн с зональным волновым числом  $m = 1$  (СПВ1) и  $m = 2$  (СПВ2).

### Уравнение баланса вихревой потенциальной энтропии

Для того чтобы получить уравнение баланса вихревой потенциальной энтропии, рассмотрим уравнение для возмущения потенциального вихря Эртеля в  $\log$ -изобарической системе координат [5]:

$$\frac{\partial P'}{\partial t} = -\bar{V}' \cdot \bar{\nabla} P' - \bar{V}' \cdot \bar{\nabla} \bar{P} - \bar{\bar{V}} \cdot \bar{\nabla} P' + R', \quad (1)$$

где  $P$  — потенциальный вихрь Эртеля, равный скалярному произведению абсолютной завихренности на градиент потенциальной температуры, деленному на фоновую плотность;  $\bar{V}$  — вектор скорости ветра;  $R$  — вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых, которые не могут быть оценены из наблюдений;  $a$  — радиус Земли;  $\lambda$ ,  $\varphi$ ,  $z$  — долгота, широта и высота. Черта сверху означает зональное осреднение, а штрихи — возмущения, т. е. отклонения от зонально осредненных значений.

Для того чтобы получить уравнения баланса возмущения потенциальной энтропии для СПВ с разными волновыми числами, необходимо понять, как они могут взаимодействовать друг с другом. Когда сигнал, состоящий из двух косинусоидальных волн с зональными волновыми числами и частотами  $(m_1, \omega_1)$  и  $(m_2, \omega_2)$ , проходит через некоторую нелинейную квадратичную систему, то сигналом на выходе этой системы будет являться вторичная волна  $(2m_1, 2\omega_1)$ ,  $(2m_2, 2\omega_2)$ ,  $(m_1 - m_2, \omega_1 - \omega_2)$  или  $(m_1 + m_2, \omega_1 + \omega_2)$  [9]. Обычно рассматривают только разностную и суммарную вторичные волны, предполагая, что нелинейное самовзаимодействие незначительно (первые две вторичные волны).

Такой подход справедлив в случае квазипоперечных волн (гравитационные волны или приливы). В таких типах адвективные слагаемые становятся значимыми только при очень больших амплитудах [4]. Стационарные планетарные волны не являются квазипоперечными, поэтому для правильного описания генерации

вторичных волн необходимо учитывать волновое самовзаимодействие. Таким образом, вторичные СПВ с зональным волновым числом 2 будут генерироваться в результате нелинейных взаимодействий СПВ1 — СПВ3 и в случае самовзаимодействия СПВ1, а вторичные СПВ1 — при взаимодействии СПВ1 — СПВ2 и СПВ2 — СПВ3. В результате уравнения для СПВ1 и СПВ2, аналогичные уравнению (1), запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial P'_1}{\partial t} = -\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_2 - \bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} P'_1 - \bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} P'_3 - \bar{V}'_3 \cdot \bar{\nabla} P'_2 - \bar{V}' \cdot \bar{\nabla} P' - \bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} \bar{P}_1 + R'_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P'_2}{\partial t} = -\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_1 - \bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_3 - \bar{V}'_3 \cdot \bar{\nabla} P'_1 - \bar{V}' \cdot \bar{\nabla} P' - \bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} \bar{P}_2 + R'_2, \quad (3)$$

где подстрочные индексы означают зональное волновое число.

Чтобы получить выражение для баланса возмущения потенциальной энтропии, являющейся квадратом потенциального вихря Эртеля, умножим уравнения (2) и (3) на  $P'$  и усредним по долготе:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}'^2}{\partial t} = & -\overline{P'_1(\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_2)} - \overline{P'_1(\bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} P'_1)} - \overline{P'_1(\bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} P'_3)} - \overline{P'_1(\bar{V}'_3 \cdot \bar{\nabla} P'_2)} - \\ & - \overline{P'_1(\bar{V}' \cdot \bar{\nabla} P'_1)} - \overline{P'_1(\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} \bar{P})} + \overline{P'_1 R'_1}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}'^2}{\partial t} = -\overline{P'_2(\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_1)} - \overline{P'_2(\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_3)} - \overline{P'_2(\bar{V}'_3 \cdot \bar{\nabla} P'_1)} - \overline{P'_2(\bar{V}' \cdot \bar{\nabla} P'_2)} - \overline{P'_2(\bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} \bar{P})} + \overline{P'_2 R'_2}. \quad (5)$$

### Преобразованное уравнение возмущения потенциальной энтропии

Преобразуем выражения (4) и (5). Добавим к правой части уравнений для СПВ1 и СПВ2 соответственно

$$\pm \bar{P} \left( \overline{\bar{V}'_1 \cdot \bar{\nabla} P'_1} \right), \quad (6)$$

$$\pm \bar{P} \left( \overline{\bar{V}'_2 \cdot \bar{\nabla} P'_2} \right). \quad (7)$$

Объединим предпоследнее слагаемое уравнений (4) и (5) с выражениями (6) и (7) со знаком минус. Тогда с учетом того, что

$$\frac{P' \bar{P} \operatorname{div}(\rho_0 \bar{V}')}{\rho_0} = 0, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  — фоновая плотность, являющаяся функцией только от высоты, уравнения баланса возмущения потенциальной энтропии для СПВ1 и СПВ2 принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_1'^2}}{\partial t} = & -\overline{P_1'(\overline{V_1'} \cdot \nabla \overline{P_2'})} - \overline{P_1'(\overline{V_2'} \cdot \nabla \overline{P_1'})} - \overline{P_1'(\overline{V_2'} \cdot \nabla \overline{P_3'})} - \overline{P_1'(\overline{V_3'} \cdot \nabla \overline{P_2'})} - \\ & - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div}(\rho_0 \overline{P_1' \overline{V_1'}}) - \overline{P_1'(\overline{V} \cdot \nabla \overline{P_1'})} + \overline{P(\overline{V_1'} \cdot \nabla \overline{P_1'})} + \overline{P_1' R_1'}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_2'^2}}{\partial t} = & -\overline{P_2'(\overline{V_1'} \cdot \nabla \overline{P_1'})} - \overline{P_2'(\overline{V_1'} \cdot \nabla \overline{P_3'})} - \overline{P_2'(\overline{V_3'} \cdot \nabla \overline{P_1'})} - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div}(\rho_0 \overline{P_2' \overline{V_2'}}) - \\ & - \overline{P_2'(\overline{V} \cdot \nabla \overline{P_2'})} + \overline{P(\overline{V_2'} \cdot \nabla \overline{P_2'})} + \overline{P_2' R_2'}. \end{aligned} \quad (10)$$

Левые части уравнений (9) и (10) можно принять в качестве меры изменчивости волновой активности [10]. Первые четыре слагаемых уравнения (9) и первые три слагаемых уравнения (10) в правой части описывают взаимодействие по типу волна — волна; далее стоят дивергенция потока, адвективное слагаемое, взаимодействие волны со средним потоком и диссипация, которая не может быть оценена из наблюдений.

Аналогично можно получить уравнение баланса для среднего зонального значения потенциальной энтропии:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P^2}}{\partial t} = -\frac{\overline{P}}{\rho_0} \operatorname{div}(\rho_0 \overline{P \overline{V}}) - \overline{P(\overline{V_1'} \cdot \nabla \overline{P_1'})} - \overline{P(\overline{V_2'} \cdot \nabla \overline{P_2'})} + \overline{P R}. \quad (11)$$

### Наблюдение ВСП в январе 2013 г.

В начале января 2013 г. наблюдалось сильное (major) событие ВСП. Во время этого явления волновая активность обычно усиливается. На рис. 1—5

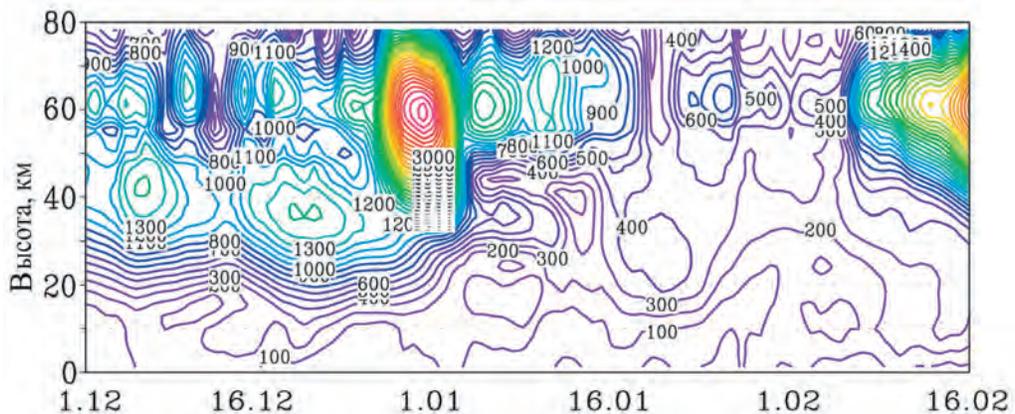


Рис. 1. Высотно-временное распределение амплитуды зональной гармонике с  $m = 1$  в геопотенциальной высоте (м) на  $62,5^\circ$  с.ш. за декабрь 2012 г. и январь — февраль 2013 г. Данные UK Met Office.

представлены данные *UK Met Office* за рассматриваемый временной интервал. Поскольку эти данные доступны до уровня 0,01 гПа, их предпочтительнее (по сравнению с данными других современных реанализов) использовать для демонстрации поведения основных атмосферных характеристик до высот мезосферы.

Значительное увеличение амплитуды СПВ1 наблюдалось в начале января 2013 г. (рис. 1). На всех рисунках по оси ординат указана  $\log$ -изобарическая высота  $z = -H \cdot \ln(p/p_s)$ , где  $H = 7$  км,  $p$  — давление,  $p_s = 1000$  гПа. В это же время происходило сильное изменение среднего зонального потока в стратосфере, вплоть до обращения направления (рис. 2). Практически одновременно наблюдалось сильное внезапное стратосферное потепление (рис. 3). Отметим, что во время события ВСП наблюдается резкое уменьшение амплитуды СПВ1 и увеличение амплитуды СПВ2 (рис. 4) и СПВ3 (рис. 5).

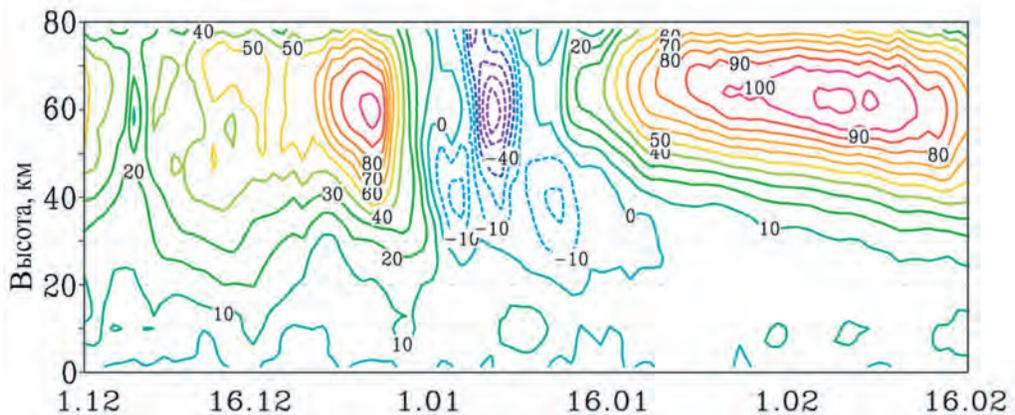


Рис. 2. Высотно-временное распределение среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с.ш. за декабрь 2012 г. и январь — февраль 2013 г. Данные *UK Met Office*.

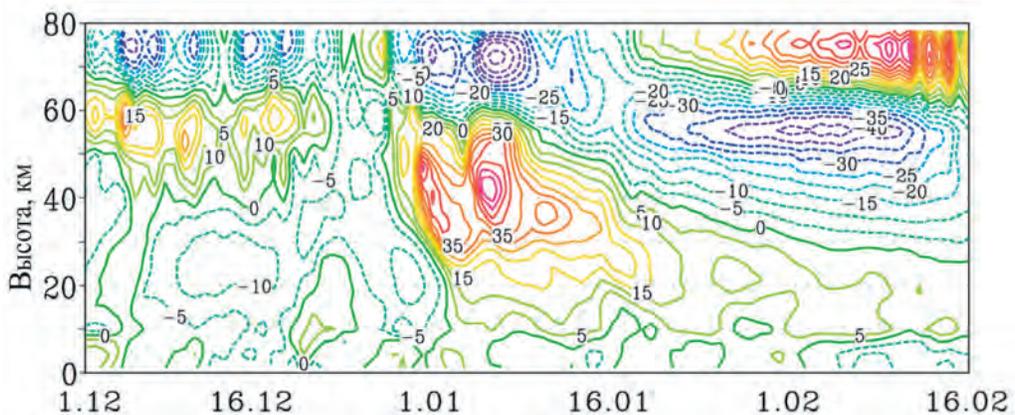


Рис. 3. Высотно-временное распределение изменения средней зональной температуры (К) на 62,5° с.ш. за декабрь 2012 г. и январь — февраль 2013 г. Данные *UK Met Office*.

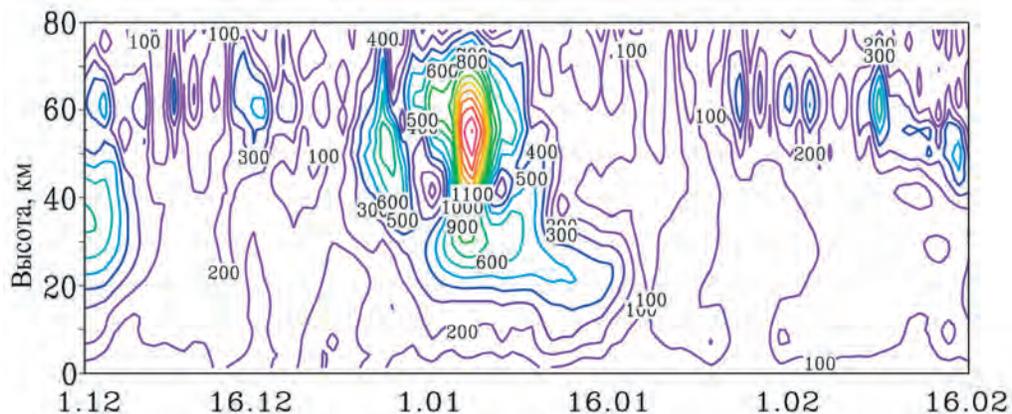


Рис. 4. Высотно-временное распределение амплитуды зональной гармоники с  $m = 2$  в геопотенциальной высоте (м) на  $62,5^\circ$  с.ш. за декабрь 2012 г. и январь — февраль 2013 г. Данные *UK Met Office*.

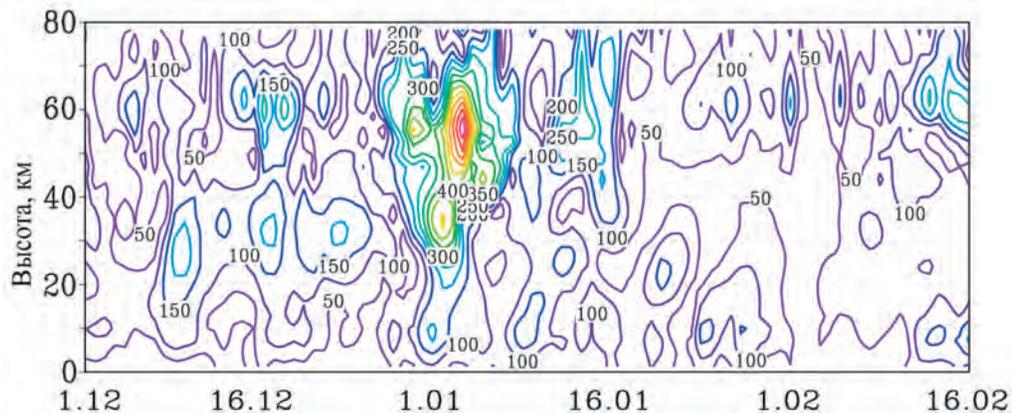


Рис. 5. Высотно-временное распределение амплитуды зональной гармоники с  $m = 3$  в геопотенциальной высоте (м) на  $62,5^\circ$  с.ш. за декабрь 2012 г. и январь — февраль 2013 г. Данные *UK Met Office*.

### Нелинейные взаимодействия волна — волна и волна — средний поток

Для того чтобы рассмотреть вклад различных слагаемых в уравнениях баланса возмущения потенциальной энтропии во время развития ВСП в январе 2013 г., было решено использовать данные реанализа *ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. Данные охватывают период с 1979 г. по настоящее время и доступны только до высоты примерно 47 км. Архив *ERA5* предоставляет часовые данные (в отличие от *UK Met Office*, данные которого поставляются

только раз в сутки). Это и послужило причиной решения использовать данные ERA5, так как в дальнейшем предполагается рассмотреть также нелинейное взаимодействие атмосферных приливов с планетарными волнами и средним потоком.

На основе данных реанализа ERA5 был рассчитан вклад разных слагаемых уравнений (9) — (11). Расчеты проводились для высоты 40 км и усреднены в полосе 52,5—62,5° с.ш. с весом косинус широты. На рис. 6 показаны слагаемые для среднего зонального значения потенциального вихря Эртеля в уравнении потенциальной энтропии. На рис. 6 и всех последующих рисунках значения по оси ординат приведены в единицах  $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сут}$ , где  $1\text{PVU}$  (Potential Vorticity Unit) =  $10^{-6}\text{ К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$  [7].

Анализ результатов показывает, что слагаемые, отвечающие за взаимодействие волны со средним потоком, вносят вклад не только во время события ВСП, но и за несколько дней до его наступления. Во время развития потепления усиливается взаимодействие по типу волна — волна в стратосфере (рис. 7). Кроме того, можно отметить, что до события ВСП существенный вклад вносят адвективные слагаемые (кривая 2 на рис. 6), характеризующие вынос потенциальной энтропии из рассматриваемой широтной полосы. Наблюдается этот эффект не только при анализе среднего зонального уравнения, но и для значений возмущения потенциальной энтропии, что будет показано ниже.

Стоит отметить, что стационарная планетарная волна с волновым числом 1 определяет генерацию волн во время ВСП. В то же время наименьший вклад в баланс возмущения потенциальной энтропии вносит слагаемое, отвечающее за генерацию СПВ2 в результате самовзадействия СПВ1.

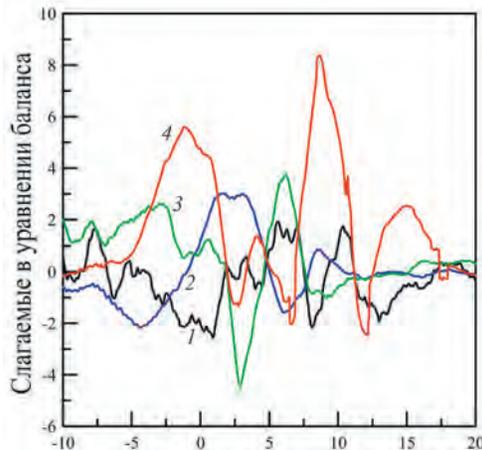


Рис. 6. Слагаемые в уравнении баланса средней зональной потенциальной энтропии на высоте 40 км за период 20 декабря 2012 г. — 20 января 2013 г.

1 — изменение во времени, 2 — адвективные слагаемые, 3 — обменные слагаемые для СПВ1, 4 — для СПВ2.

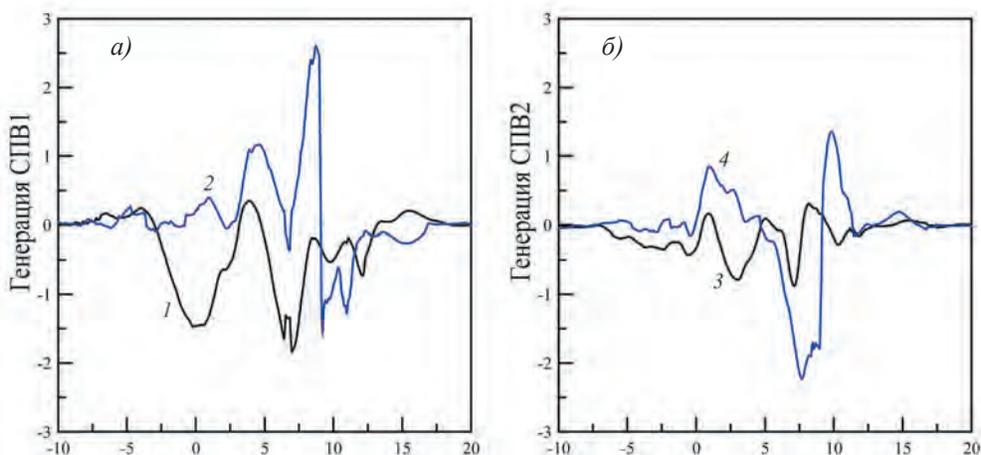


Рис. 7. Слагаемые, отвечающие за взаимодействие по типу волна — волна в балансе возмущения потенциальной энтропии на высоте 40 км за период 20 декабря 2012 г. — 20 января 2013 г.

- а)* генерация СПВ1: взаимодействие СПВ1 — СПВ2 (1) и СПВ2 — СПВ3 (2);  
*б)* генерация СПВ2: самовзаимодействие СПВ1 (3) и СПВ1 — СПВ3 (4).

На основе результатов расчета слагаемых уравнений (9) и (10) можно оценить выполнение баланса возмущения потенциальной энтропии. На рис. 8 показано изменение волновой активности во времени. Событие ВСП сопровождается уменьшением активности СПВ1 и увеличением с последующим уменьшением активности СПВ2.

Для того чтобы определить, какими слагаемыми обусловлены изменения волновой активности во времени, на рис. 9—11 представлены результаты расчета для СПВ1 и СПВ2. На рис. 9 приведены слагаемые, отвечающие за взаимодействие по типу волна — средний поток, дивергенция потока потенциальной энтропии и разность этих величин. Из рисунка видно, что эти слагаемые вносят вклад в баланс во время события ВСП, а в случае СПВ2 и за несколько дней до его наступления. Разница между дивергенцией потока потенциальной энтропии и обменными слагаемыми, отвечающими за взаимодействие СПВ со средним потоком, балансируется адвективными (черная кривая 1 на рис. 10) и/или диссипативными слагаемыми. Стоит отметить, что, как и в случае анализа среднего зонального значения потенциальной энтропии, адвективные слагаемые вносят вклад в баланс до момента наступления ВСП.

На рис. 11 представлен вклад основных слагаемых в баланс вихревой потенциальной энтропии. Результаты для СПВ1 демонстрируют уменьшение волновой активности, сопровождающееся увеличением взаимодействия по типу волна — волна во время внезапного стратосферного потепления. Обратная ситуация наблюдается для СПВ2.

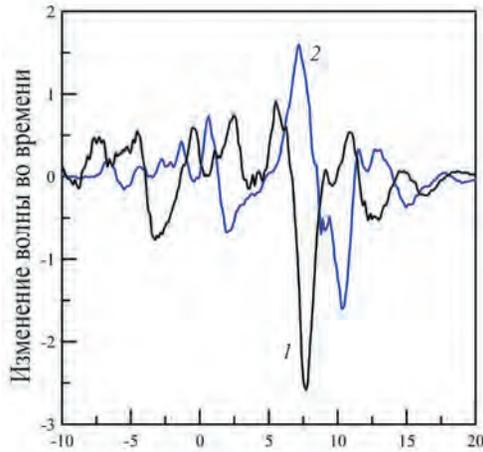


Рис. 8. Слагаемые, отвечающие за эволюцию волны в балансе возмущения потенциальной энтропии на высоте 40 км за период 20 декабря 2012 г. — 20 января 2013 г.

1 — СПВ1, 2 — СПВ2.

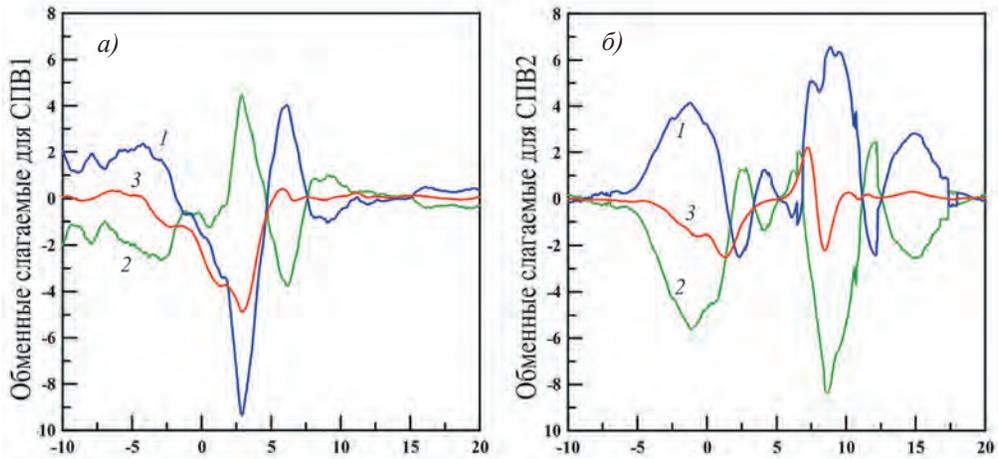


Рис. 9. Слагаемые, отвечающие за взаимодействие волна — средний поток в уравнении баланса возмущения потенциальной энтропии на высоте 40 км за период 20 декабря 2012 г. — 20 января 2013 г. для СПВ1 (а) и СПВ2 (б).

1 — дивергенция,

2 — обменные со средним потоком слагаемые,

3 — разность дивергенции и обменных со средним потоком слагаемых.

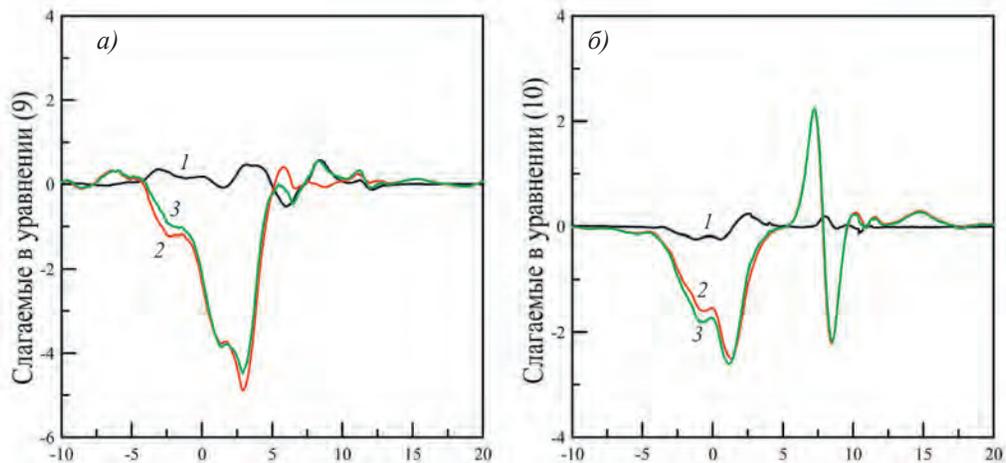


Рис. 10. Слагаемые в балансе возмущения потенциальной энтропии на высоте 40 км за период 20 декабря 2012 г. — 20 января 2013 г. для СПВ1 (а), СПВ2 (б).  
 1 — адвективные слагаемые, 2 — разность дивергенции и обменных слагаемых, 3 — сумма дивергенции и обменных слагаемых.

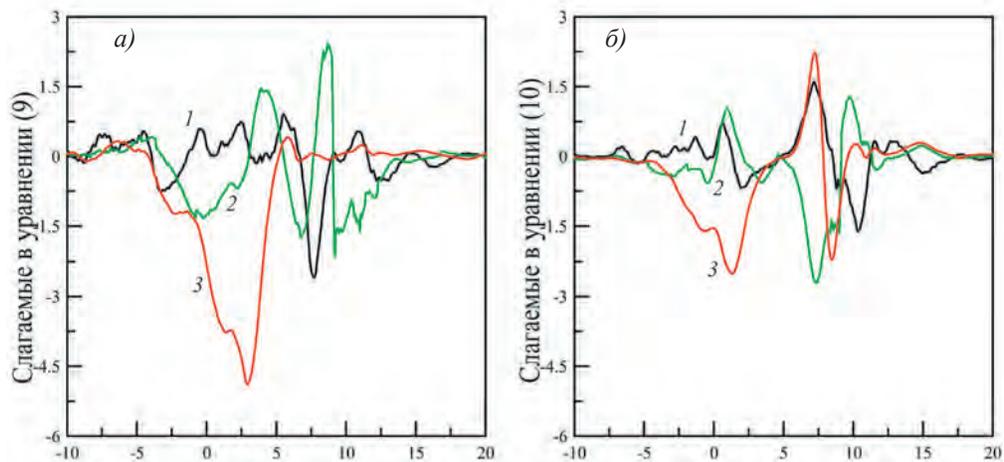


Рис. 11. Слагаемые в балансе возмущения потенциальной энтропии на высоте 40 км за период 20 декабря 2012 г. — 20 января 2013 г. для СПВ1 (а), СПВ2 (б).  
 1 — изменение потока потенциальной энтропии во времени;  
 2 — слагаемые, отвечающие за генерацию волн;  
 3 — разность дивергенции и обменных слагаемых.

## Заключение

В настоящей работе представлен метод исследования нелинейных взаимодействий на основе уравнения возмущения потенциальной энтропии. Результаты расчета показали вклад различных слагаемых в уравнения баланса возмущения и средней потенциальной энтропии. Отмечается, что событие ВСП характеризуется усилением нелинейных взаимодействия по типу волна — средний поток и по типу волна — волна. Увеличение адвективных слагаемых перед событием ВСП, позволяет сформулировать задачу для поиска возможных предвестников таких событий. Уравнения баланса (9) и (10) можно использовать при диагностике волновых процессов различных типов и периодов, например при нелинейном взаимодействии атмосферных приливов друг с другом или со стационарными планетарными волнами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 19-17-00198. Авторы благодарят рецензента профессора Г.М. Шведа за внимание к статье и полезные замечания, которые позволили существенно улучшить изложение материала.*

## Список литературы

1. Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И. Влияние осцилляции Маддена — Джулиана на интенсивность и структуру полярного вихря // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 18—27.
2. Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И., Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И. Влияние осцилляции Маддена — Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 1. С. 114—124.
3. Ermakova T.S., Aniskina O.G., Statnaya I.A., Motsakov M.A., Pogoreltsev A.I. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // Earth, Planets and Space. 2019. V. 71:8.
4. Pogoreltsev A.I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // Phys. Chem. Earth (Part C). 2001. V. 26, No. 6. P. 395—403.
5. Andrews D.G. On the interpretation of the Eliassen-Palm flux divergence // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1987. V. 113. P. 323—338.
6. Holton J. R., Mass C. Stratospheric vacillation cycles // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. P. 2218—2225.
7. McIntyre M.E. Dynamical meteorology: potential vorticity // Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Second Ed. 2014. V. 2. P. 375—383.
8. Smith A. K. Observation of wave-wave interactions in the stratosphere // J. Atmos. Sci. 1983. P. 2484—2493.
9. Spizzichino A. Etude des interactions entre les differentes composantes du vent dans la haute atmosphere // Ann. Geophys. (3e. Partie) 1969. V. 25, No. 4. P. 773—783.
10. White I.P., Hua L., Mitchell N.J., Phillips T. Dynamical response to the QBO in the Northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity // J. Atmos. Sci. 2015. P. 4487—4507.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ АТМОСФЕРЫ К ОПЕРАТИВНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ГРОЗЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

*Н.Ш. Гусейнов<sup>1</sup>, А.А. Агаева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Национальная академия авиации Азербайджанской Республики, dr.Nazim@azans.az

<sup>2</sup> StormGeo LT

В статье определена эффективность применения индексов неустойчивости атмосферы для прогнозирования грозы в районе международного аэропорта Гейдар Алиев на основе модельных данных за 2005—2018 гг. Выполнена оценка эффективности применения программы расчета индексов неустойчивости атмосферы, разработанной на языках программирования DELPHI и C# (C sharp), и оправдываемости прогнозов гроз в международном аэропорту Гейдар Алиев. Также рассматриваются практические аспекты применения этих индексов для прогноза гроз.

*Ключевые слова:* энергия неустойчивости атмосферы, кучево-дождевые облака, язык программирования.

## APPLICATION OF ATMOSPHERIC INSTABILITY INDEXES FOR OPERATIONAL THUNDER FORECASTING BASED ON THE MODEL DATA

*N.Sh. Huseynov<sup>1</sup>, A.A. Agayeva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> National Aviation Academy of Azerbaijan Republic

<sup>2</sup> StormGeo LT

The effectiveness of application of atmospheric instability indices for forecasting thunders on the territory of Heydar Aliyev International Airport has been determined based on the computer simulation data for 2005 and 2018. The effectiveness of automatic calculation of the atmospheric instability indexes has been evaluated. In Heydar Aliyev International Airport diagnostic parameters of thunderstorm were verified by means of software that uses the programming languages DELPHI and C#.

*Keywords:* atmospheric instability energy, cumulonimbus clouds, programming language.

### Введение

На территории Азербайджанской Республики в теплое время года часто наблюдаются кучево-дождевые облака и связанные с ними опасные атмосферные явления, такие как ливневые осадки, грозы, град и др. При этом из-за неоднородности рельефа среднее число грозовых дней в году изменяется в широких пределах: от пяти до 43. Реже грозовые дни фиксируются станциями, расположенными на море и вдоль побережья. Их число возрастает с удалением от Каспийского моря и с увеличением высоты местности.

На станциях, расположенных в море и у побережья (Нефть Дашлары, Пираллахы, Баку, Сумгаит), число грозовых дней составляет пять — семь. Уменьшению грозовой активности здесь способствует равнинный рельеф местности. В Баку и

на Апшеронском полуострове воздушные потоки, связанные с бризом, не встречают препятствий и поэтому не подвержены вынужденным поднятиям. По этой причине на этих территориях редко наблюдаются внутримассовые грозы. Однако фронтальные грозы на указанной местности наблюдаются, и, поскольку в Баку расположен самый большой в Республике аэропорт, точное прогнозирование здесь гроз и других опасных конвективных явлений весьма актуально [2, 3, 6].

Цель работы — определить эффективность применения индексов неустойчивости атмосферы для прогнозирования грозы в районе международного аэропорта Гейдар Алиев на основе модельных данных за 2005—2018 гг.

### Материалы и методы исследования

Для оценки условий неустойчивости атмосферы для прогнозирования гроз необходим расчет индексов неустойчивости: Lifted, Showalter, Total Totals, S, Thompson, Vayting и SWEAT (Severe Weather Threat Index). Расчет индексов обычно производится на основе данных аэрологических наблюдений. В настоящей работе в качестве исходной информации использованы метеорологические данные для различных высот с веб-сервера Air Resources Laboratory, которая функционирует при поддержке Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), и регулярные данные о погоде международного аэропорта Гейдар Алиев. Однако в последнее время в качестве исходных данных могут быть использованы и модельные данные.

Национальные центры прогнозирования окружающей среды Национальной метеорологической службы США (NCEP) проводят серию компьютерных анализов и оперативных прогнозов. Одной из операционных систем является GDAS (Глобальная система ассимиляции данных). Информацию об этой системе можно найти на веб-сайте <https://www.emc.ncep.noaa.gov>. Каждые три часа архивные данные поступают из GDAS — NCEP. К ним относятся следующие характеристики на различных высотах: геопотенциальная высота, давление, температура воздуха, температура точки росы, направление и скорость ветра. На веб-сервере Air Resources Laboratory (<https://www.ready.noaa.gov>) восемь раз за сутки обновляется информация. Из-за сохранения этой информации в виде архива появляется необходимость обработки большого количества данных, что возможно осуществить только в автоматическом режиме.

С этой целью была создана программа с использованием языка программирования C#. Программа выбирает необходимые для расчета индексов метеорологические параметры и размещает их в таблице Excell (рис. 1). На рисунке в первом столбце указана изобарическая поверхность, во втором — геопотенциальная высота изобарической поверхности, в третьем — температура воздуха, в четвертом — температура точки росы, в пятом — направление ветра, в шестом — скорость ветра. Отобранные ряды данных используются как исходные для расчета индексов.

Создание программ для расчета индексов Lifted, Showalter и SWEAT обусловлено большой трудоемкостью и значительными затратами времени, необходимыми

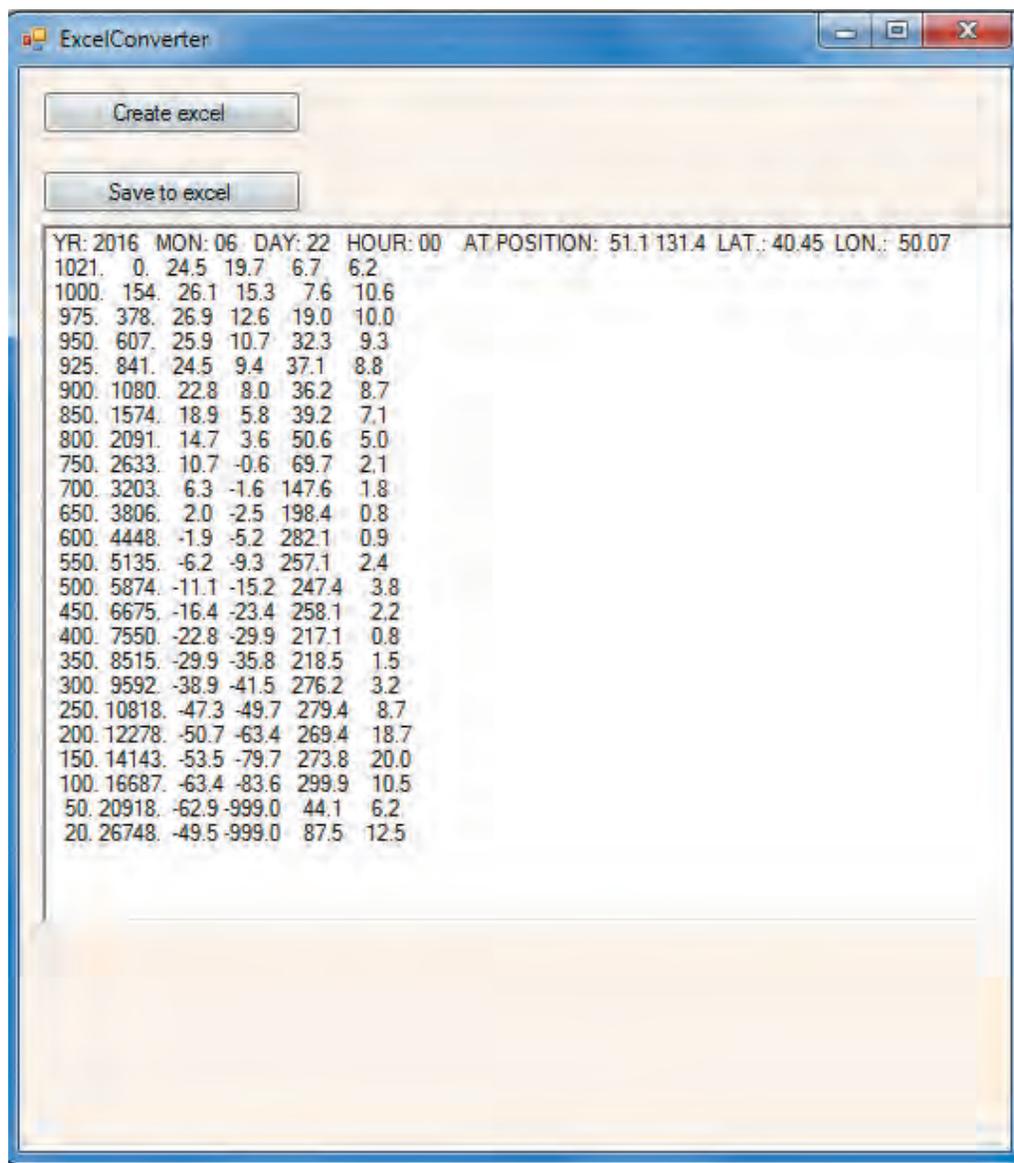


Рис. 1. Общий вид программы, созданной на языке программирования C#.

для их вычисления при помощи аэрологических диаграмм. Поэтому авторами использован язык программирования Delphi, который, наряду с эффективностью, обладает сложной структурой программирования. Он является наиболее распространенной средой программирования в операционной системе Windows. Вообще говоря, то, что Delphi включает все новые технологии программирования,

позволяет повысить качество программирования и создать программы, которые охватывают широкий круг пользователей и обладают высокой производительной мощностью [1]. С его помощью возможно написание программ не только в Windows, но и в других операционных системах. Основной причиной такого широкого распространения Delphi является его высокая скорость в области визуального программирования и простота использования.

На данный момент версия этого языка Object Pascal очень хорошо развита и широко используется для решения различных программных задач в инженерии, экономике и т. д. Самым большим преимуществом программ, написанных на языке Object Pascal, является их простота считывания. Поэтому для расчета индексов SI и LI при помощи этой программы нам необходимы данные о температуре воздуха и температуре точки росы (в кельвинах) на изобарических поверхностях 950 и 850 гПа, а также температура воздуха (в кельвинах) на изобарической поверхности 500 гПа. Для автоматического расчета SWEAT индекса, который используется на практике для прогнозирования грозы, также была создана программа на этом языке. При применении созданных программ расчета всех трех индексов нет необходимости работы с аэрологическими диаграммами. Использование программ повышает оперативность прогнозов и экономит время, что позволяет использовать их синоптиками как вспомогательное средства [1—4].

Для определения атмосферной неустойчивости применяются два метода: один с использованием индекса Showalter (*SI*), а другой — индекса Lifted (*LI*). Оба метода предполагают расчет средней неустойчивости тропосферы на основе разности значений температуры среды и поднимающихся частиц воздуха на уровне 500 гПа:

$$SI = T_{500} - T_{p850},$$

$$LI = T_{500} - T_{p950},$$

где  $T_{500}$  — температура воздуха на уровне 500 гПа;  $T_{p850}$  и  $T_{p950}$  — температура частиц, поднятых с уровня изобарических поверхностей 850 и 950 гПа (1,5 км и 500 м над земной поверхностью соответственно).

Если  $LI < 0$  и  $SI < 0$ , то следует ожидать грозу, если  $LI > 0$  и  $SI > 0$ , то атмосфера считается устойчивой и грозы не ожидаются.

Индекс Total Totals (*TT*) представляет собой статическую устойчивость и определяется как вертикальный градиент температуры в слое 850—500 гПа с учетом точки росы на уровне 850 гПа:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2 \cdot [T_{500}],$$

где  $T_{850}$  — температура воздуха на уровне 850 гПа;  $T_{d850}$  — температура точки росы на уровне 850 гПа;  $T_{500}$  — температура воздуха на уровне 500 гПа [5, 12].

Если значение параметра *TT* изменяется в пределах 45—50 °С, то состояние атмосферы умеренно неустойчиво. При значениях *TT*, равных 50—55 °С, атмосфера влажнонеустойчива и вероятность развития грозы высока. Если значения *TT*

составляют 55—60 °С, то состояние атмосферы крайне неустойчиво и над территорией вероятны сильные грозы.

Расчет индекса Vauiting ( $K$ ) основан на вертикальном градиенте температуры и влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - d_{700}),$$

где  $T_{850}$  — температура окружающей среды на уровне 850 гПа;  $T_{500}$  — температура окружающей среды на уровне 500 гПа;  $T_{d850}$  — температура точки росы на уровне 850 гПа;  $d_{700}$  — дефицит точки росы на уровне 700 гПа.

Если в результате расчета окажется, что  $K < 20$ , то гроз ожидать не следует; при  $20 < K < 25$  следует ожидать изолированные грозы; при  $25 < K < 30$  в прогнозе следует указывать отдельные грозы, а если величина  $K > 30$  — то грозы повсеместно.

Для оценки интенсивности грозы может быть использован индекс Thompson ( $Ti$ ):

$$Ti = K - LI.$$

При  $Ti < 25$  прогнозируется отсутствие грозы; при  $Ti$  от 25 до 34 — возможны грозы; при  $Ti$  от 35 до 39 — грозы, местами сильные; при  $Ti \geq 40$  — сильные грозы.

Индекс  $S$  используется для прогнозирования интенсивности грозы и покрытия территории по площади:

$$S = TT - (T_{700} - T_{d700}) - A,$$

где  $T_{700}$  — температура воздуха на уровне 700 гПа;  $T_{d700}$  — температура точки росы на уровне 700 гПа;  $TT$  — индекс Total Totals; коэффициент  $A$  зависит от разности значений температуры на уровнях 850 и 500 гПа:

$$A = 0, \text{ когда } (T_{850} - T_{500}) > 25;$$

$$A = 2, \text{ когда } (T_{850} - T_{500}) \text{ равно } 22\text{—}25;$$

$$A = 6, \text{ когда } T_{850} - T_{500} < 22.$$

Если  $S < 39$ , вероятность грозы не превышает 11 %; если  $S$  составляет от 40 до 45, то вероятность грозы 42 %; если  $S > 46$ , вероятность грозы 75 % и более.

Индекс  $SWEAT$  представляет собой комплексный критерий для диагноза и прогноза опасных и стихийных явлений погоды, связанных с конвективной облачностью [4, 12]:

$$SWEAT = 12 \cdot T_{d850} + 20 \cdot (TT - 49) + 3,888 \cdot F_{850} + \\ + 1,944 \cdot F_{500} + (125 \cdot [\sin(D_{500} - D_{850}) + 0,2]),$$

где  $T_{d850}$  — температура точки росы на уровне 850 гПа;  $TT$  — индекс Total Totals;  $F_{850}$  и  $F_{500}$  — скорость ветра на уровнях 850 и 500 гПа;  $D_{500}$  и  $D_{850}$  — направление ветра на уровнях 850 и 500 гПа [12, 13].

При  $SWEAT < 250$  условия для возникновения сильных гроз отсутствуют; при  $SWEAT$  от 250 до 350 есть условия для сильных гроз, града и шквалов; при  $SWEAT$  от 350 до 500 есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, смерчей; при  $SWEAT \geq 500$  есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, сильных смерчей.

В последнее время вышеуказанные индексы неустойчивости используются для прогнозирования грозы на территории Баку. Необходимо отметить, что впервые для территории Баку осуществлено использование модельных данных (за 2005—2018 гг.) для расчета индексов неустойчивости и создание статистических рядов. При этом в статистические ряды включены параметры за те дни, когда более двух часов наблюдались кучево-дождевые облака.

### Результаты расчетов

Сравнение спрогнозированного и наблюдаемого числа грозовых дней позволило выявить, что за указанный период времени наиболее высока была оправдываемость индексов  $SWEAT$  (94,1 %), Lifted (84,7 %) и Thompson (74,0 %). Оправдываемость других индексов составила:  $S$  (68,2 %), Showalter (66,4 %), Total Totals (54,5 %).

Наименьшая оправдываемость была у индекса Vayting (36,4 %). Такая низкая оправдываемость связана с тем, что гроза прогнозируется при значении индекса, равном 20 и более, а реально наблюдается при значениях более 25.

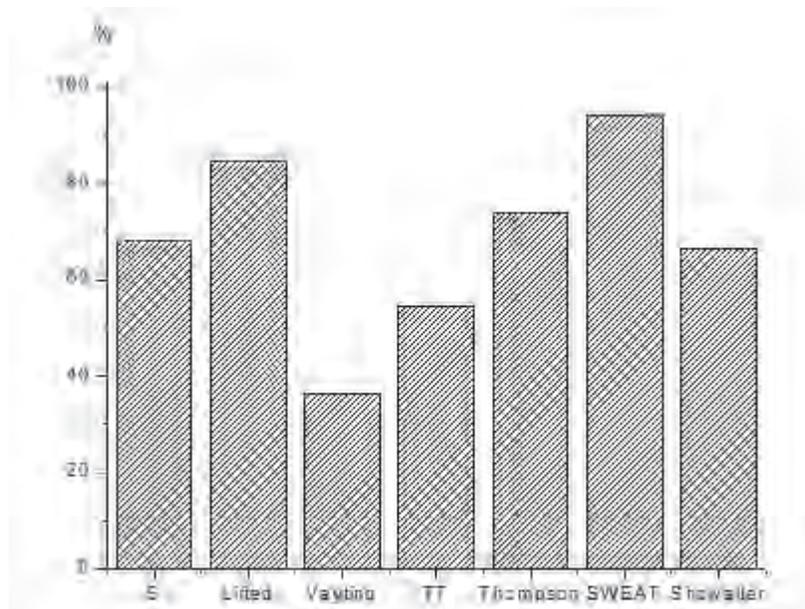


Рис. 2. Гистограмма оправдываемости индексов неустойчивости атмосферы за 2005—2018 гг.

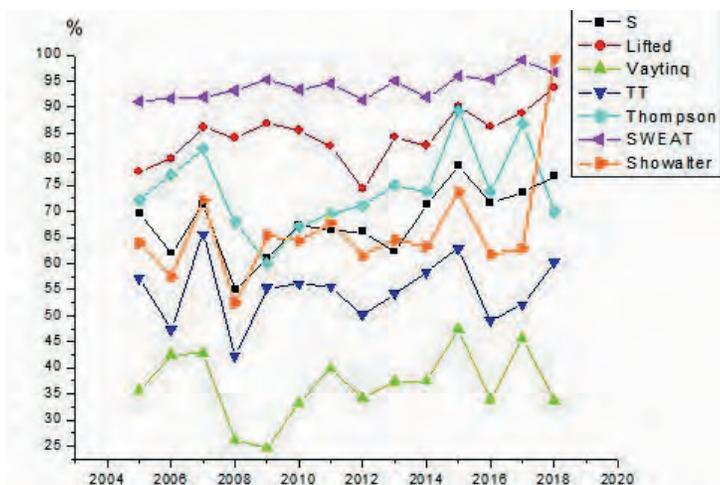


Рис. 3. Оправдываемость индексов по годам.

Если рассмотреть оправдываемость по годам, то можно заметить, что использование индекса SWEAT себя полностью оправдало (рис. 3). Его оправдываемость за указанный период времени (2005—2018 гг.) превысила 90 %. Отметим, что SWEAT индекс учитывает влажность в нижних слоях тропосферы, интенсивность атмосферной неустойчивости, скорость ветра в нижней и средней тропосфере и адвекцию теплого воздуха (изменение температуры между уровнями 850 и 500 гПа) [10, 11].

### Выводы

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты.

Оправдываемость применения различных индексов неустойчивости атмосферы для прогнозирования грозы в районе международного аэропорта Гейдар Алиев на основе модельных данных за 2005—2018 гг. составила: SWEAT 94,1 %, Lifted 84,7 %, Thompson 74,0 %, S 68,2 %, Showalter 66,4 %, Total Totals 54,5 % и Vaytingq 36,4 %.

Исследование оправдываемости индексов по годам показало, что наиболее предпочтительно использование индекса SWEAT. Его оправдываемость за указанный период времени (2005—2018 гг.) превысила 90 %.

С целью расчета значений индексов неустойчивости атмосферы разработаны программы на языках программирования DELPHI и C# (C sharp). Внедрены на практике в международном аэропорту Гейдар Алиев.

### Список литературы

1. Ахмедов Л.Н., Хуришудов Ш.А. Информационные технологии. Баку: Элм, 2008. 128 с.
2. Гусейнов Н.Ш., Агаева А.А. Оценка неустойчивости атмосферы в течение грозовой активности // Научные труды Национальной авиационной академии. 2014. № 1. С. 142—149.

3. Гусейнов Н.Ш., Меликов Б.М. Анализ применения неустойчивости индексов в прогнозе грозы // Научные труды Национальной авиационной академии. 2012. Т. 14, № 1. С. 15—22.
4. Гусейнов Н.Ш., Ахмедов Л.Н., Агаева А.А. Автоматизированный метод расчета неустойчивости атмосферы // Научные труды Национальной авиационной академии. 2014. Т. 16, № 2. С. 51—54.
5. Еришова Т.В., Горбатенко В.П., Клинова О.А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник ТГПУ. 2012. С. 9—13.
6. Сафаров С.Г. Грозоградовые и селевые явления на территории Азербайджана и радиолокационные методы их прогнозирования. Баку: Элм. 2012. 292 с.
7. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Три-ада лтд, 2016. 312 с.
8. Chakina N.P., Skriptunova E.N. Convective activity automated forecasts and significant weather charts produced in the RAFC Moscow / Proc. 4th Intern. Conf. Aviation Weather Systems/ Paris, France, June 24—28, 1991. P. 319—320.
9. Chakina N.P. Convective activity automated forecasts and significant weather charts produced in the RAFC Moscow / Proc. 5th Intern. Conf. Aviation Weather Systems, Aug. 1 — 16, Vienna, 1993. Virginia & Preprint. P. 722.
10. Doswell C.A., Schutz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteor. 2006. 1 (3). P. 1—22.
11. Doswell C.A., Brooks H.E., and Maddox R.A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology // Weather and Forecasting. 1996. V. 11. P. 560—581.
12. <http://flymeteo.org/stat/indexneust.php>
13. <https://meteo-orw.ru>
14. <https://www.emc.ncep.noaa.gov>
15. <https://www.ogimet.com>

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

*А.Ю. Рыбанова<sup>1</sup>, А.А. Фокичева<sup>2</sup>, Л.Н. Воробьева<sup>1</sup>, А.А. Коршунов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ВНИИГМИ — МЦД, aribanova@meteo.ru

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет

<sup>3</sup> г. Обнинск

Рассматривается оценка экономической полезности информационной деятельности гидрометеорологической службы. Для макроэкономической оценки используются показатели экономического эффекта и экономической эффективности. Показан равномерный рост экономического эффекта за последнее десятилетие и приведены оценки экономической эффективности, демонстрирующие ее увеличение.

*Ключевые слова:* социально-экономическая система, опасные гидрометеорологические явления, неблагоприятные условия погоды, экономическая полезность, экономический эффект, экономическая эффективность.

## ECONOMIC VALUE OF INFORMATION ACTIVITIES OF THE HYDROMETEOROLOGICAL SERVICE

*A.Yu. Rybanova<sup>1</sup>, A.A. Fokicheva<sup>2</sup>, L.N. Vorobyova<sup>1</sup>, A.A. Korshunov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center (RIHMI-WDC)

<sup>2</sup> Russian State Hydrometeorological University

<sup>3</sup> Obninsk

Economic value of information activity of the Hydrometeorological Service is estimated. Indices of economic effect and economic efficiency are used in macroeconomic estimation. Smooth growth of economic effect for the last decade is shown. Estimates of economic efficiency that demonstrate its increase are given.

*Keywords:* social and economic system, hydrometeorological hazards, severe weather, economic value, economic effect, economic efficiency

### 1. Введение

Последние десятилетия характеризуются возрастающим интересом к проблеме зависимости хозяйственной деятельности от условий погоды и изменения климата, что обуславливает признание «экономической метеорологии» в качестве научной области исследований [18].

Из-за постоянного увеличения разнообразия и масштаба негативных проявлений погоды и климата социально-экономические системы сталкиваются с проблемой обеспечения устойчивого функционирования и развития в условиях возрастающих издержек, обусловленных зависимостью экономической и социальной деятельности от окружающей природной среды ([1—4, 6, 7, 15, 17] и др.).

Влияние опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды приводит к тому, что воздействие гидрометеорологических факторов на население и экономику становится существенным и угрожает устойчивому развитию социально-экономических систем.

Негативное влияние условий погоды и климата на экономику и общество, необходимость снижения социально-экономического ущерба приводят к целесообразности учета влияния погодно-климатических условий на государственном уровне. Одновременно все более актуальными становятся исследования и оценка экономической полезности информационной деятельности национальных гидрометеорологических служб как за рубежом, так и в России.

В настоящее время полезность использования в производственно-хозяйственной деятельности гидрометеорологических прогнозов, климатической информации и данных, полученных со станций наблюдений, оценивается посредством таких параметров, как экономический эффект, экономическая эффективность, экономическая выгода от использования гидрометеорологической информации, показатель адаптации отраслей экономики к неблагоприятным условиям погоды, предотвращенный ущерб.

В общем случае под экономическим эффектом понимается экономический результат, обусловленный внедрением интенсивных технологий, организационно-экономических мероприятий и т.п., направленных на улучшение хозяйственной деятельности. Экономический эффект является абсолютным показателем и измеряется разностью между денежным доходом от деятельности и денежными расходами на ее осуществление. Применительно к исследуемой проблеме получение экономического результата достигается за счет использования специфического информационного ресурса — метеорологической информации.

Экономическая эффективность характеризует отношение полученного результата к затратам, обусловившим этот результат, и позволяет осуществить сравнение экономических субъектов между собой по результатам погодо-хозяйственной деятельности. Предотвращенный ущерб рассматривается как результат информационной деятельности гидрометеорологической службы, разрабатывающей и передающей прогнозы состояния атмосферы, но в то же время зависит и от эффективности действий потребителей гидрометеорологической информации, осуществляющих защитные мероприятия в случае ожидания опасных условий погоды. Пороговые значения неблагоприятных и опасных условий погоды должны отражать уровень воздействия, которое метеорологические условия будут оказывать на общество, включая степень опасности для жизни людей и имущества, а также дестабилизацию повседневной жизни и производственной деятельности.

В настоящее время многие страны используют четырехцветную систему «светофор», показывающую различные уровни риска — сочетания вероятности явления (условия погоды) и его потенциального воздействия [16]. Для каждого уровня воздействия у потребителей метеорологической информации должен существовать комплекс мер, применение которых будет осуществляться в соответствии с рекомендациями метеорологов. По мере развития синоптической ситуации (уточнения прогноза) принимаемые меры будут корректироваться, обеспечивая

эффективное предотвращение экономического ущерба в социально-экономической системе по метеорологическим причинам.

Отметим, что основная общественная задача национальных гидрометеорологических служб — предоставление прогнозов и предупреждений широким слоям населения; в то же время гидрометеорологические службы предоставляют повседневное обслуживание, повышающее эффективность погодозависимых отраслей экономики, а также обеспечивают поддержку государственных структур в борьбе с последствиями опасных явлений естественного и искусственного происхождения.

В последние десятилетия большое внимание уделяется изучению социально-экономических выгод от гидрологического и метеорологического обслуживания [14, 15, 19, 20]. Решением XVIII Всемирного метеорологического конгресса (июнь 2019 г.) осуществлена реорганизация Технических комиссий ВМО и создана Комиссия по обслуживанию и применениям в областях погоды, климата, воды и соответствующих областях окружающей среды. Комиссия по обслуживанию вносит вклад в разработку и внедрение согласованных на глобальном уровне видов обслуживания и применений, связанных с погодой, климатом, водой, океаном и окружающей средой, для обеспечения принятия информированных решений и получения социально-экономических выгод всеми группами пользователей и обществом в целом. В ее задачи входят, в том числе, развитие во всех соответствующих областях применения культуры обслуживания, включая ориентацию на потребителя, менеджмент качества, понимание ценности и социально-экономических выгод; повышение уровня понимания экономических аспектов предоставления обслуживания, механизмов возмещения расходов, торговых и рыночных факторов.

Отметим, что ценность гидрометеорологического обслуживания увеличивается в условиях возрастающего риска, обусловленного глобальным экологическим кризисом, действием климатических и неклиматических факторов [13].

Целью данной работы является сравнительный анализ экономической полезности метеорологической информации в Российской Федерации. Макроэкономическая оценка результативности информационной деятельности Росгидромета и ее вклада в устойчивое развитие осуществляется на основе показателя экономического эффекта и экономической эффективности.

## **2. Экономический эффект**

Экономическая деятельность страны по разным причинам развивается в условиях неопределенности, и ожидаемые доходы и расходы не могут быть заранее определены однозначно. Негативные последствия неопределенности результатов экономической деятельности принято характеризовать понятием риска. Риски экономической деятельности связаны, в том числе, с воздействием погоды и климата [5]. Гидрометеорологическая среда способна оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на экономические системы: климатические условия и условия погоды выступают в роли природных ресурсов в сельскохозяйственном

производстве, энергетике, транспорте, лесном и водном хозяйстве и т. д. В то же время неблагоприятные условия и опасные гидрометеорологические явления погоды являются причиной экономического ущерба и социальных потерь, которые можно исследовать в пространственно-временном аспекте.

Во многих зарубежных и отечественных исследованиях отмечалось, что национальные метеорологические службы могли бы принести большую пользу, если бы в своей информационной деятельности наряду со сравнительным анализом сведений о негативных последствиях от воздействия неблагоприятных условий погоды, опасных и экстремальных гидрометеорологических явлений разрабатывали и совершенствовали методики оценки *экономического эффекта*, тем самым демонстрируя экономическую ценность информационной деятельности гидрометеорологической службы [19, 20].

Особенности интерпретации экономического эффекта (ЭЭ) связаны с производством гидрометеорологической информации на бюджетные средства и возможностью восприятия ее как частного и общественного блага.

Расчеты, которые ежемесячно производятся специалистами территориальных управлений Росгидромета (УГМС) и подтверждаются различными отраслями экономики (либо рассчитываются департаментами министерств различных субъектов РФ — пользователями информационной продукции гидрометеорологической службы), собираются, обобщаются и анализируются во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ — МЦД). Эти обобщения утверждаются Росгидрометом, после чего они принимают статус официальных и достоверных данных.

На рис. 1 приведены значения общего числа случаев воздействия условий погоды на социально-экономическую систему Российской Федерации (рассматривались метеорологические, агрометеорологические и гидрологические явления) и ЭЭ в ценах каждого текущего года за 2009—2018 гг. Значения общего числа случаев воздействия условий погоды на социально-экономическую систему получены на основе анализа базы данных об опасных гидрометеорологических явлениях, которая ведется во ВНИИГМИ — МЦД [9—12].

Отметим, что данные по числу случаев воздействия опасных условий погоды формируются следующим образом: если происходит воздействие, которое охватывает несколько субъектов РФ, то это учитывается в целом по России как один случай. В тех ситуациях, когда воздействие условия погоды наблюдается в течение длительного периода времени (например, атмосферная засуха продолжительностью несколько месяцев), это также фиксируется как один случай. Если в рассматриваемом случае воздействия наблюдается несколько гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды, учитываются только те из них, интенсивность и продолжительность которых достигают установленных критериев опасности. Таким образом, число опасных гидрометеорологических явлений всегда больше, чем число случаев воздействия.

Из рис. 1 видно, что для значений экономического эффекта наблюдается тенденция планомерного роста независимо от колебания числа случаев воздействия.



Рис. 1. Тенденция роста экономического эффекта в ценах текущего года и общего числа случаев воздействия условий погоды на социально-экономическую систему.

1 — экономический эффект, млрд руб., 2 — число случаев.

На территории Российской Федерации в 2018 г. отмечено 456 случаев воздействия условий погоды гидрометеорологического характера, причинивших материальный и социальный ущерб населению и отраслям экономики. Это на 72 случая больше, чем в 2017 г., и является наибольшим значением за рассматриваемый десятилетний период. Поэтому планомерный рост экономического эффекта при незначительном колебании числа случаев воздействия неблагоприятных условий погоды (от 328 до 456) может свидетельствовать о том, что экономическая ценность информационной деятельности Росгидромета в целом возрастает.

Воздействия погодных условий на социально-экономическую систему имеют случайный характер, однако вопрос о характерных трендах и сезонности погодных воздействий необходимо рассматривать в региональном разрезе. Отметим, что в настоящее время в ГГИ (2018 г.) и ГГО (2019 г.) разработаны новые методы учета нестационарности рядов, и в дальнейших исследованиях авторов фактор нестационарности будет учитываться.

Приведенные данные могут служить в качестве исходных для оценки будущих воздействий на различных этапах, в том числе до и во время возникновения, а также по мере развития опасной гидрометеорологической ситуации. При этом целесообразно проводить анализ интенсивности воздействия, опасности и уязвимости в долгосрочной перспективе; восстановления (после опасного явления) для

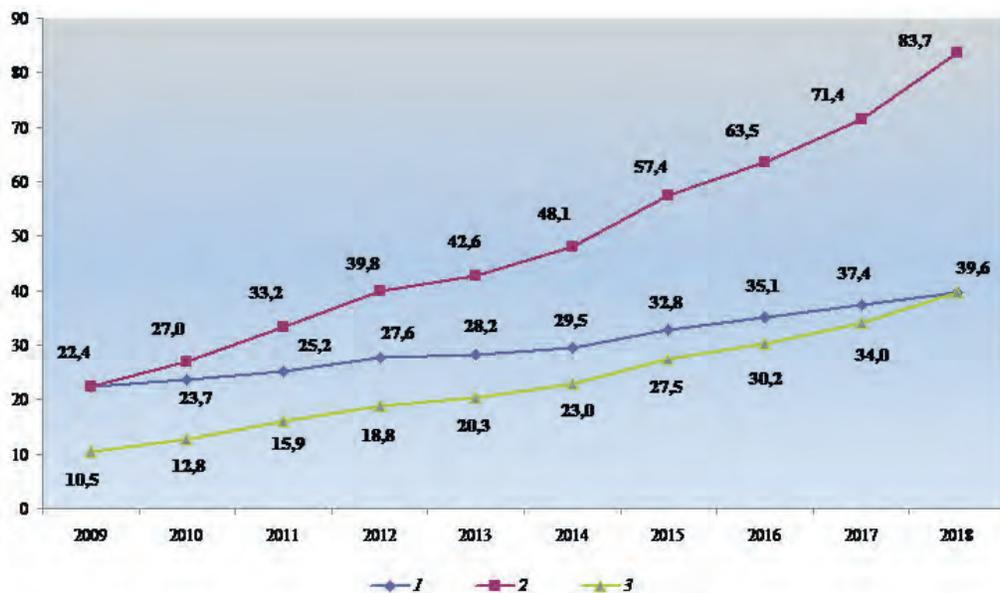


Рис. 2. Тенденция изменения экономического эффекта в текущих ценах и ценах 2009 и 2018 гг.

1 — экономический эффект в ценах текущего года, млрд руб.; 2 — экономический эффект в ценах 2009 г., млрд руб.; 3 — экономический эффект в ценах 2018 г., млрд руб.

предотвращения вторичных угроз или их последствий; реагирования, когда необходим анализ в режиме реального времени.

На рис. 2 показана статистика по экономическому эффекту за период с 2009 по 2018 г. в ценах текущего года и приведены значения экономического эффекта в ценах 2009 и 2018 гг., рассчитанные через индекс-дефлятор ([http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/vvp/vvp-god/tab4.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/vvp/vvp-god/tab4.htm)), что позволяет оценить истинные изменения ЭЭ. Значения индекса-дефлятора (коэффициента, применяемого для перевода экономических показателей, рассчитанных в ценах текущего периода, в постоянные цены) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Индекс-дефлятор по годам в базовых ценах 2009 и 2018 гг.

Индекс-дефлятор	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Для расчета значений в ценах 2009 г.	1,0	1,14	1,32	1,44	1,51	1,65	1,78	1,83	1,92	2,11
Для расчета значений в ценах 2018 г.	0,47	0,54	0,63	0,68	0,72	0,78	0,84	0,86	0,91	1,0

Из рис. 2 видно, что точные прогнозы синоптиков в 2018 г. сэкономили для России 39,6 млрд рублей. При этом ЭЭ за последнее десятилетие вырос в 3,7 раза (в ценах 2009 г. и аналогично в ценах 2018 г.). Это увеличение обусловлено не

только ростом цен, но и расширением круга потребителей, подтверждающих экономический эффект, а также рядом других факторов. Рост ЭЭ показывает содержательность обратной информации, а именно насколько прогнозы были действительно полезны. Поэтому и в дальнейшем необходимо развивать методы и методики расчета экономического эффекта по наиболее значимым видам экономической деятельности. Это важно для того, чтобы показать, что инвестиции в метеорологию — это именно те инвестиции, которые окупаются, дают возможность сохранить жизни людей и более эффективно осуществлять хозяйствование.

Необходимо отметить, что реальный ЭЭ дает не сам прогноз, а его эффективное применение, наличие у пользователей стратегии реагирования (в том числе адаптации к условиям погоды и их воздействию) на предупреждение о возможном опасном явлении природы и эффективности предпринятых шагов.

В табл. 2 приведены данные об ЭЭ, получаемом УГМС, по годам. Значения эффекта приведены в ценах текущего года.

В таблицу не включены данные об ЭЭ для Центрального УГМС. Это обусловлено тем, что, несмотря на достаточно низкое значение общего числа случаев воздействия неблагоприятных условий погоды (их повторяемость за 2005 — 2017 гг. по Центральному экономическому району составляет 22,15, в то время как по Северо-Кавказскому — 97,54), ЭЭ для Центрального УГМС выше, чем для всех других, как минимум в три раза (только по Москве и Московской области в 2017 г. валовой региональный продукт составил 17,865 трлн рублей) [8].

Из табл. 2 видно, что для большинства УГМС планомерного роста экономического эффекта не наблюдается. Это можно объяснить не только тем, что общее число случаев воздействия условий погоды на социально-экономическую систему субъектов, входящих в УГМС, от года к году колеблется, но и интенсивностью воздействия. В частности, в [8] приведены результаты исследования интенсивности воздействия на основе оценки двух показателей:  $K_1$  и  $K_2$ . Показатель  $K_1$  формируется как произведение повторяемости воздействия условий погоды, отмеченной на конкретной территории, на плотность населения рассматриваемой территории. Очевидно, что чем выше плотность населения и чем больше повторяемость опасных явлений, тем выше интенсивность возможного воздействия на население. Таким образом, этот показатель оценивает влияние погодо-климатических условий на социальную сферу различных регионов Российской Федерации. Показатель  $K_2$  представляет собой произведение среднегодовой повторяемости опасных гидрометеорологических явлений на валовой региональный продукт — данный показатель оценивает влияние гидрометеорологической среды на экономическую деятельность в регионах РФ. Отметим, что анализ статистики повторяемости воздействия опасных гидрометеорологических явлений проводился совместно с анализом социально-экономической статистики (численность населения, площадь территории и валовой региональный продукт).

Для целей исследования, представленного в настоящей работе, важен показатель  $K_2$ , оценивающий экономический аспект воздействия на пространственно распределенную систему.

Таблица 2

Экономический эффект (млрд рублей) за 2009—2018 гг., получаемый разными УГМС

УГМС	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Башкирское	0,415	0,310	0,342	0,389	0,426	0,066	0,061	0,057	0,039	0,040
Верхне-Волжское	1,229	1,228	0,919	1,159	1,179	1,131	0,994	1,194	1,140	1,148
Дальневосточное	0,769	0,701	0,819	0,918	0,954	1,176	1,148	1,282	1,280	1,372
Забайкальское	0,544	0,492	0,711	0,710	0,737	0,930	0,955	0,826	0,796	0,673
Западно-Сибирское	1,225	1,060	0,861	1,284	1,235	1196	1,458	1,535	1,521	1,467
Иркутское	0,373	0,541	0,504	0,527	0,473	0,461	0,486	0,442	0,466	0,475
Камчатское	0,474	0,636	0,648	0,401	0,436	0,794	1,063	1,202	1,284	1,957
Колымское	0,426	0,469	0,509	0,568	0,608	0,688	0,694	0,758	0,622	0,274
Мурманское	1,646	2,424	2,209	2,368	2,188	1,704	2,557	3,175	3,669	2,861
Обь-Иртышское	3,129	3,100	3,397	3,855	4,135	4,265	5,255	5,303	5,733	6,761
Приволжское	2,153	2,461	2,419	2,754	2,815	2,953	3,013	2,953	3,129	3,282
Приморское	0,465	0,530	0,543	0,674	0,625	0,543	0,645	0,582	0,592	0,697
Республики Татарстан	0,507	0,509	0,518	0,614	0,591	0,526	0,528	0,622	0,579	0,631
Сахалинское	0,723	0,898	1,128	1,197	1,196	1,312	1,335	1,323	1,187	1,165
Северное	2,288	2,147	2,462	2,333	2,421	2,741	2,774	2,799	2,821	2,723
Северо-Западное	1,980	2,569	2,282	2,440	2,525	2,589	2,628	2,641	2,652	2,644
Северо-Кавказское	2,207	2,175	3,069	3,530	3,576	4,448	5,378	5,687	5,452	5,673
Среднесибирское	0,761	0,362	0,687	0,588	0,844	0,930	0,686	0,438	0,644	0,682
Уральское	0,772	0,756	0,733	0,809	0,745	0,471	0,361	0,358	0,425	0,405
ЦЧО	0,178	0,219	0,338	0,388	0,406	0,478	0,661	0,703	0,662	0,677
Чукотское	0,009	0,009	0,008	0,007	0,010	0,008	0,011	0,01	0,009	0,01
Якутское	0,024	0,022	0,022	0,035	0,028	0,028	0,024	0,026	0,03	0,025

*Примечание.* Башкирское — Республика Башкирия; Верхне-Волжское — Нижегородская область; Дальневосточное — Хабаровский край; Забайкальское — Забайкальский край; Западно-Сибирское — Новосибирская область; Иркутское — Иркутская область; Камчатское — Камчатский край; Колымское — Магаданская область; Мурманское — Мурманская область; Обь-Иртышское — Омская область; Приволжское — Самарская область; Приморское — Приморский край; Республики Татарстан — Республика Татарстан; Сахалинское — Сахалинская область; Северное — Архангельская область; Северо-Западное — Ленинградская область; Северо-Кавказское — Ростовская область; Среднесибирское — Красноярский край; Уральское — Свердловская область; ЦЧО — Курская область; Чукотское — Чукотский АО; Якутское — Республика Саха (Якутия).

Анализ результатов расчетов ЭЭ и показателя  $K_2$  показывает, что они хорошо согласуются. Так, например, если наибольший экономический эффект от информационной деятельности гидрометеорологической службы приходится на Обь-Иртышское и Северо-Кавказское УГМС, то наибольшая интенсивность воздействия на экономику в целом также отмечается в Северо-Кавказском экономическом районе. Аналогичную ситуацию можно отметить и в отношении других УГМС, в которых значение экономического эффекта превышает 1 млрд рублей.

Учреждениями Росгидромета ведется постоянная работа по определению экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации

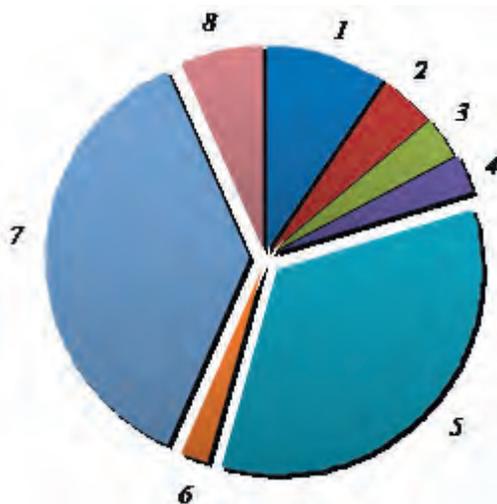


Рис. 3. Распределение экономического эффекта по видам экономической деятельности в 2018 г.

1 — сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство (9,5 %);  
 2 — рыболовство и рыбоводство (4,3 %); 3 — добыча полезных ископаемых (3,3 %);  
 4 — обрабатывающие производства (3,3 %); 5 — производство и распределение электроэнергии, газа и воды (34,1 %); 6 — строительство (2,2 %); 7 — транспорт и связь (сухопутный, водный и воздушный транспорт) (36,6 %); 8 — прочее (6,7 %).

в разных отраслях экономики. На рис. 3 показан вклад основных погодозависимых отраслей экономики страны в ЭЭ, обусловленный использованием гидрометеорологической информации.

Следует отметить, что основные погодозависимые отрасли являются экономически значимыми для Российской Федерации. Наибольший экономический эффект от использования гидрометеорологической информации в 2018 г. приходится на следующие виды экономической деятельности: транспорт и связь (36,6 % совокупного экономического эффекта), производство и распределение электроэнергии, газа и воды (34,1 % совокупного экономического эффекта), сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство (9,5 % совокупного экономического эффекта).

Кроме того, самыми уязвимыми в отношении опасных природных явлений отраслями экономики являются те же отрасли: транспорт и связь, производство и распределение энергии и сельское хозяйство [4]. Так, общая повторяемость воздействия опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных условий погоды, причинивших социально-экономический ущерб в 2009—2017 гг., составила: транспорт и связь — 3835 случаев (на автотранспорт приходится 2391 случай, на морское судоходство — 146, на железнодорожный транспорт — 217, на речное судоходство — 222, на авиацию — 330, на связь — 469), производство и распределение энергии — 2820 случаев и сельское хозяйство — 2947 случаев (2479 случаев приходится на сельское хозяйство и 468 — на лесное хозяйство).

Сведений о том, какой будет погода, теперь уже недостаточно, и акцент гидрометеорологического обслуживания необходимо смещать в сторону информирования потребителя о наиболее вероятных последствиях опасных явлений и неблагоприятных условий погоды. Совершенствование знаний о чистых экономических выгодах от гидрометеорологического обеспечения может способствовать принятию решений, по крайней мере, двумя способами: во-первых, может помочь определить или хотя бы предположить, какое экономическое решение будет наиболее эффективным; во-вторых, может подтвердить экономическую значимость ранее принятых решений.

### **3. Результаты оценки экономической эффективности информационной деятельности гидрометеорологической службы**

Экономическая эффективность информационной деятельности, выраженная в терминах «затраты на гидрометеорологическое обслуживание / экономический эффект», для России в 2010 г. оценивалась значением 1:5,2 (по данным ВНИИГМИ — МЦД и Международного банка реконструкции и развития). В 2010—2011 гг. экономическая эффективность деятельности метеорологических и гидрометеорологических служб мира в целом оценивалась Всемирной метеорологической организацией значением 1:(7,0...10,0). Эффективность деятельности китайской гидрометеорологической службы оценивалась ее специалистами значением 1:35.

Выполненные расчеты показали, что оценка экономической эффективности гидрометеорологического обеспечения пользователей организациями Росгидромета в 2015 г. составила 1:5,8 (на один рубль, затраченный на производство метеорологической информации, приходится 5,8 рубля экономического эффекта).

Относительно небольшое увеличение значения экономической эффективности (0,6 рубля) объясняется, в первую очередь, тем, что экономическая эффективность как параметр экономической полезности информационной деятельности Росгидромета является инертной. Инертность обусловлена совершенствованием и развитием методической системы расчета экономического эффекта (достаточно продолжительный процесс), развитием, а самое главное, адаптацией социально-экономической системы к происходящим изменениям климата и вследствие этого условий погоды.

Потребности в действенных мерах по уменьшению воздействий неблагоприятных условий погоды на социально-экономическую систему отчетливо указывают на необходимость системного исследования их угрозы и интенсивности для соответствующих регионов России. Это важно для предотвращения дальнейшего снижения уровня экономического и социального развития из-за стихийных бедствий различного масштаба (локального, муниципального, межмуниципального и, особенно, регионального).

В связи с этим целесообразно рассчитать оценку экономической эффективности, которая была бы получена на основе потенциального экономического эффекта.

В [12] приведена оценка потенциального (возможного) экономического эффекта, которая была рассчитана во ВНИИГМИ — МЦД в 2012 г. в ценах 2011 г. Она составляет 48 млрд рублей. Эту оценку с помощью индекса-дефлятора (см. табл. 1) и тенденции роста экономического эффекта (см. рис. 2) можно выполнить в ценах 2015 г.

Потенциальный экономический эффект от информационной деятельности Росгидромета по прогнозированию неблагоприятных условий погоды, которые причинили экономический ущерб и привели к социальным потерям, в ценах 2015 г. с учетом тенденции роста ЭЭ составил 62,1 млрд рублей. Это означает, что верхняя оценка экономической эффективности может быть охарактеризована как 1:10,9, и ее можно выбрать в качестве потенциальной экономической эффективности.

Оценки экономической эффективности обновлены и в дальнейшем будут уточняться (по итогам информационной деятельности за 2020 г.), а исследования экономической эффективности будут развиваться.

### Заключение

В статье рассмотрены два основных показателя экономической ценности информационной деятельности гидрометеорологической службы, которые на макроэкономическом уровне определяют оценки результативности и вклада Росгидромета в устойчивое развитие социально-экономической системы России. Результаты исследования показывают, что по этим показателям (экономический эффект и экономическая эффективность) полезность информационной деятельности гидрометеорологической службы России является достаточно высокой и находится на уровне многих других ведущих служб мира. Оценка потенциальной экономической эффективности, рассчитанная впервые, свидетельствует о возможности дальнейшего развития информационной деятельности Росгидромета.

### Список литературы

1. *Бедрицкий А.И.* Влияние погоды и климата на устойчивость и развитие экономики // Бюллетень ВМО. 1999. Т. 48. № 2. С. 215—222.
2. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Показатели влияния погодных условий на экономику: региональное распределение экономических потерь и экономической выгоды при использовании гидрометеорологической информации и продукции // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 5—17.
3. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России // Право и безопасность. Июль 2007. № 1—2. С. 7—13.
4. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Шаймарданов М.З.* Влияние опасных гидрометеорологических явлений на устойчивое развитие экономики России // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 59—67.
5. *Карлин Л.Н., Абрамов В.М.* Управление энвиронаментальными и экологическими рисками. СПб: изд-во РГГМУ. 2006. 332 с.
6. *Кобышева Н.В., Васильев М.П.* Уязвимость социальной сферы регионов России к опасным гидрометеорологическим явлениям // Труды ГГО. 2015. Вып. 578. С. 59—74.

7. Корнфорд С.Г. Социально-экономические последствия явлений погоды в 1996 г. // Бюлетень ВМО. 1997. Т. 46. № 4. С. 351—369.
8. Кориунов А.А., Рыбанова А.Ю., Фокичева А.А., Шаймарданов М.З. Анализ интенсивности воздействия опасных условий погоды на социально-экономическую систему // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 18—33.
9. Кориунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З. Система накопления и обработки данных об опасных гидрометеорологических явлениях в России // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 86—92.
10. Кориунов А.А., Шаймарданов М.З. База данных об опасных гидрометеорологических явлениях // Труды ВНИИГМИ — МЦД. 2007. № 172. С. 132—139.
11. Кориунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З. Создание базы данных об опасных явлениях для климатических исследований и обслуживания. // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 25. С. 79—85.
12. Кориунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З. Об организации обслуживания потребителей данными об опасных гидрометеорологических явлениях и неблагоприятных условиях погоды // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 46. С. 100—110.
13. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48. С. 11—32.
14. Оценивая погоду и климат: экономическая оценка метеорологического и гидрологического обслуживания. Женева. ВМО. ТД № 1153. 2015. 388 с.
15. Повышение защищенности от экстремальных метеорологических и климатических явлений. Женева, ВМО. ТД № 936. 2002. 36 с.
16. Фокичева А.А. Неопределенность реализации метеорологических прогнозов как фактор риска управленческих решений / В сб.: Тезисы Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». Санкт-Петербург, 14—15 марта 2019 г. СПб: изд-во РГГМУ. С. 701—703.
17. Фокичева А.А., Рыбанова А.Ю., Кориунов А.А. Обеспечение гидрометеорологической безопасности в нестабильных климатических условиях на примере адаптации потребителя автотранспортной системы к неблагоприятной погоде // Метеорология и гидрология. 2014. № 11. С. 39—46.
18. Хандожко Л.А. Экономическая метеорология. СПб: Гидрометеиздат. 2005. 490 с.
19. Economic and Social Benefits of Meteorological and Hydrological Services / Proc. Tech. Conf. Geneva, Switzerland, 26—30 March 1990. WMO. No. 733. 461 p.
20. Conference of the Economic Benefits of Meteorological and Hydrological Services. Geneva, Switzerland, 19—20 September 1994. WMO/TD. No. 630. 390 p.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БРИЗОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

*К.В. Фокина<sup>1</sup>, К.Ю. Булгаков<sup>2</sup>, К.Л. Восканян<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
fokinakarina@yandex.com

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Разработана двумерная негидростатическая модель бризовой циркуляции, записанная в терминах функции тока и вихря. Модель интегрируется численно и применяется к прямой береговой линии для получения временных и пространственных изменений полей ветра и температуры. Рассмотрено развитие бризовой циркуляции под влиянием тепловых контрастов между поверхностью суши и поверхностью моря. Представлены результаты нескольких интегрирований с различными начальными условиями прогрева подстилающей поверхности. Показано, что увеличение тепловых контрастов приводит к значительным изменениям горизонтальных масштабов и скорости бризовой циркуляции.

*Ключевые слова:* бризовая циркуляция, численное моделирование, температурные контрасты, функция тока, вихрь.

## NUMERICAL MODELLING OF BREEZE CIRCULATION

*K.V. Fokina<sup>1</sup>, K.Yu. Bulgakov<sup>2</sup>, K.L. Voskanyan<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University, kariinafokina@gmail.com

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

The paper considers a two-dimensional non-hydrostatic model of the breeze circulation that has been developed in terms of the stream function and vorticity. The model is integrated numerically and applied to a straight coastline to obtain the record of temporal and spatial changes in wind and temperature fields. The development of breeze circulation under the influence of thermal contrasts between the land surface and the sea surface is considered. The results of several integrations with different initial conditions of underlying surface heating are presented. It is demonstrated that an increase in thermal contrasts leads to significant changes in the horizontal scales and speed of the breeze circulation.

*Keywords:* breeze circulation, numerical modeling, temperature contrast, stream function, vorticity.

### Введение

Среди широкого спектра мезомасштабных процессов, развивающихся в пограничном слое прибрежных регионов, бризы являются особым объектом научного исследования на протяжении последних нескольких десятков лет. Это связано с их повсеместным распространением по земному шару и их повторяющимися особенностями, которые можно исследовать на основе данных наблюдений или численных подходов. Однако относительно небольшая плотность сети метеорологических станций и их неравномерное распределение приводят к тому, что доступные данные наблюдений являются недостаточными для получения полной картины мелкомасштабных особенностей циркуляции в конкретном регионе. Поэтому на сегодняшний день численное моделирование является основным методом изучения бризовой циркуляции. Высокое пространственное и временное

разрешение позволяет рассчитывать основные метеорологические характеристики для детального изучения особенностей развития бриза.

Бризы представляют собой гравитационное течение воздуха, вызванное температурными контрастами между поверхностью суши и воды. В дневные часы, когда температура поверхности суши превышает температуру поверхности моря, происходит развитие морского бриза, занимающего нижнюю часть атмосферного пограничного слоя, на верхней границе которого отмечается противоположно направленный поток воздуха. В ночное время наблюдается обратная картина, что приводит к развитию так называемого берегового бриза. Дневные бризы превосходят ночные по интенсивности и масштабам развития [1].

Актуальность изучения бризовой циркуляции определяет большое практическое значение феномена. Морской бриз является источником охлаждения и увлажнения воздуха в крупных приморских районах. Являясь одним из основных механизмов перемешивания воздуха, бризовая циркуляция оказывает влияние на распространение примесей в атмосфере. Бризы также оказывают влияние на метеорологические параметры, которые могут претерпевать резкие изменения, поэтому данный вид циркуляции может оказывать влияние и на хозяйственную деятельность человека (полеты малой авиации, судоходство и т.д.).

На сегодняшний день воспроизведение бризовой циркуляции в большинстве современных работ проводится в основном с помощью прогностических моделей, например моделей WRF-ARW [4, 7, 14, 20], SUBMESO [5] или MM5 [15], которые используют довольно низкое пространственное разрешение. Так, в работе Томпсона [19] горизонтальное разрешение принимает значения от 400 м до 36 км, а в исследовании Талбота [18] влияния морского бриза на динамику пограничного слоя использована мезомасштабная модель с разрешением от 500 м до 10 км.

Необходимо заметить, что число разработанных отдельно для бризовой циркуляции двумерных или трехмерных моделей сравнительно невелико, к тому же большинство из них получены несколько десятилетий назад. Среди таких моделей можно выделить двумерную модель Новицкого [11] и негидростатическую двумерную модель Огавы и Ша [12] или более ранние первые модели Пирса [13] и Эстока [8].

Также в работе Савиярви и Мэтьюз [16] и в работе группы авторов Фрейтаса, Розоффа и др. [9] используется сигма-система координат по вертикали. Однако для процессов с небольшими пространственными масштабами более обоснованной физически является  $z$ -система координат. Также некоторые модели используют так называемую псевдонегидростатику, в которой аналог давления — геопотенциал — рассчитывается с помощью уравнения гидростатики, как в вышеупомянутой работе Новицкого [11]. С точки зрения авторов такой метод, хотя и не оказывает существенного влияния на результаты, не вполне обоснован физически.

Настоящая работа основана на численном моделировании бризовой циркуляции, описываемой уравнениями, записанными в терминах вихря и функции тока. Это отличает предложенный подход от подхода к уравнениям в ранее проделанных работах с разработанными двумерными моделями бризовой циркуляции, где отмечается использование эволюционных уравнений движения для  $u$  и

$w$  компонент скорости. Однако двумерный случай предполагает бездивергентное движение, что позволяет перейти к терминам *вихрь скорости* и *функция тока* и приводит к использованию одного эволюционного уравнения вместо двух. С другой стороны, такая формулировка модели позволяет использовать численную реализацию на основе якобиана Аракавы.

Моделирование проводилось с целью продемонстрировать возможность использования в модели предложенного подхода, а также проанализировать особенности развития циркуляции и оценить полученные результаты интегрирований с разными температурными контрастами между поверхностью суши и моря.

### Описание численной модели

В работе использовалась разработанная двумерная негидростатическая модель. Несмотря на развитие вычислительной мощности, использование двумерных моделей не утратило научной актуальности, что показано на примере работы [2], выполненной коллективом Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Также в обширном обзоре исследований по изучению бризовой циркуляции на основе численных моделей [6] отмечается, что большинство из них проводилось с использованием двумерных гидростатических моделей. И хотя использование трехмерных моделей является важным для реалистичного моделирования турбулентности планетарного пограничного слоя, двумерное моделирование подходит для многих идеализированных моделей. Использование двумерной модели позволяет применять более мелкие пространственные шаги, что особенно актуально для бризовой циркуляции, которая является негидростатическим процессом. Поскольку максимальные значения скорости бризовой циркуляции наблюдаются на высоте до 10 м, а горизонтальные масштабы могут достигать десятков километров, целесообразно воспроизводить достаточно протяженную область с небольшим шагом по пространству.

Таким образом, в модели размер области интегрирования составляет  $100 \times 2$  км с шагом сетки  $\Delta x = 200$  м и  $\Delta z = 40$  м. Горизонтальная координата ( $x$ ) направлена перпендикулярно береговой линии, вдоль которой метеорологические переменные не имеют изменений, жидкость считается несжимаемой; вертикальная координата ( $z$ ) направлена вверх от поверхности. Для достижения наиболее оптимальной скорости вычислений шаг по времени является переменным и определяется из условия Куранта — Фридрихса — Леви. Воспроизведение эволюции бризовой циркуляции в модели выполняется путем численного решения уравнений движения для несжимаемой жидкости. Основными факторами, включенными в большинство исследований морского бриза, являются силы, возникающие за счет разности значений температуры поверхности моря и поверхности окружающей суши, вращения Земли и турбулентного переноса импульса и тепла. Принимая во внимание небольшие горизонтальные масштабы циркуляции ( $O[L] = 10^4$  м), влиянием силы Кориолиса можно пренебречь. Таким образом, основными процессами, которые оказывают влияние на бризовую циркуляцию, являются бароклинность и турбулентное трение.

Определяющую систему уравнений, используемую для воспроизведения бризовой циркуляции, составляют следующие уравнения:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = \frac{1}{\rho^2} J(P, \rho) - J(\Omega, \Psi) + F_{\text{турб}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -J(\Theta, \Psi) + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial \Theta}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $\Omega$  — вихрь скорости;  $\Psi$  — функция тока;  $\Theta$  — потенциальная температура воздуха;  $F_{\text{турб}}$  — турбулентное трение вихря скорости;  $J(P, \rho)$  — якобиан, описывающий бароклинность;  $J(\Omega, \Psi)$  — якобиан, описывающий адвекцию вихря;  $J(\Theta, \Psi)$  — якобиан, описывающий адвекцию потенциальной температуры.

Расчет давления осуществляется через уравнение движения для вертикальной компоненты скорости

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + J(w, \Psi) + g \right). \quad (3)$$

Также в систему добавляются уравнение состояния, уравнение Пуассона для потенциальной температуры и определение вихря через функцию тока:

$$P = \rho RT, \quad (4)$$

$$\theta = T \left( \frac{1000}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}}, \quad (5)$$

$$\nabla^2 \Psi = \Omega. \quad (6)$$

Соотношения, определяющие функцию тока, позволяют определить значения горизонтальной и вертикальной компонент скорости:

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad (7)$$

$$w = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}. \quad (8)$$

### Методология

Дифференциальные эволюционные уравнения интегрируются численно с использованием метода конечных разностей. К эволюционным уравнениям был применен метод расщепления по физическим процессам [10], и расчет турбулентных членов проводился отдельно от динамической части. Поскольку турбулентные члены в уравнении (1) имеют производную четвертого порядка, то был предложен следующий метод расчета. После вычисления значений функции тока и горизонтальной и вертикальной компонент ветра производится расчет

турбулентной диффузии горизонтальной компоненты скорости методом прогонки. Затем значения вихря рассчитывались с использованием выражения  $\Omega = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$  с  $u$  компонентами, полученными после турбулентной диффузии.

Для достижения вычислительной устойчивости была выбрана комбинация схем интегрирования по времени. Первый шаг рассчитывался с использованием схемы Эйлера первого порядка точности. Последующие шаги по времени рассчитывались с последовательным использованием трехуровневых схем второго порядка: центральных разностей и Адамса — Бэшфорта. Шаги по времени чередуются в таком порядке, что сначала вычисляются члены турбулентной диффузии с последующим использованием схемы центральных разностей для четного временного шага или с использованием схемы Адамса — Башфорта для нечетного временного шага.

Процессы, связанные с турбулентностью, учитываются посредством параметризации. При расчете коэффициента турбулентного обмена учитывается его зависимость от сдвига скорости и стратификации атмосферы, предложенная в [3]. Для определения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии использовался подход Смагоринского [17]. Решение уравнения (6) осуществлялось методом верхней релаксации. Атмосферное давление получается итерационным решением уравнения (3), в котором вертикальное ускорение, рассчитанное по значениям с соседних временных шагов, используется как дополнительное слагаемое в уравнении гидростатики.

Считается, что в начальный момент времени система находится в тепловом равновесии с начальной температурой  $\Theta = 280$  К. В дальнейшем изменения температуры поверхности суши были получены путем изменения значений амплитуды турбулентного потока тепла:

$$H(x,t) = A(x)\sin(w_z, t), \quad (9)$$

где  $A(x)$  — амплитуда турбулентного потока тепла как функция от пространства,  $t$  — продолжительность светового дня.

Температура поверхности моря считалась постоянной.

### Результаты численных экспериментов

С помощью разработанной модели были проведены численные эксперименты с температурными контрастами между максимальной температурой поверхности суши и поверхностью моря, равными 5, 10 и 15 °С. Разность температур была получена путем изменения амплитуды турбулентного потока тепла в формуле (9). В результате экспериментов были получены значения таких параметров, как температура воздуха и средние значения бризовой скорости. Визуализация результатов на рисунках представлена замкнутыми контурами функции тока и изотермами.

На рис. 1 изображена эволюция бризовой циркуляции для первого эксперимента с разностью температур 5 °С с дискретностью 2 часа.

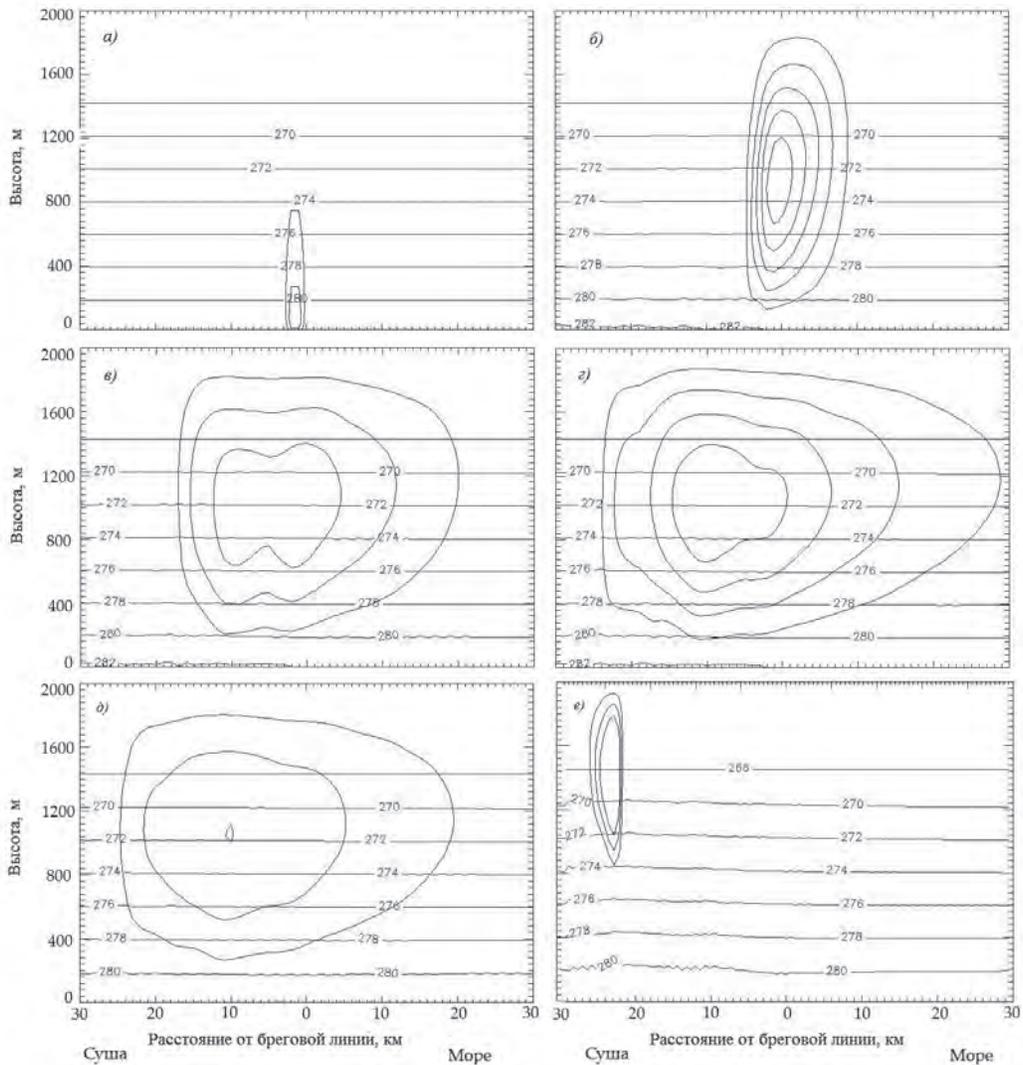


Рис. 1. Эволюция бризовой циркуляции по результатам первого эксперимента спустя 2 ч (а), 4 ч (б), 6 ч (в), 8 ч (г), 10 ч (д) и 12 ч (е) после начала вычислений.

Горизонтальные линии — изотермы (К).

Из рис. 1 видно, что первые 8 ч циркуляция увеличивается в горизонтальных масштабах, смещаясь в сторону суши, затем затухая.

На рис. 2 и 3 приводятся результаты для второго эксперимента через 4 и 8 ч после начала вычислений соответственно, а на рис. 4 и 5 — результаты для второго эксперимента в те же моменты времени. Помимо контуров функции тока и изотерм, на рисунках изображены векторы горизонтальной и вертикальной компонент скорости.

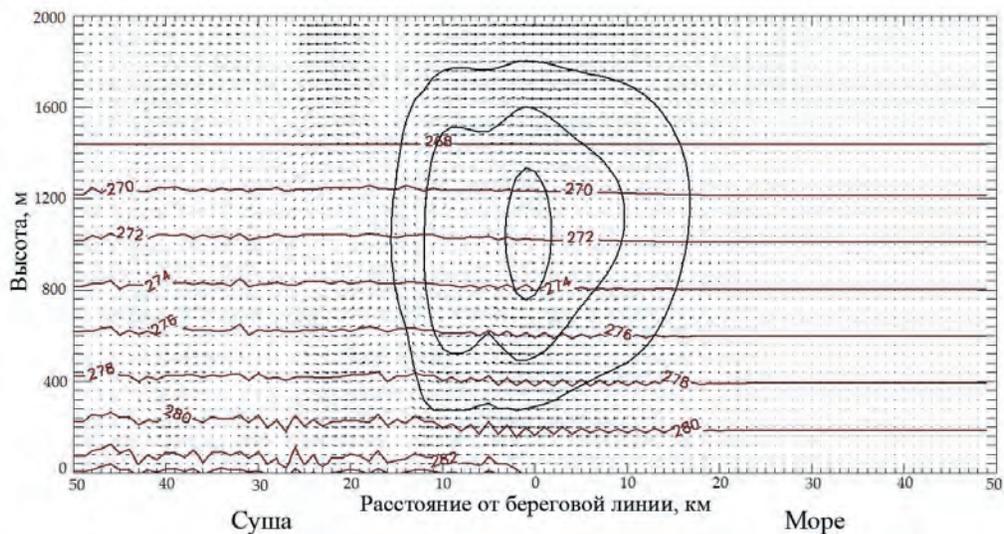


Рис. 2. Эволюция бризовой циркуляции по результатам второго эксперимента через 4 ч после начала вычислений.  
Горизонтальные линии — изотермы (К).

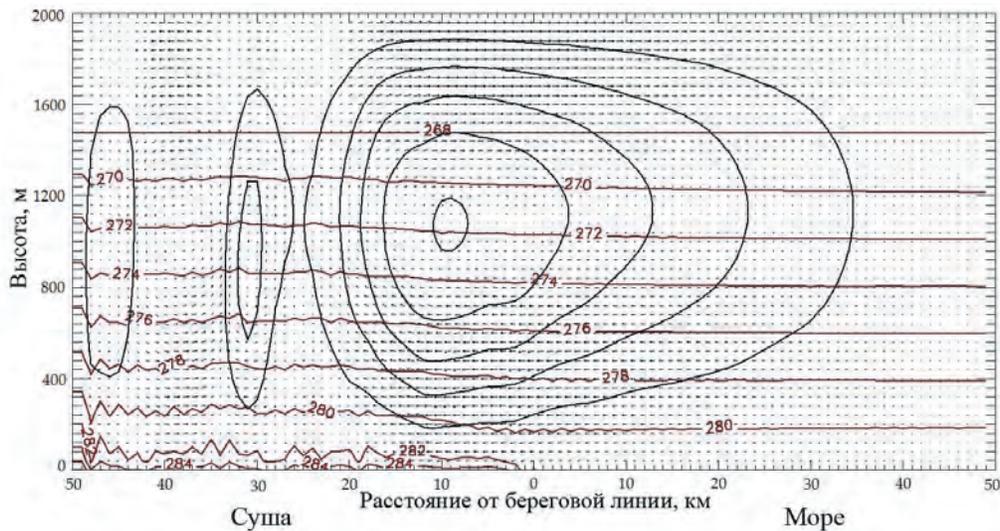


Рис. 3. Эволюция бризовой циркуляции по результатам второго эксперимента через 8 ч после начала вычислений.  
Горизонтальные линии — изотермы (К).

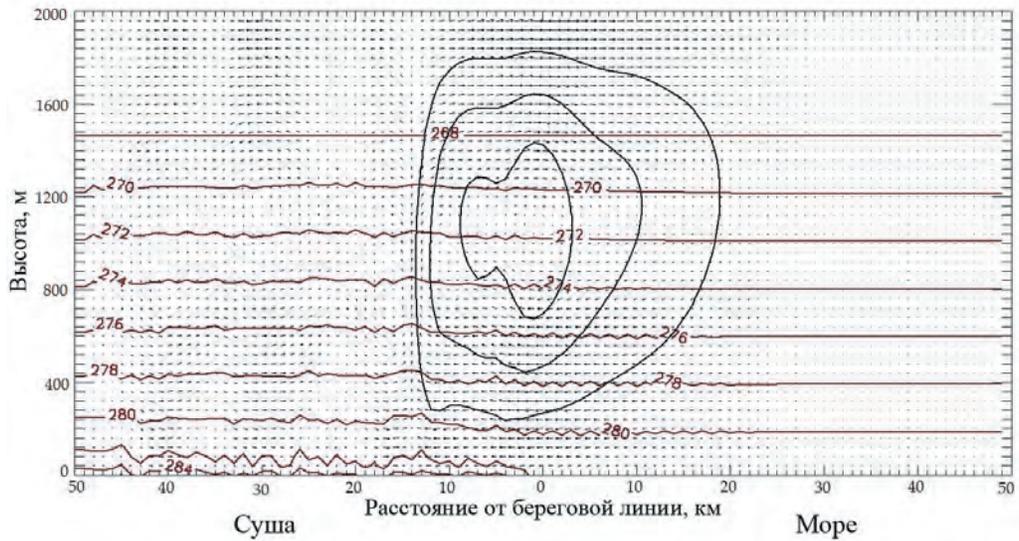


Рис. 4. Эволюция бризовой циркуляции по результатам третьего эксперимента через 4 ч после начала вычислений.

Горизонтальные линии — изотермы (К).

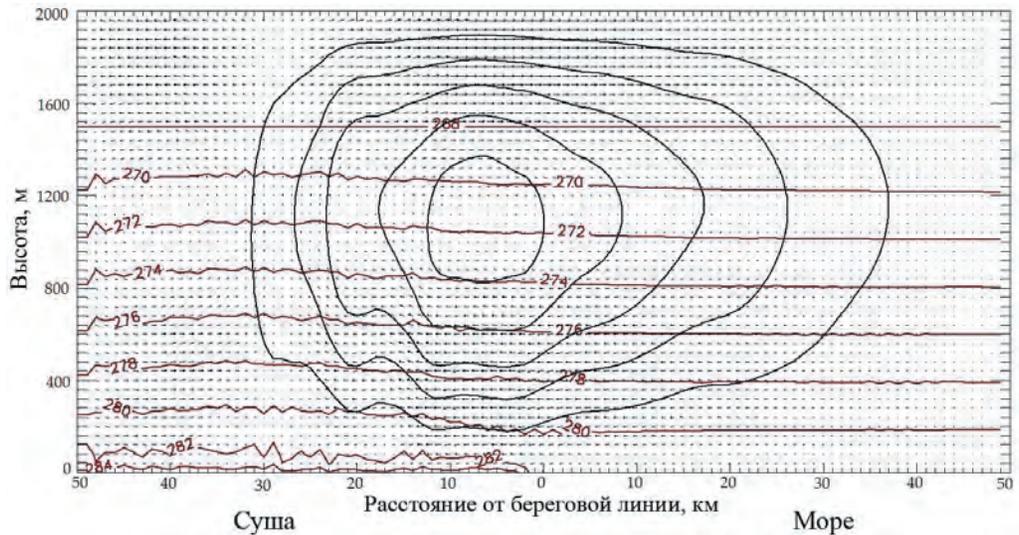


Рис. 5. Эволюция бризовой циркуляции по результатам третьего эксперимента через 8 ч после начала вычислений.

Горизонтальные линии — изотермы (К).

Расстояние, на которое распространяется бриз в глубь материка, также подвержено влиянию температурных контрастов. Как и ожидалось, наименьшее расстояние (около 25 км) наблюдается для первого эксперимента через 7 ч после начала расчетов. Для третьего эксперимента в это же время, напротив, наблюдается наибольшее расстояние, превышающее 30 км.

Некоторые особенности были отмечены в двух последних экспериментах. Во-первых, рассчитанные максимальные значения скорости ветра наблюдаются примерно на одной высоте — от 400 до 500 м. Во-вторых, контур нулевой скорости, который является границей между потоком на нижних уровнях и потоком на верхних уровнях, отмечается примерно на высоте 1100 м для обоих случаев.

Рассчитанные профили давления показали, что наиболее интенсивная циркуляция связана со значительными горизонтальными градиентами давления. Минимальным давление является в области самых сильных восходящих движений. В табл. 1 представлены результаты рассчитанных средних значений бризовой скорости и разности значений температуры поверхности суши и поверхности моря с дискретность 3 ч для каждого эксперимента.

Таблица 1

Рассчитанные значения разности температуры поверхности суши и поверхности моря ( $\Delta T$ ) и среднего значения скорости ветра ( $V$ ) за каждые 3 часа для трех экспериментов (I, II, III)

Время после начала вычислений, ч	$\Delta T, ^\circ\text{C}$			$V, \text{ м/с}$		
	I	II	III	I	II	III
3	1,1	2,7	3,5	1—2	1—2	2—3
6	1,9	4,7	6,1	1—2	3—5	4—6
9	3,1	7,3	9,4	2—4	5—7	4—6
12	4,2	10,1	12,5	4—6	7—9	7—9
15	5,2	8,4	15,1	5—7	6—8	9—11
18	2,9	5,9	11,1	3—5	6—8	8—10
21	1,8	3,3	7,9	2—3	3—5	7—8
24	0,9	2,8	4,6	2—3	3—4	3—4

Максимальные значения в каждом из случаев отмечаются в моменты времени, когда контраст температуры также был максимальным.

### Выводы

Проведенные численные эксперименты свидетельствуют о том, что разработанная мезомасштабная модель дает достоверное описание пространственно-временных характеристик бризовой циркуляции. Показано заметное влияние температурного контраста на интенсивность развития и метеорологические характеристики циркуляции. Тенденция развития бризовой циркуляции имеет схожие закономерности во всех трех экспериментах.

Стоит отметить, что горизонтальные масштабы циркуляции не рассчитывались напрямую, а оценивались по полученным иллюстрациям замкнутых

контуров. Таким образом, значения, представленные в исследовании, следует рассматривать как приближительные, но результаты отчетливо указывают на увеличение расстояния распространения бриза на сушу с увеличением разности температуры поверхности суши и поверхности моря.

Проведенные эксперименты указывают на то, что увеличение максимальных значений скорости бриза от случая к случаю было связано с тем, как изменяется температура поверхности суши. Такой отклик демонстрирует, что взаимодействие между термически вызванным возмущением и максимальными значениями скорости бриза можно считать линейным. Анализ данных показывает, что изменения направления ветра происходили практически одновременно во всех точках наблюдения сразу после начала вычислительного процесса.

Таким образом, разработанная модель может быть использована для изучения основных характеристик бризовой циркуляции и особенностей ее развития. В дальнейшем более тщательный подход к описанию основных физических особенностей (например, турбулентной диффузии влаги) циркуляции морского бриза и учет характеристик береговой линии и синоптической ситуации, а именно направления и скорости крупномасштабного потока, позволит использовать модель для изучения характеристик циркуляции бриза в конкретном регионе.

*В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных в рамках государственной программы № 0149–2019–0015.*

### Список литературы

1. Ефимов В.В., Барабанов В.С., Крутин А.В. Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 1. С. 64—74.
2. Надежина Е.Д., Школьник И.М., Стернзат А.В., Егоров Б.Н., Пикалева А.А. Испарение с орошенных участков в аридных регионах по оценкам системы моделей регионального климата и пограничного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 87—97.
3. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Соколов А.П. Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана ГГО // Труды ГГО. 1997. Вып. 544. С. 3—123.
4. Antonelli M., Rotunno R. Large-eddy simulation of the onset of the sea breeze // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. P. 4445—4457.
5. Benlefski A., Douaiba B., Abbes A. A sea breeze numerical simulation and circulation analysis in oran, algeria, urban atmosphere // J Urban and Environ. Engineering. 2015. No. 9. P. 139—145.
6. Crosman E.T., Horel J.D. Sea and lake breezes: a review of numerical studies // Boundary-Layer Meteorology. 2010. V. 137. P. 1—29.
7. Ефимов В.В. Numerical simulation of breeze circulation over the Crimean peninsula // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. V. 53. P. 95—106.
8. Estoque M.A. The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation // J. Atmos. Sci. 1962. V. 19. P. 244—250.
9. Freitas E.D., Rozoff C.M., Cotton W.M., Silva Dias P.L. Interactions of an urban heat island and sea breeze circulations during winter over the metropolitan area of Sao Paulo, Brazil // Boundary-Layer Meteorol. 2007. V. 122. P. 43—65.
10. Marchuk G.I., Splitting-up methods for solving non-stationary problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1995. V. 35. P. 843—849.
11. Novitsky M., Reible D., Corripio B. Modeling the dynamics of the land-sea breeze circulation for air quality modeling // Boundary-Layer Meteorol. 1992. V. 59. P. 163—175.

12. *Ogawa S., Sha W., Iwasaki T.* A numerical study of the interaction of a sea-breeze front with convective cells in the daytime boundary layer // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2003. V. 81. P. 635—651.
13. *Pearce R. P.* The calculation a sea breeze circulation in terms of the differential heating across the coastline // *Q.J. Roy. Meteorol. Soc.* 1955. V. 81. P. 351—381.
14. *Robinson F.J., Patterson M.D., Sherwood S.C.* A numerical modeling study of the propagation of idealized sea-breeze density currents // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70 . P. 653—668.
15. *Ries H, Schlunzen K.H.* Evaluation of a mesoscale model with different surface parameterizations and vertical resolutions for the bay of Valencia // *Mon. Wea. Rev.* 2009. V. 137. P. 2646—2661.
16. *Savijarvi H., Matthews S.* Flow over small heat islands: a numerical sensitivity study // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 61. P. 859—868.
17. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations // *Mon. Wea. Rev.* 1963. V. 91. P. 99—164.
18. *Talbot C., Augustin P., Leroy C., Willart V., Delbarre H., Khomenko G.* Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the North Sea // *Boundary-Layer Meteorol.* 2007. V. 125. P. 133—154.
19. *Thompson W.T., Holt T., Pullen J.* Investigation of a sea breeze front in an urban environment // *Q.J. Roy. Meteorol. Soc.* 2007. V. 133. P. 579—594.
20. *Tian Y., Miao J.* A Numerical Study of Mountain-Plain Breeze Circulation in Eastern Chengdu, China // *Sustainability.* 2019. No. 10. P. 1—20.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕТНИХ ЦЕНТРОВ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ДАЛЬНИМ ВОСТОКОМ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭКСТРЕМУМЫ В ПЕРИОД 1980—2017 гг.

*Т.А. Шатилина<sup>1</sup>, Г.Ш. Цициашвили<sup>2</sup>, Т.В. Радченкова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО», tatyana.shatilina@tinro-center.ru

<sup>2</sup> Институт прикладной математики ИПМ ДВО РАН

Уточненными методами статистики для временных рядов параметров, характеризующих центры действия атмосферы, температуру воздуха и воды, проведена оценка значимости тренда и выявлены доминирующие циклы. Значимые тренды наблюдались в средней тропосфере в районе южно-азиатского и гавайского антициклонов для геопотенциала  $H_{500}$ , а также для термических характеристик во всех центрах действия атмосферы. Показано, что экстремальная циркуляция над Дальним Востоком является причиной появления экстремумов в распределении температуры воды на поверхности северо-западной части Тихого океана и Японского моря. Установлено, что в области азиатской депрессии доминирующими циклами являются 10- и 5-летний циклы, а в области гавайского антициклона — 6- и 7-летние циклы.

*Ключевые слова:* центры действия атмосферы, значимость тренда, доминирующие циклы, экстремумы.

## FEATURES OF THE SUMMER ATMOSPHERIC FORCE CENTERS VARIABILITY OVER THE FAR EAST AND CLIMATIC EXTREMES IN THE PERIOD 1980—2017

*T.A. Shatilina<sup>1</sup>, G.Sh. Tsitsiashvil<sup>2</sup>, T.V. Radchenkova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Research institute of fisheries and oceanography, VNIRO, pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia

Trend significance has been assessed by improved statistical methods for time series of parameters characterizing the atmospheric force centers, air and water temperatures, and dominant cycles have been revealed. Significant trends were observed in the middle of troposphere in the South Asian and Hawaiian anticyclones for the  $H_{500}$  geopotential, as well as for thermal characteristics in all centers of the atmosphere. The research results show that extreme circulation over the Far East causes the appearance of extremes in the water temperature distribution on the surface of northwest part of Pacific Ocean and the Japan Sea. It has been established that 10- and 5- year cycles are dominant in the area of Asian depression. In the area of Hawaiian anticyclone 6- and 7-year cycles dominate.

*Keywords:* atmospheric force centers, trend significance, dominant cycles, extremes.

### Введение

Региональные исследования атмосферной циркуляции являются необходимыми фрагментами при построении общей картины климатических изменений в Северном полушарии. К числу индикаторов состояния климатической системы

относятся интенсивность и положение климатических центров действия атмосферы (преобладание циклонических систем в одних районах и антициклонов в других). Смещение центров и вариации их интенсивности влияют на распределение планетарных воздушных течений и отражаются в изменении климата. Их изучению посвящен ряд работ [2, 3, 6, 7, 9].

В настоящей работе проводится анализ изменчивости климатических центров действия атмосферы (ЦДА), расположенных над вторым естественным синоптическим районом (2-й е.с.р.) Северного полушария. Естественный синоптический район – это значительная часть полушария, относительно которой предполагается, что синоптические процессы там обладают определенной обособленностью и могут изучаться независимо от процессов в других частях Земли. Он характеризуется таким термобарическим полем в тропосфере, которое обуславливает сохранение в течение нескольких дней данного развития синоптических процессов. В Северном полушарии севернее параллели 30° различают три е.с.р.: от Гренландии до Таймыра, от Таймыра до Берингова пролива (2-й е.с.р.) и от Берингова пролива до Гренландии [13]. Границы 2-го е.с.р. показаны на рис. 1. На этом рисунке также показано географическое положение ЦДА. Кратко опишем их.

**Летняя дальневосточная депрессия (ЛДД)** располагается над северо-восточным Китаем и примыкающими к нему районами Приамурья и Монголии. ЛДД представляет собой климатически достаточно устойчивое барическое образование теплого полугодия, что следует из многолетних карт давления на уровне моря. Взаимодействие летней дальневосточной депрессии с тихоокеанским и охотским антициклонами способствует интенсивному переносу воздушных масс с океана на континент и установлению летнего муссона над дальневосточными районами.

**Охотский антициклон (ОА).** В период май — август над Охотским морем часто наблюдаются области высокого давления. В формировании летней погоды на Дальнем Востоке роль области высокого давления над Охотским морем и прилегающими к нему районами является определяющей. Этот региональный летний центр действия атмосферы оказывает существенное влияние на термический режим Курильского района [14].

**Азиатская депрессия (АД)** — обширная область пониженного давления, располагающаяся летом над Азией. Она связана с формированием летнего дальневосточного муссона. Вариации интенсивности азиатской депрессии влияют на распределение планетарных воздушных течений и отражаются в изменении климатического режима.

**Гавайский антициклон (ГА)** — субтропический антициклон, или область высокого атмосферного давления в районе Гавайских островов. Эта зона выделяется на среднегодовых климатических картах для тропической акватории северной части Тихого океана и является результатом преобладания в этом районе обширных и интенсивных, теплых и высоких малоподвижных антициклонов.

На Дальнем Востоке экстремальные гидрометеорологические явления наблюдаются достаточно часто. Роль флуктуаций этих параметров возрастает, особенно в региональных центрах атмосферной циркуляции, на достаточно ограниченных территориях. Анализ коротких временных рядов с флуктуациями повышает

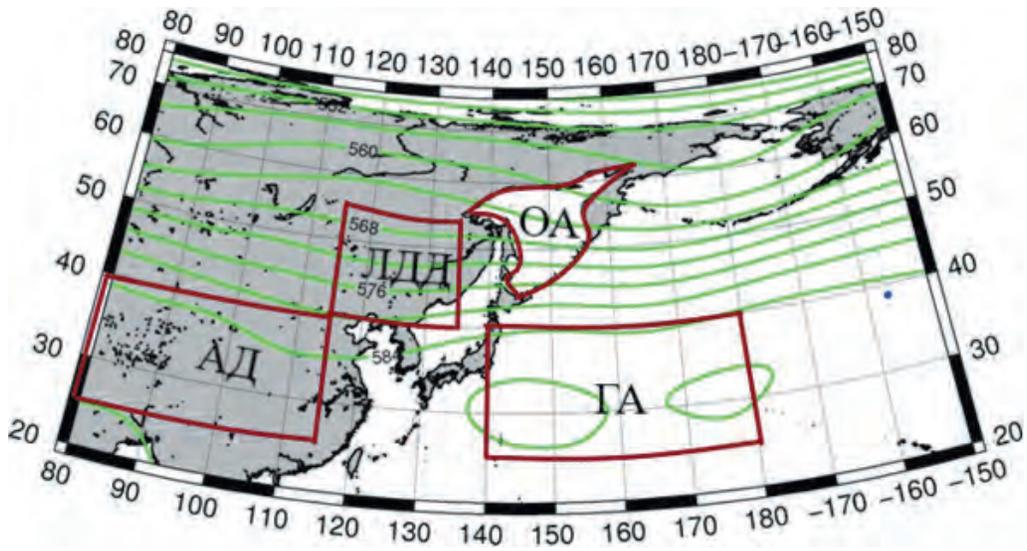


Рис. 1. Среднемесячное поле геопотенциала  $H_{500}$  в июле (<http://ferhri.org/>) и расположение летних центров действия атмосферы.

ОА — охотский антициклон, ЛДД — летняя дальневосточная депрессия, АД — азиатская депрессия, ГА — гавайский антициклон.

требования к оценке параметров внешней среды, сопровождающих эти явления. Это приводит к необходимости разработки специальных методов обработки данных, основанных на учете критических параметров: анализ флуктуаций на фоне тренда, уточнение коэффициентов Фурье временного ряда с дискретными моментами времени.

Цель работы — выявить особенности изменчивости метеорологических параметров (приземных значений давления и температуры воздуха, а также геопотенциала  $H_{500}$ ), характеризующих региональные центры действия атмосферы (ЦДА) над Дальним Востоком в летний период 1980—2017 гг., и дать оценку изменчивости уточненными методами математической статистики. Особое внимание уделяется экстремумам циркуляции атмосферы, температуры воздуха и воды в промысловых районах Японского моря и северо-западной части Тихого океана.

### Методика исследования

Основными данными для расчета режимных характеристик летних ЦДА послужили архивы реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables) атмосферного давления  $P_0$ , геопотенциала  $H_{500}$  и температуры воздуха  $T_a$  в узлах регулярной сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  за период с 1980 по 2017 г. Данные о температуре воздуха были получены на ГМС Японии: Суттсу (Suttsu) ( $42^\circ 47,7'$  с.ш.,  $140^\circ 13,4'$  в.д.); Абасири (Abashiri) ( $44^\circ 01,0'$  с.ш.,  $144^\circ 16,7'$  в.д.);

Немуро (Nemuro) (43°19,8' с.ш., 145°35,1' в.д.) и Токио (Tokyo) (35°41,5' с.ш., 139°45,0' в.д.) и размещены на сайте [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly\\_s3\\_en.php?block\\_no=47421&view=1](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3_en.php?block_no=47421&view=1).

Источником информации о температуре воды на поверхности океана (ТПО) послужил архив Японского метеорологического агентства ([https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly\\_s3\\_en.php?block\\_no=47421&view=1](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3_en.php?block_no=47421&view=1)), содержащий среднемесячные данные на одноградусной сетке за 1980—2017 гг. Средние многолетние значения и среднеквадратические отклонения от них для используемых в работе параметров рассчитаны за базовый период 1981—2010 гг.

Анализ изменчивости температуры поверхности воды проводился к юго-востоку от о. Хоккайдо (39—42° с.ш., 142—146° в.д.), на траверзе пролива Лаперуза (45—48° с.ш., 140—142° в.д.), в области Цусимского течения (37°30'—39°30' с.ш., 135°30'—139°30' в.д.) и в области вод, примыкающих к побережью западной части о. Хоккайдо (41—45° с.ш., 137—140° в.д.).

Для анализа изменчивости режима летних дальневосточной депрессии и охотского антициклона, а также азиатской депрессии и гавайского антициклона рассчитывались среднемесячные значения давления на уровне моря  $P_0$ , геопотенциала  $H_{500}$  на изобарической поверхности 500 гПа и приземной температуры воздуха  $T_a$  над ЦДА. Были получены значения параметров для периода июнь — август (период наиболее интенсивного развития летних ЦДА).

При анализе региональных временных рядов климатических параметров обнаруживаются значительные флуктуации для локальных территорий, что требует уточнения оценок тренда. Параметры флуктуаций во многих исследованиях не учитываются, а их учет необходим для процедур сравнения трендов в разных районах наблюдений.

Анализ таких данных требует более высокого качества применяемых алгоритмов обработки: точности, быстродействия и т. д. Такие требования обычно предъявляются к качеству промышленной продукции [11] и предполагают максимально возможное улучшение используемых методов на каждом этапе.

В нашем случае особый интерес представляют задачи оценки коэффициентов линейной регрессии и показателя обеспеченности тренда. Этот показатель требует знания как коэффициентов регрессии, так и дисперсии флуктуации.

Пусть дан временной ряд  $y_t = at + b + \varepsilon_t$ ;  $t = 1, \dots, n$ ;  $M\varepsilon_t = 0$ ;  $D\varepsilon_t = \sigma^2$ . Методом линейного регрессионного анализа строятся оценки  $\hat{a}, \hat{b}$  коэффициентов линейного тренда  $a, b$  и по ним оценивается дисперсия  $\sigma^2$  случайной добавки  $\varepsilon_t$ . Наилучший способ оценки дисперсии  $\varepsilon_t$  приведен в монографии [4], где построена остаточная дисперсия

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{a}t - \hat{b})^2.$$

Эта оценка является несмещенной:  $M\hat{\sigma}^2 = \sigma^2$ , и если случайные величины  $\varepsilon_t$  имеют нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ , то

случайная величина  $\frac{\hat{\sigma}^2(n-2)}{\sigma^2}$  имеет распределение хи-квадрат с  $n-2$  степенями

свободы. Тогда величина  $\frac{\hat{a}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}$  будет оценкой обеспеченности тренда  $\frac{a}{\sigma}$  и

будет характеризовать роль флуктуаций во временном ряду на фоне тренда.

Пусть флуктуации имеют нормальное распределение и выполняется соотношение  $n \geq 30$ . Тогда при выполнении неравенства  $\left| \frac{\hat{a}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} \right| \leq 0,04$  принимается ги-

потеза об отсутствии тренда; в противном случае принимается гипотеза о наличии значимого тренда. Вероятность ошибочно отклонить гипотезу об отсутствии тренда приблизительно равна 0,05 [15]. В предположении о нормальности распределения флуктуаций при выполнении гипотезы об отсутствии тренда статистика

$\frac{\hat{a}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}$  имеет распределение Стьюдента с  $n-2$  степенями свободы, что позволяет

при  $n \geq 30$  проверять данную гипотезу с вероятностью 0,05 ошибочно ее отклонить.

При наличии больших флуктуаций во временном ряду появляется необходимость представлять его в виде ряда Фурье, оценивать коэффициенты Фурье и строить прогноз временного ряда на ближайшие моменты времени. Эта процедура обычно производится оценкой коэффициентов Фурье разности  $y_t - (\hat{a}t + \hat{b})$ , со-

державшей ошибки определения коэффициентов регрессии  $\hat{a}, \hat{b}$ . В результате качество таких оценок падает, а сами оценки вызывают недовольство пользователей. Чтобы избежать этого, предлагается заменить ряд  $y_t, t=1, \dots, n+1$  на ряд последовательных разностей:  $z_t = y_{t+1} - y_t, t=1, \dots, n$ .

Оценка коэффициентов Фурье временного ряда с линейным трендом

$$y_t = at + b + \sum_{k=1}^n a_k \exp\left(\frac{2\pi ikt}{n}\right), \quad t=1, \dots, n+1,$$

производится следующим образом. Пусть известны  $z_t = y_{t+1} - y_t, t=1, \dots, n$ , тогда

$$z_t = \sum_{k=1}^n b_k \exp\left(\frac{2\pi ikt}{n}\right), \quad t=1, \dots, n,$$

где

$$b_k = a_k \left( \exp\left(\frac{2\pi ik}{n}\right) - 1 \right), \quad k=1, \dots, n-1, \quad b_n = a.$$

Вычислив по ряду  $z_t$ ,  $t = 1, \dots, n$ , методом быстрого дискретного преобразования Фурье [18] коэффициенты  $b_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ , нетрудно определить  $a_k$ ,  $a$ , используя равенства

$$a_k = \frac{b_k}{\exp(2\pi i k/n) - 1}, \quad k = 1, \dots, n-1, \quad a = b_n.$$

## Оценка обеспеченности тренда в ЦДА

### *Азиатская и летняя дальневосточная депрессии*

На рис. 2 представлена многолетняя изменчивость параметров, характеризующих интенсивность циркуляции в азиатской депрессии (АД) и летней дальневосточной депрессии (ЛДД) (расположенных над континентальными районами Восточной Азии) в июле (центральном месяце летнего сезона), за период 1980—2017 гг.

Значимые тренды в июле 1980—2017 гг. отмечались в средней тропосфере в районе АД (рис. 2 *а*) (обеспеченность тренда равна 0,04). Это означает усиление влияния южного субтропического антициклона над 2-м е.с.р., что было отмечено в работе [16]. Значимые тренды отмечались для обеих депрессий для приземной температуры воздуха (0,05 и 0,07) (рис. 2 *в*, *е*). Видимо, формирование теплых воздушных масс в районе АД и ЛДД было обусловлено усилением субтропических антициклонов в восточных регионах Азии. Так, максимальные значения температуры воздуха в районе АД и ЛДД отмечаются в 2010 и 2017 гг. и совпадают по времени с максимальными значениями геопотенциала  $H_{500}$  в АД. В приземном поле (рис. 2 *б*, *д*) значимых трендов не наблюдалось.

### *Гавайский и охотский антициклоны*

На рис. 3 представлена многолетняя изменчивость аномалий геопотенциала  $H_{500}$ , приземного давления  $P_0$  и температуры воздуха  $T_a$  в области гавайского (ГА) и в охотского (ОА) антициклонов в июле 1980—2017 гг.

Из рис. 3 видно, что в июле 1980—2017 гг. давление в области гавайского антициклона (в пределах 2-го е.с.р.) растет, значимость тренда составляет 0,05 (рис. 3 *а*). У поверхности Земли в области ГА усиливаются флуктуации, и тренд незначим (рис. 3 *б*). Средняя температура воздуха в области ГА в последний период имеет тенденцию к повышению, но тренд незначим (рис. 3 *в*).

В области ОА тенденция изменчивости аномалий  $H_{500}$  напоминает изменчивость в области ГА, но здесь тренд незначим, так как увеличивается повторяемость экстремальных значений геопотенциала  $H_{500}$  (рис. 3 *г*).

В приземном поле в области ОА отмечается тенденция к ослаблению интенсивности ОА, но тренд незначим (рис. 3 *д*). Однако наблюдается интенсивное повышение средней температуры воздуха над акваторией Охотского моря, значимость тренда достигает 0,07 (рис. 3 *е*).

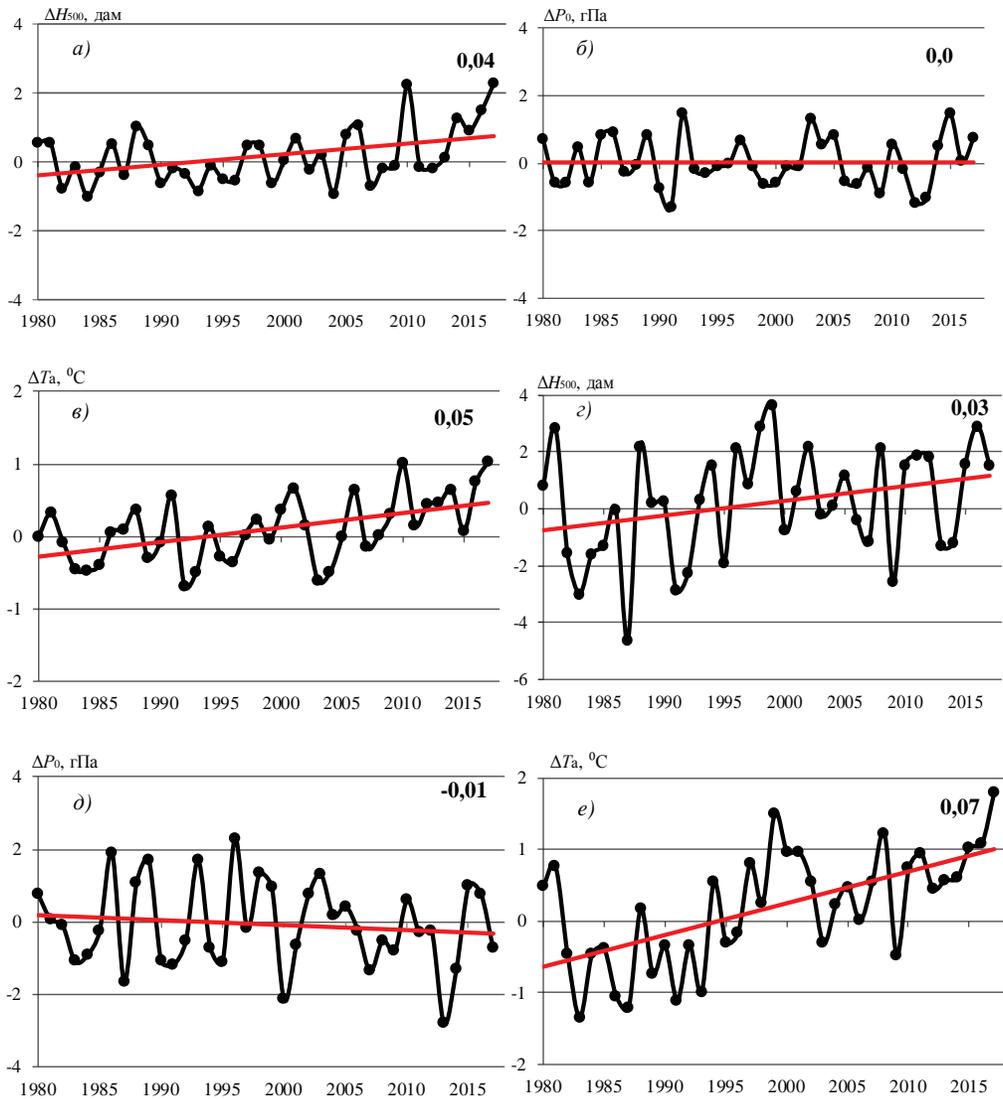


Рис. 2. Многолетняя изменчивость аномалий геопотенциала  $H_{500}$ , приземного давления  $P_0$  и температуры воздуха  $T_a$  в июле 1980—2017 гг. в области азиатской депрессии и летней дальневосточной депрессии: аномалии  $H_{500}$  (а), аномалии  $P_0$  (б) и аномалии  $T_a$  (в) в области АД, аномалии  $H_{500}$  (з), аномалии  $P_0$  (д), аномалии  $T_a$  (е) в области ЛДД.

Цифрами на поле рисунков указана обеспеченность тренда.

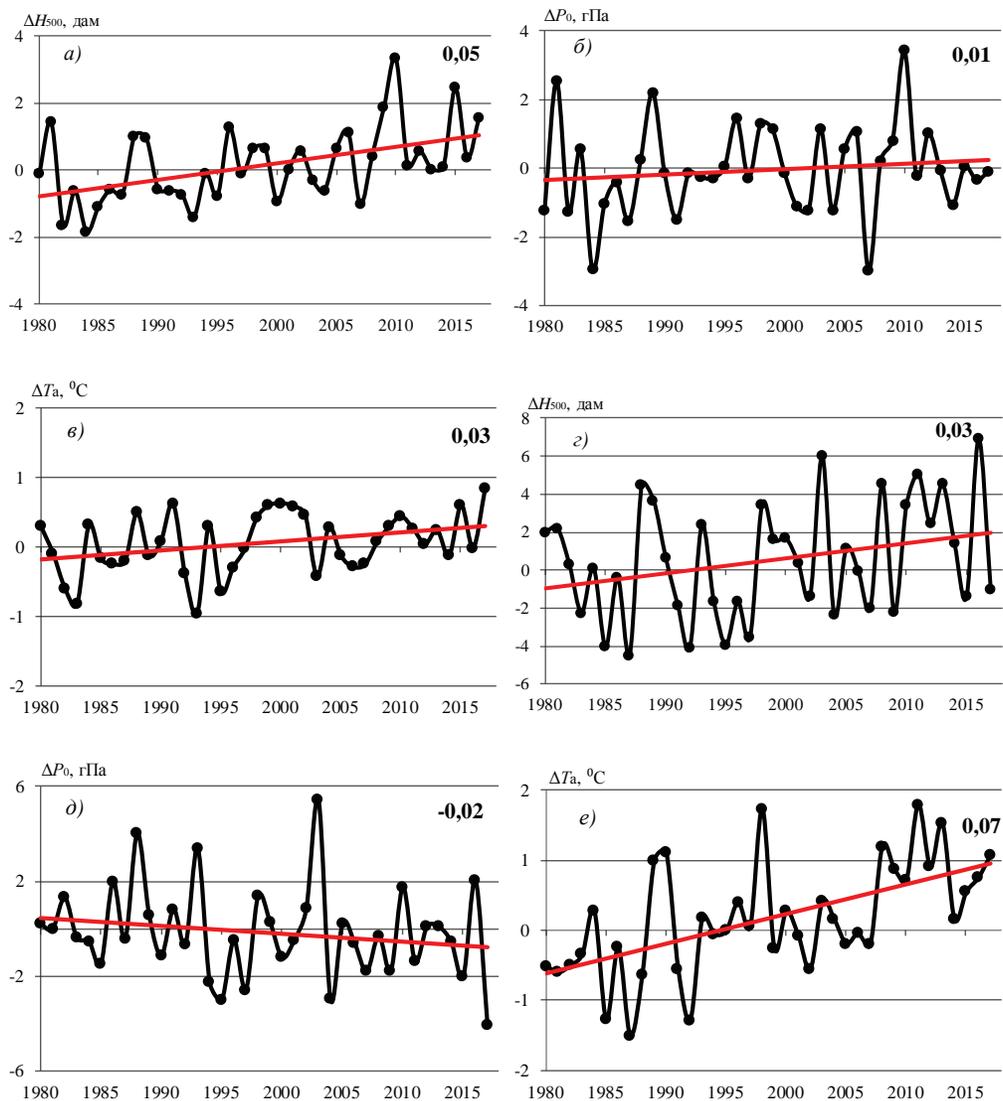


Рис. 3. Многолетняя изменчивость аномалий геопотенциала  $H_{500}$ , приземного давления  $P_0$  и температуры воздуха  $T_a$  в июле 1980—2017 гг. в области гавайского антициклона и области охотского антициклона: аномалии  $H_{500}$  (а), аномалии  $P_0$  (б) и аномалии  $T_a$  (в) в области ГА; аномалии  $H_{500}$  (г), аномалии  $P_0$  (д) и аномалии  $T_a$  (е) в области ОА.

Цифрами на поле рисунков указана обеспеченность тренда.

## Экстремальные параметры циркуляции атмосферы

### *Азиатская и летняя дальневосточная депрессии*

В последнее время уделяется большое внимание экстремальным явлениям и механизмам их влияния на термический режим водной поверхности. В табл. 1 представлены годы с экстремальными значениями параметров циркуляции, характеризующих АД и ЛДД в июне — августе (весь летний период). Экстремальные годы определялись путем анализа графиков многолетних изменений параметров экспертным способом как визуально наиболее отклоняющиеся от оси абсцисс. Экстремальные годы удовлетворяли следующим условиям:  $-0,9 \text{ гПа} \leq H_{500} \geq 1 \text{ гПа}$  в районе АД,  $-3 \text{ гПа} \leq H_{500} \geq 2,5 \text{ гПа}$  в районе ЛДД,  $-0,9 \text{ гПа} \leq P_0 \geq 1 \text{ гПа}$  в районе АД,  $-2 \text{ гПа} \leq P_0 \geq 2 \text{ гПа}$  в районе ЛДД.

Таблица 1

Годы с экстремальными значениями геопотенциала  $H_{500}$  и приземного давления  $P_0$  в области азиатской депрессии и летней дальневосточной депрессии в 1980—2017 гг.

ЦДА	Июнь		Июль		Август	
	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$
АД	<b>1980</b>	<b>1980</b>	1984	1991	1981	1981
	1985	<b>1983</b>	<b>1988</b>	<b>1992</b>	2000	1985
	<b>1998</b>	1984	2004	<b>2003</b>	2005	1988
	2003	1985	<b>2006</b>	2009	<b>2006</b>	<b>1998</b>
	2012	1986	<b>2010</b>	2012	<b>2010</b>	2005
	<b>2013</b>	<b>1996</b>	<b>2014</b>	2013	<b>2016</b>	2007
	<b>2016</b>	<b>2004</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>		2013
		2009	<b>2017</b>			
		2012				
		<b>2016</b>				
ЛДД	1983	2005	<b>1981</b>	<b>1996</b>	1981	<b>1980</b>
	<b>1986</b>	<b>2008</b>	1983	2000	<b>1988</b>	1981
	<b>2004</b>	2009	1987	2013	<b>1991</b>	2013
	<b>2007</b>		<b>1998</b>		<b>2000</b>	
	<b>2008</b>		<b>1999</b>		<b>2001</b>	
	2009		<b>2016</b>		2003	
	<b>2010</b>				<b>2015</b>	
<b>2014</b>						

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены годы с экстремально высокими значениями геопотенциала  $H_{500}$  и приземного давления  $P_0$ .

Из таблицы видно, что в области АД в июне экстремально высокими значениями  $H_{500}$  отличались 1980, 1998, 2013 и 2016 гг.; при этом экстремально высокие значения  $P_0$  наблюдались в 1983, 1996 и 2004 гг. (совпадают экстремумы в 1980 и 2016 гг.), а экстремально низкие значения — в 1985, 2003 и 2012 гг.

В июле в АД экстремально высокие значения  $H_{500}$  наблюдались в 1988, 2006, 2010, 2014, 2016 и 2017 гг., а низкие — в 1984 и 2004 гг. Для  $P_0$  экстремально высокие значения наблюдались в 1992, 2003, 2015 гг., а экстремально низкие значения — в 1991, 2009, 2012, 2013 гг. В августе в области АД экстремально низкие значения  $H_{500}$  отмечались в 1981, 2000, 2005 гг., а в 2006, 2010, 2016 гг. — экстремально высокие значения.

В области ЛДД в средней тропосфере максимумы  $H_{500}$  отмечались в июне в 1986, 2004, 2007, 2008, 2010 и 2014 гг., в июле в 1981, 1998, 1999 и 2016 гг. и в августе в 1988, 1991, 2000, 2001 и 2015 гг.

Минимумы  $H_{500}$  в области ЛДД в средней тропосфере отмечались в июне в 1983 и 2009 гг., в июле в 1983 и 1987 гг., в августе в 1981 и 2003 гг. Надо заметить, что повторяемость максимумов в области летней депрессии за весь летний период была больше, чем минимальных значений. В поле  $P_0$  в области летней дальневосточной депрессии экстремально низкие значения наблюдались в июле и августе 2005, 2009 и 2013 гг. Углубление депрессии (экстремально низкие значения  $P_0$ ) в 2013 г. было одной из причин наводнения на Амуре.

В июне в области АД максимум приземного давления и геопотенциала  $H_{500}$  совпадают в 1980 г. А в области ЛДД максимум в поле  $P_0$  в 1980 г. отмечается со сдвигом два месяца (в августе). Максимум в поле  $H_{500}$  в июне 1998 г. в области АД повторяется через месяц в области ЛДД в июле. Максимум в поле  $H_{500}$  в июне 2016 г. в области АД повторяется в области ЛДД в июле. Таким образом, для некоторых лет наблюдается сдвиг максимумов на один-два месяца, что может иметь прогностическую значимость.

### *Гавайский и охотский антициклоны*

В табл. 2 представлены годы с экстремальными значениями  $H_{500}$  и  $P_0$  в области ГА и ОА. В качестве критериев для выбора экстремальных лет использовались следующие значения:  $3 \text{ гПа} \leq H_{500} \leq 4 \text{ гПа}$  в районе ОА,  $-1,9 \text{ гПа} \leq H_{500} \leq 2 \text{ гПа}$  в районе ГА,  $-2,7 \text{ гПа} \leq P_0 \leq 4 \text{ гПа}$  в районе ОА,  $-1,6 \text{ гПа} \leq P_0 \leq 2 \text{ гПа}$  в районе ГА.

Гавайский антициклон был интенсивным (максимальные значения  $H_{500}$  и  $P_0$ ) в июне в 1980, 1982, 2004, 2010 и 2015 гг., в июле в 2010 и 2015 гг., в августе в 2003, 2010 и 2014 гг. Экстремальное ослабление ГА (минимальные значения  $H_{500}$  и  $P_0$ ) наблюдалось в июне 1983, 1993 и 2009 гг.

В районе охотского антициклона в поле приземного давления  $P_0$  максимумы обнаружены в июне в 1981, 1983 и 1989 гг., в июле в 1988 и 2003, в августе в 1980, 2002 гг. Таким образом, в эти годы охотский антициклона был наиболее активен. О его влиянии на климатические аномалии Курило-Хоккайдского района было указано в работе [17].

Для ГА и ОА в июне, июле и августе максимальные значения параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  не совпадают. В то же время, максимумы в июне 1980, 2010, 2015 гг. в области ГА совпадают с максимумами в области АД. Таким образом, центры, расположенные в субтропической зоне Тихого океана, имеют взаимное влияние.

Таблица 2

Годы с экстремальными значениями  $H_{500}$  и  $P_0$   
в районе охотского и гавайского антициклонов в летний период 1980—2017 гг.

ЦДА	Июнь		Июль		Август	
	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$	$H_{500}$	$P_0$
ГА	<b>1980</b>	<b>1980</b>	1982	<b>1981</b>	1984	1984
	<b>1982</b>	1991	1984	1984	1986	1986
	1983	2001	1993	<b>1989</b>	1996	1991
	1993	2009	<b>2010</b>	2007	<b>2003</b>	<b>1998</b>
	<b>2004</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2010</b>	2004	<b>2010</b>
	2009	2012			<b>2010</b>	2015
	<b>2010</b>	2014			2014	
	2015					
ОА	1982	<b>1981</b>	1985	<b>1988</b>	1984	<b>1980</b>
	1985	1982	1987	1995	1986	1990
	<b>1989</b>	<b>1983</b>	<b>1988</b>	<b>2003</b>	1996	<b>2002</b>
	<b>1998</b>	<b>1989</b>	1992	2004	2004	2007
	2001	2001	1995	2017	<b>2006</b>	2010
	2004	2003	1997		2012	
	2005	2005	<b>2003</b>		2015	
	<b>2009</b>	2011	<b>2008</b>		2016	
	2011		2011			

Примечание. Жирным шрифтом выделены годы с экстремально высокими значениями геопотенциала  $H_{500}$  и приземного давления  $P_0$ .

### Исследование циклических колебаний

В последние десятилетия определенный интерес проявляется к исследованию цикличности различных явлений, и в частности к использованию этого природного свойства для разработки прогностических методов [1, 8, 10]. В будущем, наряду с применением численных прогностических моделей, будут развиваться и эмпирические методы долгосрочного прогноза, основанные, в частности, на учете аномалий температуры океана, особенно его энергоактивных зон, взаимосвязи условий над различными районами, аналогичности и цикличности циркуляционных процессов [5].

Полученные данные наблюдений указывают на наличие в системе океан — атмосфера короткопериодных климатических параметров с типичной периодичностью от 2 до 10 лет. Такие вариации (или климатические сигналы) представляют собой один из основных объектов исследования, поскольку они определяют межгодовую изменчивость гидрометеорологических полей в глобальном и региональном масштабах [12]. Поскольку значимый тренд параметров, определяющих циркуляцию в ЦДА, был выявлен только для района АД, то для летней депрессии значимость тренда отходит на второй план в сравнении с наличием экстремумов, что делает важным расчет циклов.

*Азиатская и летняя дальневосточная депрессии*

В табл. 3 представлены коэффициенты Фурье, рассчитанные по уточненной методике, которая учитывает флуктуации в циркуляционных индексах, характеризующих региональные центры над 2-м е.с.р. Северного полушария.

Таблица 3

Коэффициенты Фурье для временных рядов параметров  $H_{500}$  и  $P_0$ , характеризующих азиатскую депрессию (АД) и летнюю дальневосточную депрессию (ЛДД) в 1980—2017 гг.

ЦДА	Цикл, число лет	$H_{500}$			$P_0$		
		Июнь	Июль	Август	Июнь	Июль	Август
АД	2	<b>0,16</b>	0,12	0,09	0,13	0,11	<b>0,15</b>
	5	0,04	<b>0,17</b>	0,11	<b>0,15</b>	0,10	0,06
	6	0,04	0,12	0,08	0,09	0,09	<b>0,21</b>
	7	0,07	0,01	0,13	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>	0,14
	10	<b>0,28</b>	<b>0,15</b>	<b>0,24</b>	0,06	<b>0,18</b>	0,12
ЛДД	2	<b>0,29</b>	<b>0,42</b>	<b>0,35</b>	<b>0,26</b>	0,07	<b>0,32</b>
	5	<b>0,22</b>	<b>0,44</b>	<b>0,45</b>	0,09	<b>0,34</b>	<b>0,15</b>
	6	0,09	<b>0,37</b>	<b>0,38</b>	0,09	<b>0,21</b>	<b>0,23</b>
	7	0,11	0,07	<b>0,26</b>	<b>0,18</b>	<b>0,17</b>	<b>0,29</b>
	10	<b>0,19</b>	<b>0,39</b>	0,08	0,10	<b>0,30</b>	0,10

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициентов Фурье.

Из таблицы видно, что для АД доминирующим циклом в средней тропосфере является 10-летний цикл, а для июля еще и 5-летний. В приземном поле в июне и июле доминирующим является 7-летний цикл, а в июле — еще и 10-летний. В другом летнем центре (ЛДД), доминирующими являются короткие 2-летние циклы, а также 5-летние циклы; кроме того, присутствуют и 10-летние циклы.

*Гавайский и охотский антициклоны*

Как и для континентальных ЦДА, вычислим значения коэффициентов Фурье для временных рядов параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  для ГА и ОА за период 1980—2017 гг. (табл. 4).

Из таблицы видно, что в июне в области ГА в средней тропосфере  $H_{500}$  доминирующим является 6—7-летний цикл; в июле отмечается один доминирующий период, 5-летний, который был доминирующим и в приземном поле. В августе доминируют в ГА 6—7-летние периоды. В охотском ЦДА в средней тропосфере, кроме 2-летних периодов, доминирующими являются и 6—10-летние периоды.

Выделение циклов уточненным методом Фурье дает возможность представить прогноз аномалий параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  для рассматриваемых центров на

Таблица 4

Коэффициенты Фурье  
для временных рядов параметров ( $H_{500}$ ,  $P_0$ ),  
характеризующих гавайский и охотский антициклоны в 1980—2017 гг.

ЦДА	Цикл, число лет	$H_{500}$			$P_0$		
		Июнь	Июль	Август	Июнь	Июль	Август
ГА	2	<b>0,27</b>	0,07	<b>0,21</b>	0,04	0,12	<b>0,26</b>
	5	0,02	<b>0,38</b>	0,12	0,02	<b>0,43</b>	0,09
	6	<b>0,33</b>	0,05	0,15	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,28</b>
	7	<b>0,33</b>	0,12	<b>0,31</b>	<b>0,21</b>	<b>0,25</b>	<b>0,39</b>
	10	0,10	0,17	<b>0,25</b>	0,07	0,01	0,08
ОА	2	<b>1,05</b>	<b>0,41</b>	<b>0,34</b>	0,12	0,19	<b>0,49</b>
	5	0,10	<b>0,34</b>	<b>0,39</b>	0,15	0,19	<b>0,30</b>
	6	<b>0,33</b>	<b>0,29</b>	<b>0,27</b>	<b>0,35</b>	<b>0,20</b>	0,16
	7	<b>0,26</b>	<b>0,47</b>	<b>0,27</b>	0,10	<b>0,40</b>	0,11
	10	<b>0,80</b>	<b>0,22</b>	0,18	0,04	0,15	0,27

Примечание. Жирным шрифтом выделены наибольшие значения коэффициентов Фурье.

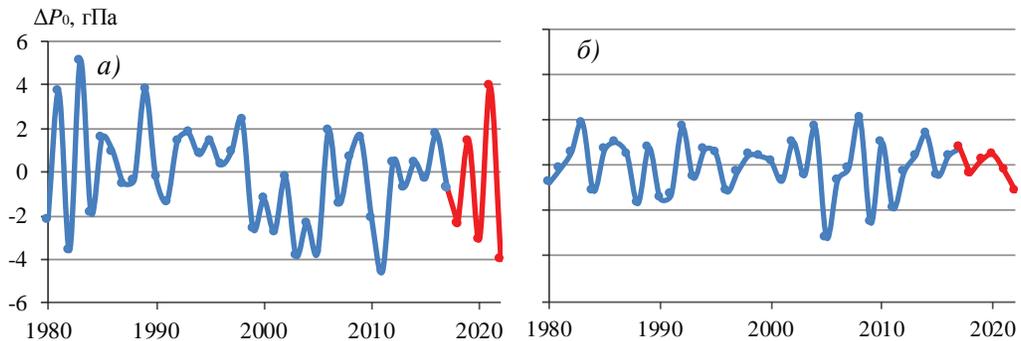


Рис. 4. Аномалии приземного давления в Охотском море (а) и в области летней дальневосточной депрессии (б) с 1980—2017 гг. (синий цвет); прогноз для периода 2018—2022 гг. (красный цвет).

период 5 лет по ряду за 1980—2017 гг. Заметим, что для прогноза использованы не только доминирующие циклы, но и все гармоники. В качестве примера на рис. 4 представлены аномалии приземного давления для акватории Охотского моря и области летней дальневосточной депрессии и прогноз на пятилетний период.

Из рис. 4 следует, что в июне 2019 г. возможно усиление ОА, ЛДД ожидается в пределах нормы, также охотский антициклон будет усиливаться в июне 2021 г. В 2019 г. этот прогноз полностью оправдался. Усиление антициклона в Охотском море способствует формированию отрицательных аномалий температуры воды в северо-западной части Тихого океана и Японском море.

### Примеры влияния изменчивости параметров ЦДА на термический режим Японского моря и северо-западной части Тихого океана

Выявленная изменчивость циркуляции атмосферы (индикатором которой являются ЦДА) обусловила изменения климата и повторяемость экстремальных явлений над территорией Дальнего Востока. Особенно важно знать влияние экстремумов параметров циркуляции атмосферы на динамический и термический режим в промысловых районах Дальнего Востока в летний период, когда ведется промысел сайры, сардины и скумбрии. Эти изменения представлены на графиках многолетней изменчивости аномалий температуры воздуха на гидрометеорологических станциях (ГМС) и температуры воды в районах Японского моря и Северо-Западной части Тихого океана, расположенных в области основных течений (Цусимское течение, Куроисио и Ойясио).

На рис. 5 представлена многолетняя изменчивость аномалий температуры воздуха на ГМС Суттсу (западное побережье о-ва Хоккайдо), Абасири (северо-восточное побережье о-ва Хоккайдо), Немуро (юго-восточное побережье о-ва Хоккайдо) и Токио (восточное побережье о-ва Хонсю) в июле 1980—2017 гг.

В ходе аномалий температуры воздуха на станциях о-ва Хоккайдо в июле отмечалось значимое повышение температуры (обеспеченность тренда составляла 0,04), что согласуется со значимостью тренда  $H_{500}$  в АД и ГА. В то же время наблюдаются и эпизоды значительного похолодания. В табл. 5 представлены годы с экстремальными значениями аномалий температуры воздуха.

Таблица 5

Годы с экстремальными значениями аномалий температуры воздуха  
на ГМС Японии в 1980—2017 гг.

Июль				Август			
Суттсу	Абасири	Немуро	Токио	Суттсу	Абасири	Немуро	Токио
1983	1983	1983	1980	1980	1980	1980	1980
1986	<b>1984</b>	<b>1984</b>	1982	1993	1987	1987	1993
1988	1986	1986	1983	<b>1994</b>	1993	<b>1989</b>	<b>1995</b>
2003	1988	1988	1988	<b>1999</b>	<b>1994</b>	<b>1994</b>	<b>2010</b>
<b>2010</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>	1993	<b>2010</b>	1997	1997	
	2003	2003	<b>1994</b>		1999	1999	
	2013	2004	2001		2002	2001	
	<b>2017</b>	<b>2013</b>	2002		<b>2006</b>	2002	
		2015	2003		<b>2010</b>	2003	
		2017	2004		2016	2010	
			2010			2016	

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены экстремально теплые годы (аномалии более 2 °С).

Экстремальные по термическому режиму годы совпадают с экстремумами параметров ЦДА. Так, в области АД максимальные значения  $H_{500}$  отмечались

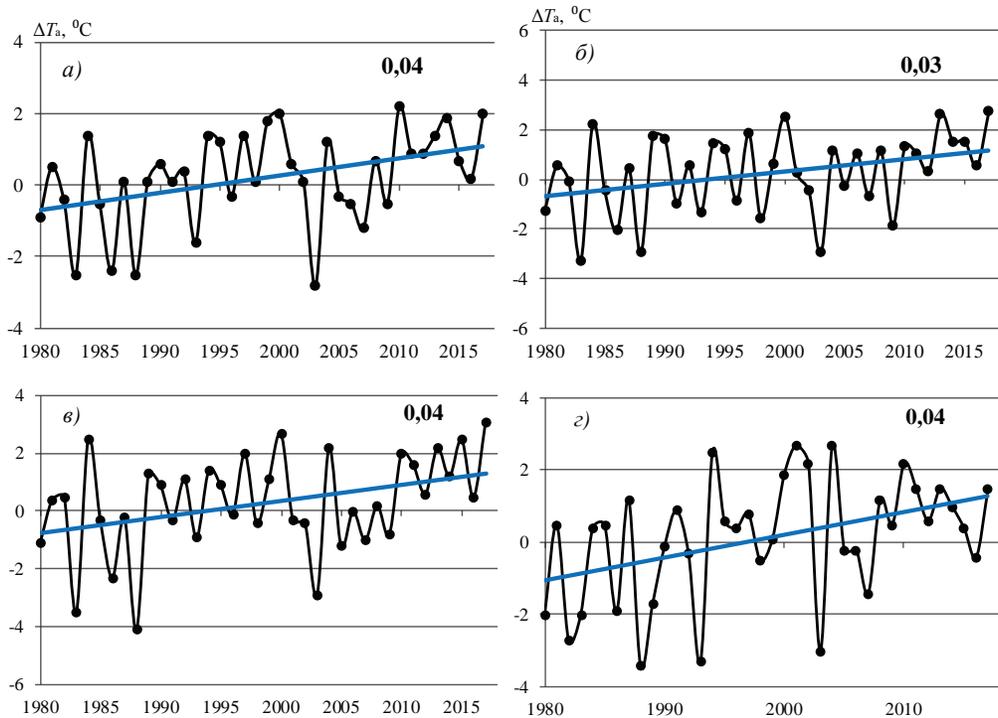


Рис. 5. Многолетняя изменчивость аномалий температуры воздуха на ГМС Японии в июле 1980—2017 гг. и линейные тренды.

*а* — Сутсу, *б* — Абасири, *в* — Немуро, *з* — Токио.  
 Цифрами на графиках указана значимость тренда.

в 2013, 2016, 2010 гг., в области ГА — в 1980, 2004, 2010, 2016 гг., в области ОА максимальными значения  $P_0$  были в 1983, 1988, 1993 гг. Похолодания (1980, 1983, 1986, 1988, 1993, 2003 гг.) на гидрометеорологических станциях Японии согласуются с максимальными значениями  $P_0$  в июне и июле в Охотском море.

В период 1980—2017 гг. наблюдались заметные изменения температуры поверхности воды в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) и в Японском море. На рис. 6 представлены аномалии температуры поверхности воды в проливе Лаперуза, у юго-западного побережья о-ва Хоккайдо, в области Цусимского течения и у юго-западного побережья о-ва Хоккайдо.

Для всех представленных районов, расположенных в Японском море и СЗТО, тренды значимы. В табл. 6 представлены годы с экстремальными значениями аномалий температуры воды.

В области пр. Лаперуза экстремально теплыми в июле были 2010 и 2014 гг., у юго-восточного побережья о-ва Хоккайдо — 1984, 2011, 2014, 2015 и 2017 гг. В южных районах Японского моря экстремально теплыми были 2010, 2014 и

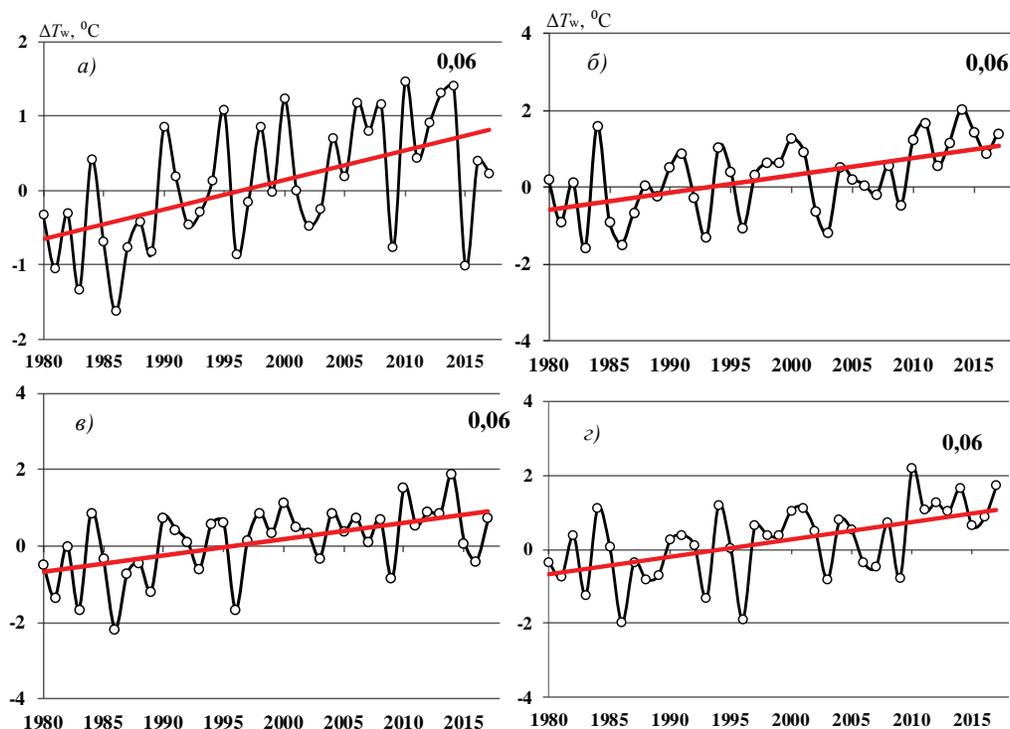


Рис. 6. Многолетняя изменчивость аномалий температуры воды в июле в 1980—2017 гг.

*a* — пролив Лаперуза, *б* — у юго-восточного побережья о-ва Хоккайдо, *в* — у юго-западного побережья о-ва Хоккайдо, *г* — в области Цусимского течения. Цифрами на поле рисунков указана значимость тренда.

2017 гг. Чаще всего холодными годами в июле были 1983 и 1986 гг. В августе чаще всего экстремально теплыми годами были 2010, 2014 и 2016 гг., а холодными — 2002, 2003, 1993 и 1980 гг. Из табл. 6 видно, что максимумы в АД (2010, 2014, 2016 и 2017 гг.) согласуются с экстремумами в термическом режиме вод Японского моря и СЗТО. Холодные годы согласуются с усилением интенсивности ОА и ослаблением влияния ГА (1983 и 1993 гг.).

В качестве примера механизма влияния экстремумов в циркуляции атмосферы на термический режим вод Японского моря и СЗТО представлены среднемесячные поля приземного давления и геопотенциала  $H_{500}$  в июле 2017 г., в августе 2016 г. и в июле 1993 г. (рис. 7). На приземных картах давления выделены очаги экстремальной температурой воздуха у поверхности Земли и обозначены области с высокими значениями температуры поверхности воды. На картах  $AT_{500}$  выделены области с экстремальными значениями  $H_{500}$ .

Таблица 6

Годы с экстремальными значениями аномалий температуры воды в июле и августе 1980—2017 гг. в районах Японского моря и СЗТО

Июль				Август			
пр. Лаперуза	Ю-В Х.	З Х.	ЦТ	пр. Лаперуза	Ю-В Х.	З Х.	ЦТ
1986	1983	1983	1986	2002	1984	1981	1980
<b>2010</b>	<b>1984</b>	1986	1996	<b>2006</b>	1993	1993	<b>1985</b>
<b>2014</b>	1986	1996	<b>2010</b>		<b>1994</b>	1996	1991
	2011	2010	2014		<b>1999</b>	<b>2000</b>	1993
	2014	2014	2017		2002	2006	1994
	2015				2003	<b>2010</b>	2009
	2017				2010	2012	2010
					2015	2016	2012
							2014
							2016

Примечания: 1. Ю-В Х. — юго-восточное побережье о-ва Хоккайдо, З Х. — западное побережье о-ва Хоккайдо, ЦТ — Цусимское течение. 2. Жирным шрифтом выделены экстремально теплые годы (аномалии более 2 °С).

Из рисунка видно, что в июле 2017 г. Японское море и СЗТО находились в зоне влияния гребня гавайского антициклона и происходил интенсивный вынос теплых воздушных масс, о чем свидетельствует положение очагов с экстремально высокой температурой воздуха. В средней тропосфере высокие значения геопотенциала  $H_{500}$  отмечаются в широтном поясе 35—45° с.ш. Положение областей с экстремальными значениями  $H_{500}$  практически совпадает с положением областей с экстремальной температурой воздуха и воды.

В августе 2016 г. гавайский антициклон был аномально интенсивен, его гребень оказывал воздействие на Курило-Сахалинский регион. О его мощности свидетельствует очаг с экстремально высокой температурой воздуха, расположенный над Курильской грядой (см. рис.7 в). В средней тропосфере в этих районах отмечалась область с экстремально высокими значениями  $H_{500}$ . Аномально теплая вода отмечалась в прибрежных районах о. Хоккайдо и у Курильских островов.

В июле 1993 г. над Охотским морем был хорошо развит антициклон, а влияние ГА было ослаблено. В результате выноса холодного полярного воздуха на Японское море и СЗТО над ними сформировались очаги с аномально низкой температурой воздуха, что привело к формированию отрицательных аномалий температуры воды (см. рис.7 д). В средней тропосфере в восточной части Охотского моря наблюдалась холодная депрессия, а в дельте ложбины — очаг с аномально низкими значениями  $H_{500}$ . Он совпадает с экстремально низкими значениями температуры воздуха и воды.

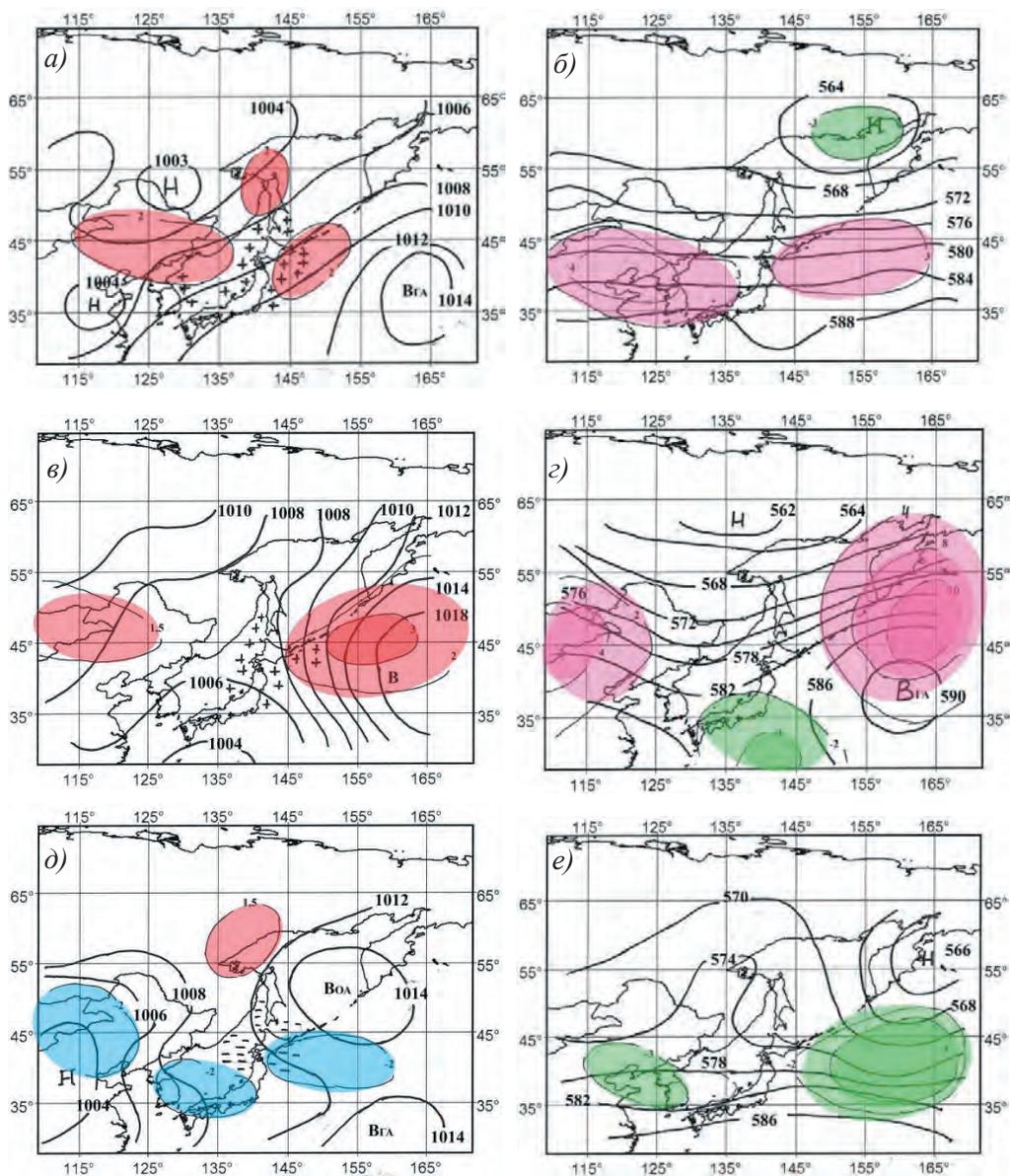


Рис. 7. Среднемесячные поля приземного давления и геопотенциала  $H_{500}$  над центральным сектором 2-го е.с.р.: в июле 2017 г.  $P_0$  (a) и  $H_{500}$  (б), в августе 2016 г.  $P_0$  (в) и  $H_{500}$  (г), в июле 1993 г.  $P_0$  (д) и  $H_{500}$  (е).

Красным цветом указано положение очагов с экстремально высокой температурой воздуха, а синим — с низкой. Зеленым цветом показаны очаги anomalно низких значений геопотенциала, розовым — очаги высоких значений геопотенциала. Крестиками указаны области с экстремально высокой температурой воды. Штриховкой указана область с экстремально низкой температурой воды.

## Заключение

Оценка обеспеченности тренда в центрах действия атмосферы над Дальним Востоком в летний период 1980—2017 гг. показала, что значимые тренды наблюдались в средней тропосфере  $H_{500}$  в области азиатской депрессии и в области гавайского антициклона.

В летней дальневосточной депрессии и охотском антициклоне тренды оказались незначимы из-за больших флуктуаций параметров. Выделены экстремальные режимы в циркуляции ЦДА. Показано, что практически все максимумы в термическом режиме атмосферы и океана совпадают с максимумами в циркуляции атмосферы над 2-м е.с.р. Северного полушария.

Значимые тренды определены и для локальных районов, таких как ГМС Японии, расположенных на о-ве Хоккайдо, а также для температуры воды в локальных районах Японского моря и СЗТО. Эти результаты основаны на анализе режимов циркуляции для всех ЦДА: летней дальневосточной депрессии и охотского антициклона, а также области азиатской депрессии и области гавайского антициклона.

Уточненный метод Фурье дает возможность представить прогноз аномалий параметров  $H_{500}$  и  $P_0$  для рассматриваемых центров на период 5 лет.

## Список литературы

1. Антонов А.Е. Природная циклоэнергетика. Гидрометеорологическое и рыболовное прогнозирование. СПб: Гидрометеоиздат, 2007. 216 с.
2. Апасова Е.Г. О характеристиках местоположения ЦДА // Труды ВНИИГМИ — МЦД. 1979. Вып. 58. С. 89—98.
3. Богдановская Т.В., Богдановский А.А. Изменчивость положения центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона и их вклад в формирование аномалий температуры воздуха Сахалина // Гидрометеорологические и экологические условия дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду. Тематический выпуск ДВНИГМИ. 2000. № 3. С. 26—33.
4. Боровков А.А. Математическая статистика. Дополнительные главы. М.: Наука. 1984.
5. Васильев А.А., Вильфанд Р.М. Прогноз погоды. М.: изд-во Росгидромета, 2008. 60 с.
6. Ильинский О.К. Дальневосточная депрессия // Труды ДВНИГМИ. 1965. Вып. 11. С. 3—53.
7. Ильинский О.К. Охотский антициклон // Труды ДВНИГМИ. 1959. Вып. 7. С. 10—32.
8. Карпова И.П., Сустанов Ю.В., Николаев Д.Л. Использование приемов экстраполяции временных рядов в методах сверхдолгосрочного прогнозирования // Методы расчета и прогноза гидрометеорологических процессов в промысловых районах. 1991. Вып. 112. С. 38—50.
9. Мартынова Т.В. О колебании положения и интенсивности ЦДА // Метеорология и гидрология. 1990. № 4. С. 50—55.
10. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». Мурманск: изд-во ПИПРО, 1997. 40 с.
11. Николаева Э.К. Семь инструментов качества в японской экономике. М.: Изд-во стандартов. 1990. С. 88.
12. Полонский А.Б., Кибальнич И.А. Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5—17.
13. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с.
14. Шатилина Т.А., Кравченко Р.Б. Результаты классификации временного ряда температуры воды в Южно-Курильском районе и связь с региональными атмосферными индексами // Изв. ТИПРО. 2013. Т. 172. С. 208—223.

15. Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Особенности изменения приземной температуры воздуха над районами Дальнего Востока в 1976—2005 гг. // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 31—35.
16. Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Оценка тенденций изменчивости центров действия атмосферы над Азиатско-Тихоокеанским регионом в летние периоды 1950—1979 и 1980—2012 гг. // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 17—28.
17. Шатилина Т.А., Цицашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Режим охотского антициклона и климатические экстремумы в Курило-Хоккайдском регионе в летний период 1950—2017 гг. / Тезисы Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития». СПб, 2018. С. 491—494.
18. Cooley J.W., Tukey J.W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series // Mathematics of Computation. 1965. V. 19, No. 90. P. 297—301.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИЛИВОВ  
НА ОСНОВЕ НОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ  
ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ*****Г.Н. Войнов***

Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института  
им. Н.Н. Зубова, [voinovgn@mail.ru](mailto:voinovgn@mail.ru)

Представлены новые котидальные карты приливных волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ . Изолинии амплитуд волн проведены впервые. Приведены также сведения и карты характера прилива, максимальных и наибольших возможных значений приливных колебаний уровня. Получен сезонный ход волны  $M_2$  для четырех станций. Установлено, что в среднем максимум амплитуды этой волны (повышение на 10 % от средней за год) наблюдается в июле — августе. Произведена оценка линейных трендов амплитуд и фаз волны  $M_2$  для четырех станций с многолетними наблюдениями.

*Ключевые слова:* котидальные карты, карта максимальных приливов, карта наибольших приливов, сезонный ход, многолетний ход, Финский залив.

**GENERAL CHARACTERISTICS OF TIDES AS THE BASE  
THE NEW OF HARMONIC CONSTANTS IN THE GULF OF FINLAND*****G.N. Voinov***

Zubov State Oceanographic Institute, St. Petersburg, Russia

The paper presents the results of research aimed to develop new maps of tidal waves  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ . For the first time, isolines of wave amplitudes have been obtained. Parameters and charts of tidal oscillations of the extremes, the highest (HAT) and the lowest (LAT) astronomical tide have been obtained. Seasonal wave routes have been obtained for four stations. The maximum wave amplitudes proved to occur in July and August. Linear trends in wave amplitudes and phases have been calculated for four stations.

*Keywords:* cotidal maps. Extreme tide. Highest (HAT) and lowest (LAT) tide. Seasonal variations. Trends the  $M_2$  tide. Gulf of Finland

**Введение**

Первая обработка данных наблюдений за уровнем в Балтийском море, выполненная с помощью гармонического анализа Р. Виттингом в начале XX века [19], показала, что приливы в море повсеместно невелики и, согласно принятой классификации [2], Балтийское море в целом, и в частности Финский залив, относятся к бесприливным морям (среднее значение прилива менее 10 см). Однако по мере накопления данных наблюдений и расширения сети береговых и островных станций периодически возникал научный интерес к изучению формирования и распространения приливов на акватории моря.

Наиболее достоверными в XX веке считались эмпирические котидажные карты приливов волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ , представленные Магаардом и Крауссом [17]. Эти карты были построены по результатам спектрального анализа наблюдений в 31 пункте, а также с использованием имеющихся сведений о приливах Виттинга [19] и Лисицыной [16]. Однако недостаток карт Магаарда и Краусса состоял в отсутствии карт изоамплитуд волн приливов. Точность полученной к тому времени информации об амплитудах основных волн была недостаточной для построения таких карт. Подробное изложение истории вопроса содержится в работах [4, 6].

В XXI веке изучение закономерностей формирования и распространения приливов стало проводиться с помощью численного моделирования [7, 15]. Итогом этих работ стало подтверждение сложившихся представлений о формировании суточных и полусуточных волн приливов и эмпирических построений распространения основных четырех волн приливов.

В связи с появлением новых сведений о гармонических постоянных приливов, основанных на гармоническом анализе многолетних наблюдений за уровнем моря [6, 7], появилась возможность построения новых эмпирических карт основных волн приливов в Финском заливе. Были выявлены неверные сведения о гармонических постоянных в некоторых пунктах Финского залива, что приводило к ошибочным результатам при расчете различных характеристик приливов в ряде работ [1, 9—14].

Наши новые данные, конечно, меняют детальную картину распределения на подобных картах. В особенности это относится к картам характера прилива, максимальных колебаний прилива и его наибольших возможных колебаний. Совместно с новой информацией о сезонных колебаниях, приведенной в работе Медведева [8], и данными, представленными в настоящей работе, появилась возможность выполнить расчет приливных колебаний уровня с учетом сезонных колебаний в любом пункте Финского залива и оценить распределение энергии в спектре в диапазоне сезонной, мезомасштабной и синоптической изменчивости колебаний уровня.

В последнее десятилетие начал реализовываться проект газопровода через акваторию Финского залива «Северный поток-2». В связи с этим возник запрос на полное освещение режима колебаний морского уровня на основе новых данных наблюдений и современных методов обработки и интерпретации этой информации. Целью данной работы является построение новых приливных карт основных волн  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  для исследования формирования и распространения полусуточных и суточных приливов в Финском заливе. Необходимы также новые карты максимальных и наибольших возможных приливных колебаний уровня с целью их точной оценки. Наконец, появилась возможность изучить сезонную и межгодовую изменчивость приливов.

### Котидажные карты основных волн прилива

**Волна  $M_2$ .** В работах [4, 6, 7, 13—14] обсуждались котидажные карты разных авторов. В последних обзорах по приливам [13, 14] приведена карта Магаарда и Краусса [17], но в ней нет изолиний амплитуд. Это связано с тем, что для детального проведения изоамплитуд информации было недостаточно.

Для установления точного местоположения центра амфидромической системы автор применял метод Штернека — Некрасова [18]. Он заключается в нахождении точки пересечения линий значений  $H \cos(g)$  и  $H \sin(g)$ , где  $H$  и  $g$  — гармонические постоянные всех пунктов. Подобное действие можно выполнить алгебраически, но здесь такое усложнение не требуется. Затем, после определения этой точки, котидальные линии (изофазы и изоамплитуды) могут быть легко построены с помощью графической линейной интерполяции. Новая карта автора приведена на рис. 1 а. Амфидромическая система имеет вращение линий изофаз в направлении против часовой стрелки. Это соответствует теоретическим представлениям как амфидромия Тейлора.

Координаты центра амфидромии составляют  $59^{\circ}52'$  с.ш. и  $25^{\circ}32'$  в.д. По Магаарду и Крауссу [17], центр приблизительно находится в точке с координатами  $59^{\circ}55'$  с.ш. и  $25^{\circ}40'$  в.д. Таким образом, центры амфидромии волны  $M_2$  почти совпадают. Тем не менее ход изолиний несколько различается. Нулевая изолиния у Магаарда идет к пункту Шепелево, а на новой карте автора — к мысу Кольгомпя у Копорской губы. Следующая изолиния  $30^{\circ}$  идет не к Приморску, а по оси залива мимо Кронштадта к Стрельне (см. рис. 1 а). Изолиния  $120^{\circ}$  на карте автора проходит почти у Хельсинки, а у Магаарда — у входа в залив.

Изолинии амплитуд проведены через 0,5 см. Видно, что в районе пункта Шепелево проходит изолиния 1,5 см. На большей части акватории Финского залива амплитуда волны составляет всего 0,5—1,0 см. В окрестности амфидромии амплитуда не превышает 0,5 см.

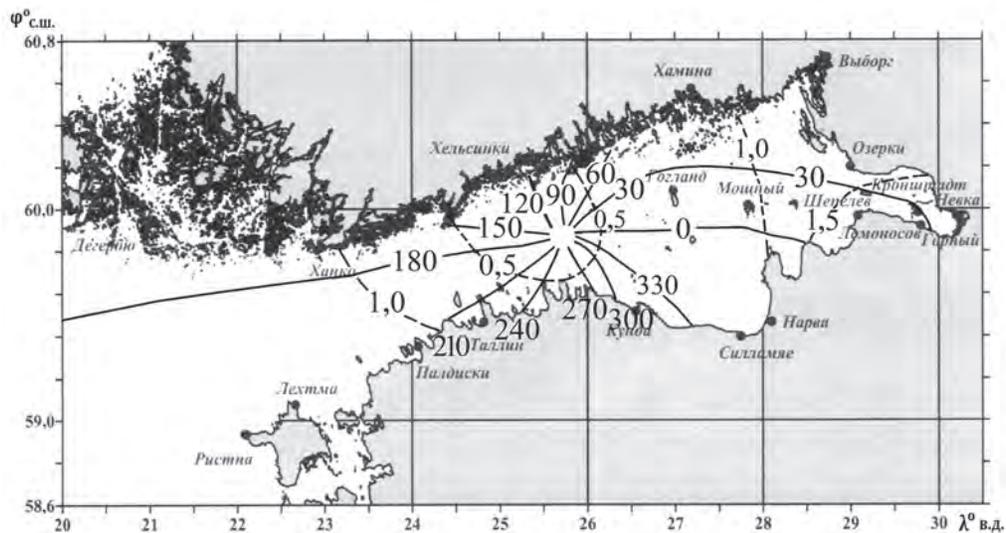
**Волна  $S_2$ .** Способ построения карты изофаз и изоамплитуд волны  $S_2$  был аналогичен описанному выше. Координаты центра амфидромии (см. рис. 1 б) составляют  $59^{\circ}50'$  с.ш. и  $25^{\circ}32'$  в.д. По Магаарду и Крауссу [17] центр приблизительно находится в точке с координатами  $60^{\circ}00'$  с.ш. и  $26^{\circ}00'$  в.д. Отсюда следует, что центры амфидромии волны  $S_2$  несколько различаются. Отметим, что на наших картах центры амфидромий волн  $M_2$  и  $S_2$  практически совпадают между собой. Амплитуда волны  $S_2$  в Финском заливе лежит в основном в пределах 0,3—0,5 см. Однако, несмотря на малость этих значений, идентичность хода изофаз и изоамплитуд между волнами  $M_2$  и  $S_2$  подтверждает достоверность представленной карты.

**Волна  $K_1$ .** Проверка на наличие амфидромии этой волны показала отрицательный результат. На рис. 2 а представлена котидальная карта волны  $K_1$ .

Распределение изофаз показывает классический случай стоячей волны в Финском заливе. Практически через весь залив проходит одна изолиния —  $0^{\circ}$ . Изменения фаз наблюдаются только на входе в залив. Амплитуда волны последовательно возрастает к вершине залива. В крайней восточной части она составляет почти 3 см. Карта изофаз для залива, представленная в работе [17], совпадает с новой картой автора практически во всем, кроме вида прохождения изолинии  $0^{\circ}$  в крайней восточной части. Это понятно: в распоряжении авторов указанной работы еще не было такой полной информации.

Наличие ряда изофаз на входе в залив свидетельствует о формировании узловой зоны. По Магаарду и Крауссу [17], а также в соответствии с предшествующим исследованием центр амфидромии волны  $K_1$  расположен у о-ва Борнхольм. По данным автора центр амфидромии может лежать к северу от этого острова, что может быть установлено в дальнейшем по дополнительным данным.

a)



b)

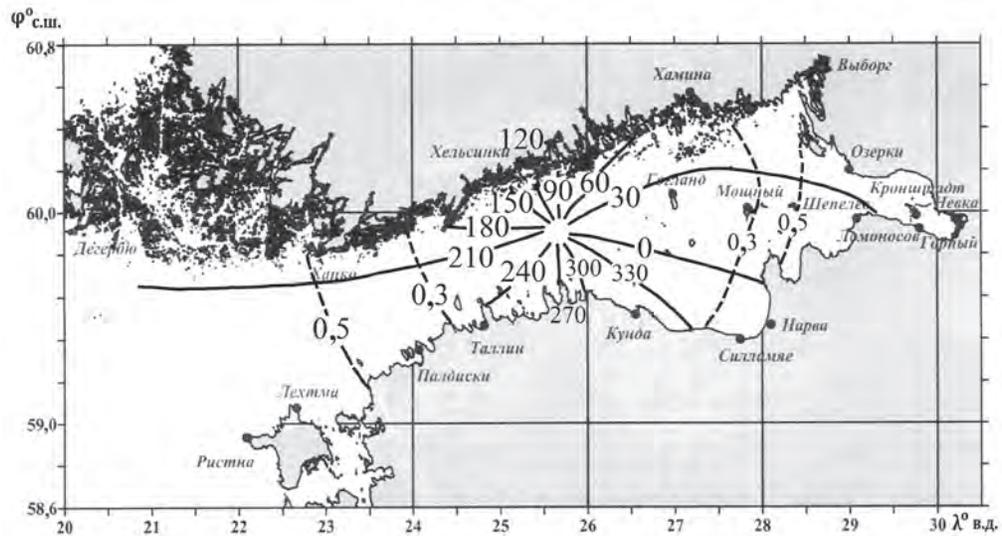
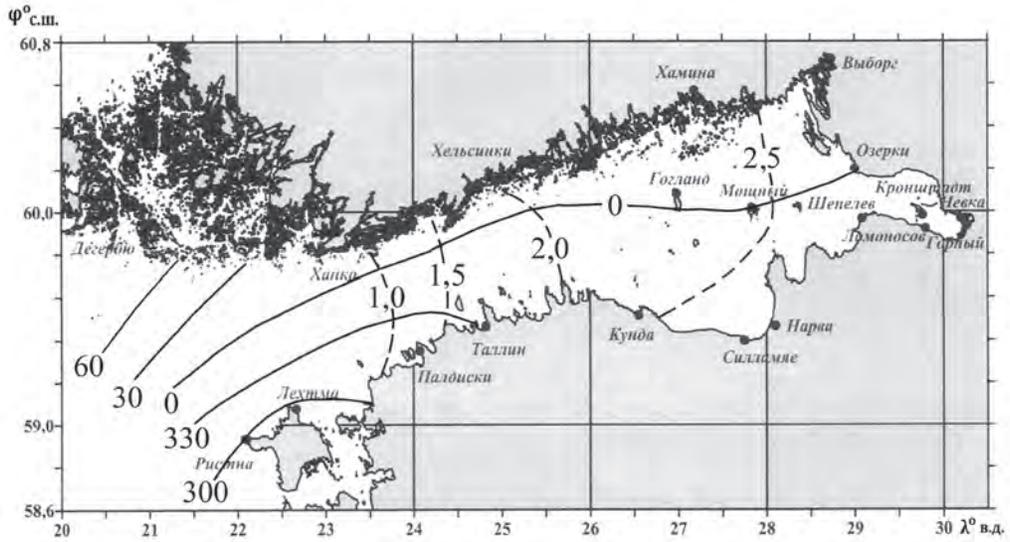


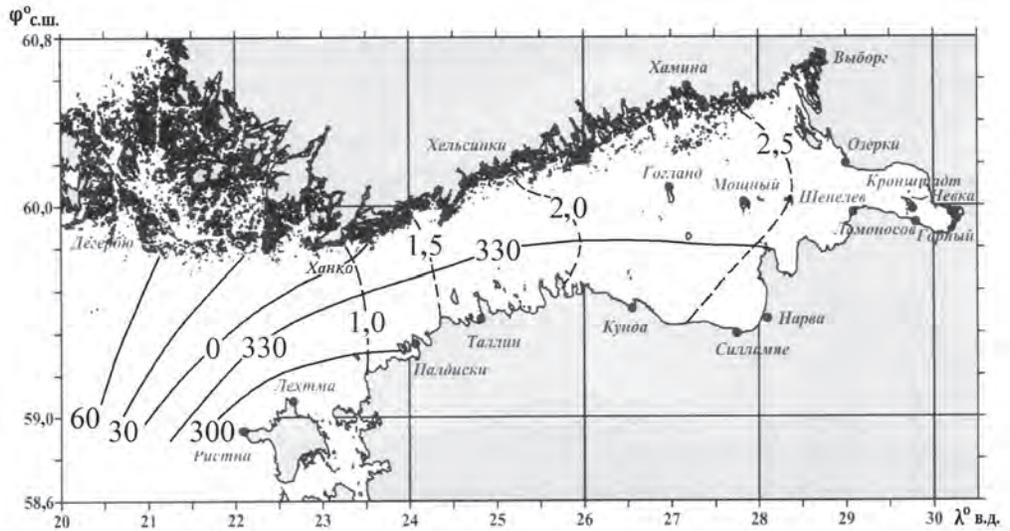
Рис. 1. Котидальные карты волны  $M_2$  (a) и волны  $S_2$  (б).

Сплошные кривые — изофазы (град.) по нулевому поясу,  
штриховые кривые — изоамплитуды (см).

а)



б)

Рис. 2. Котидальные карты волны  $K_1$  (а) и  $O_1$  (б).

Сплошные кривые — изофазы (град.) по нулевому поясу,  
штриховые кривые — изоамплитуды (см).

**Карта  $O_I$ .** На рис. 2 б представлена карта волны  $O_I$ .

Здесь мы видим также стоячую волну с одной изолинией  $330^\circ$ , проходящей через залив. По сравнению с картой, представленной в работе [17], есть существенные отличия. На этой карте изолиния  $0^\circ$  проходит через залив. На новой карте автора изолиния  $0^\circ$  появляется на выходе из залива у Ханко. Амплитуда волны  $O_I$  возрастает к вершине залива и тождественна по распределению волне  $K_I$ . Так же как и в случае волны  $K_I$ , в крайней восточной части залива амплитуда достигает почти 3 см. Характер распределения изофаз волны  $O_I$  на входе в залив сходен с наблюдаемым для волны  $K_I$ . Поэтому отмеченные выше условия формирования узловой зоны волны  $K_I$  справедливы и для волны  $O_I$ .

### Общая характеристика приливов

В табл. 1 приведены параметры  $Sg \approx 2 (H_{M2} + H_{S2})$  и  $Gc \approx 2 (H_{K1} + H_{O1})$ , являющиеся грубым приближением к величинам сизигийных и тропических приливов соответственно. Критерии Дуванина и Куртье определяют характер временной изменчивости приливов. Для этого используется также величина угла  $\Delta g = g_{M2} - (g_{K1} + g_{O1})$ . Этот параметр совместно с критерием Куртье или Дуванина

Таблица 1

Основные негармонические постоянные в различных пунктах Финского залива

Номер пункта	Пункт	$Sg$	$Gc$	$L = Sg + Gc$	$D/K^*$	$\Delta g$
1	Ристна	3,4	2,2	6,6	0,92/0,65	29
2	Лехтма	4,3	3,2	7,5	1,08/0,75	346
3	Палдиски	3,1	4,6	7,7	1,98/1,46	298
4	Таллинн	2,1	6,0	8,1	4,00/2,80	299
5	Кунда	2,2	9,3	11,5	5,76/4,32	28
6	Гогланд	2,4	8,7	11,1	4,70/3,58	40
7	Силламяе	3,2	11,2	14,4	4,69/3,53	32
8	Мощный	2,6	9,9	12,5	5,08/3,79	33
9	Нарва	2,6	10,1	12,7	4,34/3,84	34
10	Шепелево	4,4	11,6	16,0	3,54/2,63	38
11	Кронштадт	5,3	12,0	17,3	3,16/2,25	40
12	Ломоносов	6,0	11,5	17,5	2,78/1,90	46
13	Горный институт	5,8	12,4	18,2	3,07/2,12	40
14	Невская устьевая	5,9	11,0	16,9	2,77/1,85	45
15	Озерки	3,7	10,1	13,8	3,78/2,74	40
16	Приморск	3,9	10,0	13,9	3,45/2,54	43
17	Выборг	3,7	10,8	14,5	3,84/2,89	38
18	Хамина	3,1	10,1	13,2	4,40/3,14	41
19	Хельсинки	0,9	7,3	8,2	10,48/7,77	118
20	Ханко	3,6	3,2	6,8	1,25/0,89	150
21	Дегербю	2,5	1,6	4,1	0,86/0,64	6

\* Д — критерий Дуванина, К — критерий Куртье.

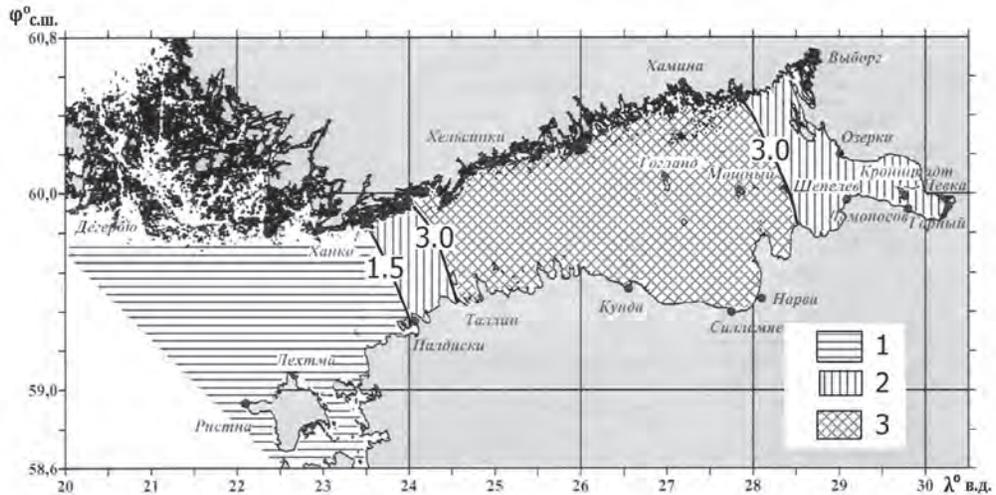


Рис. 3. Характер прилива по критерию Куртье.

1 — зона смешанного прилива, в основном полусуточного ( $0,25 < K < 1,5$ ); 2 — зона смешанного прилива, в основном суточного ( $1,5 < K < 3,0$ ); 3 — зона суточного прилива ( $K > 3,0$ ).

позволяет классифицировать приливы и подразделить их на отдельные подтипы по временному ходу кривой за сутки [2].

Из рис. 3, построенного по данным, приведенным в табл. 1, видно, что на входе в Финский залив до линии, условно соединяющей Ханко и Палдиски, прилив имеет смешанный, в основном полусуточный характер (критерий Куртье меньше 1,5). Далее к востоку, почти до Таллина, идет зона смешанного, в основном суточного прилива. Затем на восток до района Копорской губы и по линии на север почти по меридиану  $28^\circ$  приливы имеют суточный характер. В крайней восточной части Финского залива приливы приобретают смешанный, в основном суточный характер (критерий Куртье меньше 3). Нельзя сказать, что эти выводы являются полностью новыми. Тем не менее зона смешанных, в основном полусуточных приливов выделяется автором впервые. Более детально по сравнению с прежними представлениями обозначена зона чисто суточных приливов.

Известно, что смешанные приливы чрезвычайно изменчивы во времени. Для оценки этой изменчивости Владимирский [2] предложил классифицировать их в зависимости от величины угла  $g_{M2} - (g_{K1} + g_{O1})$  и критерия Дуванина (Куртье). Наиболее часто встречающийся вид изменчивости в Финском заливе — это преобладание суточного вида хода кривой (одна полная и одна малая вода в сутки). В зоне смешанного, в основном суточного прилива на общем фоне суточного вида кривой иногда появляется незначительная полусуточная вариация в дни сизигии.

На входе Финского залива на акватории моря выделена зона смешанного прилива в основном полусуточного (см. рис. 3). Здесь наблюдается полусуточный вид кривой с двумя полными и двумя малыми водами в сутки, но проявляется сильно

выраженное неравенство полных вод. Большую часть акватории Финского залива от Таллина до Кронштадта приливная волна пробегает почти за три часа.

В работах, посвященных приливам Финского залива [1, 6, 9], можно обнаружить совершенно разные оценки возраста прилива (полусуточного, суточного и паралактического), а также максимальных приливных колебаний уровня. Это было замечено Альтшулером [1], который считал, что погрешности расчета амплитуды достигают 20—30 %. По расчетам Михайлова [9], ошибки фаз главных волн прилива в пунктах Балтийского моря достигают  $\pm 30^\circ$ . Как показано в работе [6], результаты, опубликованные ранее для отдельных пунктов, вообще могут быть неверными. Отсюда следуют большие расхождения в значениях многих расчетных характеристик приливов.

Автором были рассчитаны значения возраста приливов: полусуточного  $\tau(S_2; M_2)$ , суточного  $\tau(O_1; K_1)$  и паралактического  $\tau(N_2; M_2)$ . Они приведены в табл. 2. Их таблицы видно, что в среднем возраст полусуточного прилива для всего залива составляет 11,1 часа, а увеличение этого значения до суток происходит

Таблица 2

Возраст приливов (полусуточного  $\tau(S_2; M_2)$  суточного  $\tau(O_1; K_1)$ , паралактического  $\tau(N_2; M_2)$ ) и значения отношений  $H_{S_2}/H_{M_2}$  и  $H_{O_1}/H_{K_1}$  в пунктах Финского залива

Номер пункта	Пункт	Возраст приливов, ч			$H_{S_2}/H_{M_2}$	$H_{O_1}/H_{K_1}$
		$\tau(S_2; M_2)$	$\tau(O_1; K_1)$	$\tau(N_2; M_2)$		
1	Ристна	6	8	77,89	0,412	1,245
2	Лехтма	10	14	65,03	0,447	0,862
3	Палдиски	18	18	80,83	0,353	1,000
4	Таллин	9	16	89,24	0,427	1,158
5	Кунда	8	18	29,02	0,333	1,113
6	Гогланд	7	11	47,39	0,312	1,121
7	Силламяе	8	14	35,09	0,328	1,051
8	Мощный	12	17	37,29	0,340	1,098
9	Нарва	(0)	18	48,86	0,129	1,113
10	Шепелево	8	17	57,68	0,348	0,983
11	Кронштадт	11	16	56,58	0,405	1,024
12	Ломоносов	11	12	60,25	0,461	1,003
13	Горный институт	8	19	57,31	0,448	0,937
14	Невская устьевая	9	11	49,60	0,495	0,933
15	Озерки	9	7	54,37	0,381	1,061
16	Приморск	11	7	36,19	0,359	1,119
17	Выборг	4	23	58,23	0,326	0,946
18	Хамина	12	20	53,82	0,339	0,992
19	Хельсинки	31	22	41,88	0,343	1,017
20	Ханко	22	20	51,99	0,398	1,192
21	Дегербю	19	19	56,40	0,340	0,723
	Среднее	11,1	15,6	2 д 3 ч	0,368	1,033

в районе Ханко и Хельсинки, что вызвано влиянием близости амфидромии в полусуточных приливах. Возраст суточного прилива распределен более равномерно. В среднем он несущественно отличается от возраста полусуточного прилива и равен 15,6 часа. Возраст параллактического прилива более изменчив, но его среднюю оценку можно получить: он составляет 2 суток 3 часа. Конечно, возраст приливов не является основной характеристикой, но помогают понять временную изменчивость приливов.

Теперь можно уверенно утверждать, что сизигийный прилив в Финском заливе наступает в дни астрономической сизигии, а тропический суточный — в дни максимального склонения Луны, строго говоря, через 11 и 16 ч после этих астрономических моментов. Параллактические приливы будут наблюдаться через двое суток после прохождения Луной перигея. Заметим, что все средние значения, приведенные в табл. 2, являются в известной степени приближением к истинным оценкам этих характеристик, так как получены по данным береговых и островных станций.

В целом амплитуда волны  $S_2$  в Финском заливе во всех пунктах больше амплитуды волны  $N_2$ , и поэтому параллактическое неравенство будет несущественным по сравнению с фазовым неравенством. Из табл. 2 видно, что средние значения отношений  $H_{S_2}/H_{M_2}$  и  $H_{O_1}/H_{K_1}$  равны 0,368 и 1,033. Согласно статической теории, на широте  $60^\circ$  эти отношения должны составлять 0,465 и 0,711. Таким образом, наблюдаемые соотношения отклоняются от теоретических значений. Некоторое занижение первого соотношения более заметно в центре Финского залива, где наблюдаются амфидромии приливов  $M_2$  и  $S_2$ .

Более высокие значения соотношения амплитуд суточных волн по сравнению с теоретическим формально следуют из того, что в 13 пунктах амплитуда прилива  $O_1$  больше амплитуды прилива  $K_1$  (см. табл. 2). В отношении прилива  $O_1$  можно отметить, что он ближе к резонансу, чем суточный прилив  $K_1$ . В связи с приближенным равенством амплитуд двух суточных волн (отношение их амплитуд в среднем близко к единице) тропическое неравенство будет резко выражено и равноденственные приливы будут небольшими. Поскольку преобладает суточный характер прилива, то максимальные приливные колебания уровня следует ожидать в июне и декабре.

### Максимальные приливные колебания уровня моря

К вопросу о максимальных приливных колебаниях уровня обращались довольно часто, и в частности в работах [1, 11, 13—14]. Однако согласия между авторами не наблюдается. Прежде всего, не было до конца понятно, как рассчитывать максимальные приливные колебания уровня. Для упрощения расчетов, но не строго, можно определять их как удвоенную сумму амплитуд четырех основных волн прилива. В теории приливных колебаний вряд ли возможен вариант с совпадением фаз колебаний всех волн, а именно так должно быть при равенстве значений максимальных амплитуд удвоенной сумме их амплитуд. На самом деле амплитуды и фазы модулируются нодальными параметрами. Предпочтительнее

использовать метод, предложенный Дуваниным [14], который состоит в расчете прилива на сутки путем сложения сизигийного прилива с тропическим с учетом их возраста и выборки экстремумов.

Более строгий способ расчета был предложен Владимирским [2] для восьми основных волн прилива. Впоследствии он был расширен Пересыпкиным [14] для учета большего числа значимых волн. В настоящее время вопрос о громоздкости вычислений больше не стоит, и экстремальные уровни выбираются прямо по расчету предвычисленного прилива на 19 лет с заданной дискретностью.

Для расчета необходимым условием является задание статистически значимых волн прилива. Поэтому оценки гармонических постоянных должны быть получены из анализа многолетних рядов наблюдений. Оценка значимости выделенных амплитуд волн прилива проводилась по оценке уровня шума и СКО остаточных рядов в приливной (данные наблюдений минус предвычисленные значения) полосе частот [6]. Поскольку при анализе прилива выделяются также волны, не являющиеся в сущности приливными, — годовая, полугодовая, третьгодовая и четвертьгодовая, то они, согласно принятой в мировой практике процедуре [18], также включаются в предвычисление прилива. Их включение можно рассматривать как способ учета сезонного хода уровня.

Приливы в Финском заливе, несмотря на их малость, все же имеют сезонный ход констант основных волн (давно известный для арктических морей [3]). Поэтому в предвычисление включались описывающие их второстепенные волны (только те, которые были статистически значимы). Наконец, включались значимые волны мелководных приливов. В основном число волн в пунктах составляло 28—38 (см. вариант 2 в табл. 3), и это зависело от уровня шума при разрешении гармоник в разных классах прилива, который определялся в основном длиной ряда.

В табл. 3 приведены результаты выборки экстремумов приливных колебаний уровня моря во всех пунктах за период 2015—2033 гг. с дискретностью 10 мин. При расчете нодальных параметров (редукционного множителя  $f$  и поправки фазы  $u$ ) включались волны от второй степени (члена) потенциала. Волны потенциала третьей степени не включались, так как по последним данным [3] они расходятся с теоретическими значениями. Подобный прием расчета приближенно соответствует формулам Дудсона для расчета нодальных значений волн. В процессе предвычисления нодальные параметры пересчитывались на каждый месяц года.

Для того чтобы можно было провести сравнение с ранее предложенными картами максимальных приливных колебаний уровня, были рассчитаны экстремальные значения без учета долгопериодных приливов (см. вариант 2 в табл. 3). При расчете средний уровень моря задавался равным нулю.

Сравнение с данными, приведенными в [10], показало, что значения максимумов и минимумов существенно расходятся с данными автора, приведенными в табл. 3. В Таллине по данным работы [10] минимум составил  $-10$  см, по данным автора  $-18$  см. В Ленинграде (Горный институт) по данным работы [10] экстремумы равны  $53$  и  $-38$  см, а по данным табл. 3 они составили  $23$  и  $-23$  см.

На рис. 4 представлена карта максимальных приливных колебаний в Финском заливе (без учета долгопериодных приливов — вариант 2).

Таблица 3

Экстремальные (наибольшие и наименьшие) значения уровня моря (см)  
за период 2015—2033 гг. в пунктах Финского залива по всем волнам (вариант 1)  
и без учета долгопериодных приливов (вариант 2)

Номер пункта	Пункт	Вариант 1				Вариант 2			
		Число волн	ВТУ*	НТУ**	Размах	Число волн	Мак	Мин	Размах
1	Ристна	44	19	-20	39	39	3,6	-2,7	6
2	Лехтма	36	13	-18	31	33	4,5	-3,3	8
3	Палдиски	41	19	-19	38	38	5,1	-4,4	10
4	Таллин	40	25	-18	43	35	6,1	-5,7	12
5	Кунда	24	31	-21	52	18	8,6	-7,0	16
6	Гогланд	41	28	-26	54	38	8,8	-7,2	16
7	Силламяе	29	18	-16	34	27	10,7	-9,1	20
8	Мощный	30	33	-26	59	28	10,7	-8,0	19
9	Нарва	34	26	-19	45	32	9,2	-7,1	16
10	Шепелево	36	22	-16	38	33	11,7	-8,6	20
11	Кронштадт	38	25	-25	50	32	12,2	-9,4	22
12	Ломоносов	41	33	-30	63	39	13,1	-10,3	23
13	Горный институт	42	23	-23	46	36	12,0	-10,0	22
14	Невская устьевая	41	33	-31	64	35	12,7	-9,4	22
15	Озерки	35	33	-29	62	30	11,9	-8,8	21
16	Приморск	37	34	-30	64	30	12,0	-9,2	21
17	Выборг	37	27	-23	50	31	10,1	-7,8	18
18	Хамина	43	26	-23	49	37	10,1	-8,0	18
19	Хельсинки	42	21	-20	41	37	6,1	-6,5	13
20	Ханко	36	18	-20	38	30	3,6	-4,9	8
21	Дегербу	34	12	-17	29	28	2,7	-1,9	5

\* Высота наивысшего возможного уровня.

\*\* Высота наинизшего возможного уровня.

В работе Альтшулера [1] приведена карта максимальных приливных колебаний уровня Балтийского моря. Он опирался на константы Магаарда и Краусса [17] и частично на собственные результаты обработки методом Дарвина данных наблюдений, выполненных в августе (в работе год обработки не указан и пункты не названы). Расчет производился по методике Дуванина, которая учитывает только основные восемь волн прилива или даже четыре главные волны (в работе информация на этот счет отсутствует). Согласно карте Альтшулера, приведенной также в [13], в Финском заливе величина максимальных колебаний (размах) возрастает от 5 см на входе до 20 см в вершине залива. Эти данные хорошо согласуются с расчетами автора по варианту 2 на качественном уровне (см. табл. 3). В количественном отношении есть существенные расхождения. Так, по линии Хельсинки — Таллин проходит изолиния 12—13 см (см. рис. 4), а не 6 см, как на карте Альтшулера. И далее к востоку возрастание размаха колебаний происходит быстрее.

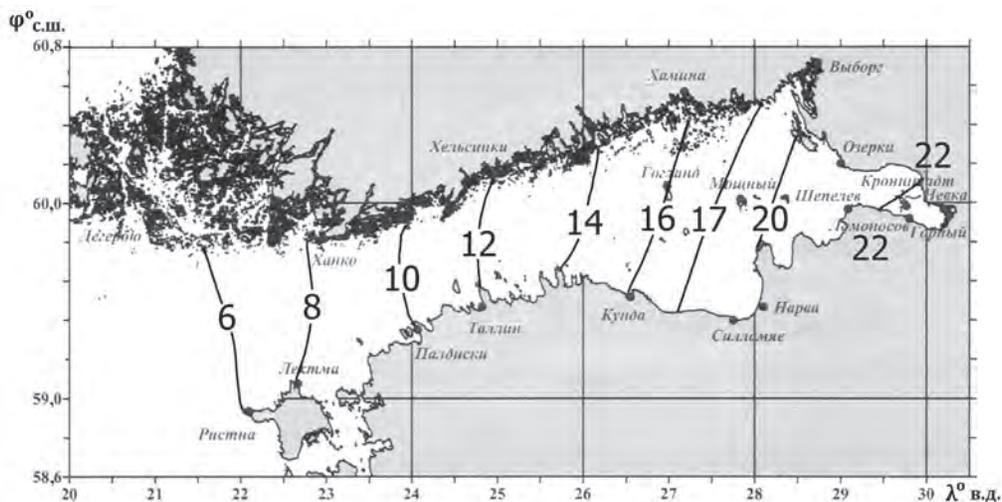


Рис. 4. Максимальные приливные колебания уровня моря (см)  
(без учета долгопериодных приливов — вариант 2).

Приведенная в Справочном издании [14] карта максимальных приливных колебаний уровня построена на основе удвоенной суммы амплитуд четырех волн прилива и в целом гораздо хуже карты Альшулера. Например, по данным табл. 1 для Гогланда удвоенная сумма амплитуд четырех волн равна 11 см. Величина (размах) максимальных колебаний по варианту 2 в Гогланде будет в действительности 16 см, а с учетом всех волн приливов достигнет 54 см (см. табл. 3).

Наконец, на рис. 5 представлена карта автора наибольших возможных один раз в 19 лет приливных колебаний уровня с учетом долгопериодных приливов, в которые включены волны, отражающие сезонные колебания (вариант 1, табл. 3).

В настоящей работе автор не рассматривает подробно вопрос о долгопериодных колебаниях и приливах в Финском заливе. Тем не менее остановимся на некоторых ключевых вопросах. Прежде всего, отметим, что обработка и анализ среднемесячных данных об уровне моря недостаточны для решения проблемы долгопериодных приливов. Во-первых, среднемесячные данные не эквидистантны, что приводит к ошибкам расчета констант гармоник. Во-вторых, по этим данным нельзя получить сведения о приливах с периодом месяц и менее. Поэтому в настоящей работе автор опирался в основном на среднесуточные данные, полученные с помощью применения фильтра нижних частот к ежечасным реализациям. К сожалению, на многих станциях в базе данных ГОИН длительность таких серий еще недостаточна для достоверного выделения всего спектра долгопериодных приливов.

В частности, нодальный прилив  $Mn$  по результатам анализа показал существенное расхождение с теоретической статической величиной (на широте  $60^\circ$  должен быть равен 1,1 см с фазой  $360^\circ$ ). Уровень шума вблизи периода этого прилива настолько высок, что даже при анализе среднемесячных данных для

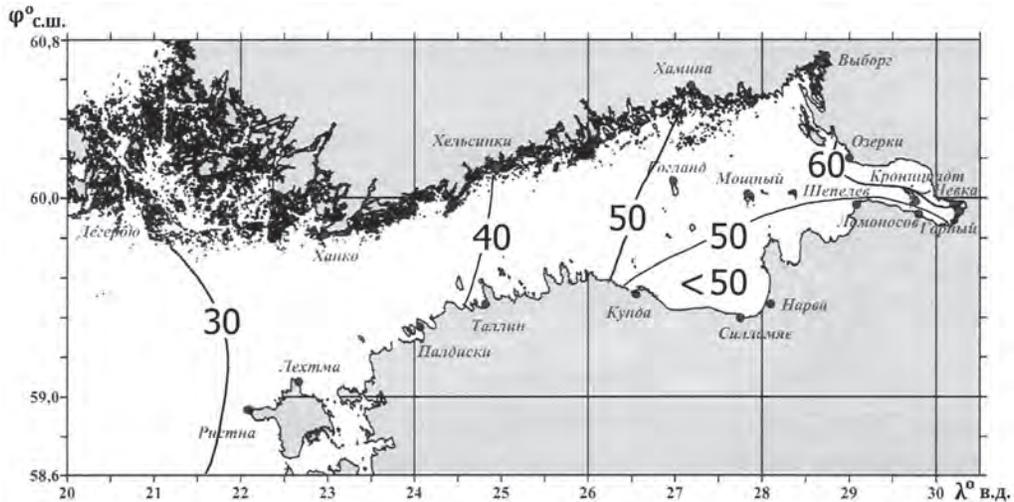


Рис. 5. Максимальные возможные приливные колебания уровня (см) (с учетом долгопериодных приливов — вариант 1).

Кронштадта за 76 лет за период 1936—2011 гг. (база данных ГОИН) амплитуда прилива оказалась ниже 95 %-ного доверительного интервала. Поэтому этот прилив на всех станциях не был включен в список долгопериодных волн (что приближенно может занижить оценку размаха на 2—3 см). Из группы приливов *Mm*, *Msf*, *Mf*, *Mtm*, *Msw* достоверные оценки были получены только для лунного месячного прилива *Mm* (среднее векторное значение для 16 станций равно 0,48 см, фаза составила 284°) и девятисуточного прилива *Mtm*, который имеет средние по данным для 11 станций значение 0,35 см и фазу 203°.

Что касается так называемых метеорологических приливов [18], формирующих сезонные колебания уровня моря, то здесь были получены достоверные результаты (выше 95 %-ного доверительного интервала) для гармоник *Sa*, *Ssa*, *Sqa*. При этом средние для Финского залива значения этих волн равны для гармоники *Sa* 13,8 см и фаза 294°, для гармоники *Ssa* 4,25 см и фаза 204° и для гармоники *Sqa* 1,86 см и фаза 223°. Третьегодовая гармоника *Sta* на большинстве станций по амплитуде была ниже доверительного интервала. Годовая гармоника в Финском заливе по этим значениям имеет максимум в октябре, а минимум в апреле. Влияние полугодовой и третьегодовой гармоники приводит к смещению максимума на декабрь.

Приведенные выше значения констант «сезонных» гармоник следует относить к периоду конца XX и начала XXI веков, так как в зависимости от периода осреднения их константы изменяются, что вызвано изменчивостью гидрометеорологического режима. По-видимому, оптимальным периодом обработки этих гармоник следует считать период 30 лет, принятый как основной для расчета климатических характеристик. Увеличение периода обработки до 40 лет и более, как рекомендуется в работе [8], будет приводить к уменьшению амплитуды гармоник,

так как годовая гармоника и ее обертоны не являются строго детерминированным сигналом, а относятся к квазистационарным процессам. В отношении приливов  $Mn$ ,  $Mm$ ,  $Msf$ ,  $Mf$ ,  $Mtm$ ,  $Msw$ , которые представляют строго детерминированный сигнал, увеличение периода обработки позволяет получить более устойчивые оценки.

Значения экстремальных уровней, полученные с учетом долгопериодных приливов, сравнивать не с чем. Имеется одна работа, где приведены экстремальные уровни для Таллина и Ленинграда [10]. В работе [6] отмечалось неверное определение констант прилива для Ленинграда и Таллина этими авторами. На расчет экстремальных уровней совершенно не влияет время углов положений волн: местное, поясное или специальные углы, но ошибки амплитуд, безусловно, влияют. Если же указанные авторы ошиблись только с переводом времени, то на результат это не повлияет.

Из рис. 5 видно, что размах наибольших возможных приливных колебаний в Финском заливе резко возрастает к востоку, достигая 60 см. Этот рост обусловлен в основном увеличением величины годовой волны. Представленные на рис. 4 и 5 данные свидетельствуют о необходимости учета приливных колебаний уровня в научных целях и для производства статистических расчетов при инженерных изысканиях.

### Сезонный ход амплитуды и фазы волны $M_2$ в Финском заливе

В работе [5] приводились предварительные данные о сезонной изменчивости прилива  $M_2$  на нескольких станциях в Финском заливе. Было показано, что разброс средних за месяц констант этой волны настолько большой, что для получения значимой зависимости требуются ряды значений за 30 лет и более. Вследствие близости амфидромии волны  $M_2$  к северной части Финского залива амплитуды этого прилива столь малы, что устойчивого годового хода констант здесь получить не удастся. Небольшое увеличение амплитуды волны  $M_2$  происходит в крайней восточной части залива, и поэтому здесь в средних значениях, полученных из средних за месяц оценок, сезонный ход проявляется. Тем не менее в целом вид и характер сезонного хода представляет только теоретический интерес.

На рис. 6 представлен сезонный ход амплитуды и фазы волны  $M_2$  в Финском заливе. Из рисунка видны общие черты годового хода амплитуды и фазы волны  $M_2$  для всех станций. Максимум амплитуды наблюдается в июле — августе (повышение на 10 % от среднего), а увеличение фазы происходит до мая — июня. Небольшое повышение амплитуды в октябре носит случайный характер и связано с ростом величины разброса в этот месяц; наиболее заметно оно в Шепелево, где ряд обработки самый короткий. Минимум амплитуды отмечается в феврале, а минимум фазы — в октябре — ноябре. Подобный вид сезонного хода констант волны  $M_2$  отличается от классического типа, наблюдаемого на акватории арктических морей [3]. Физический механизм, вызывающий сезонный ход волны  $M_2$  в Финском заливе, может быть комплексным и связан с изменчивостью не только гидрологических процессов, но также и атмосферных.

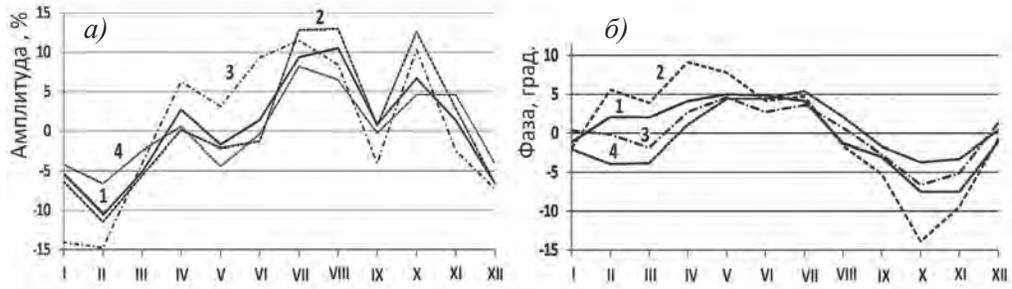


Рис. 6. Сезонный ход амплитуды (а) и фазы (б) волны  $M_2$  в Финском заливе.

1 — Кронштадт (34 года), 2 — Горный институт (34 года),  
3 — Выборг (31 года), 4 — Шепелево (19 лет).

### Многолетняя изменчивость амплитуд и фаз волны $M_2$

Предварительно была рассмотрена многолетняя изменчивость всех основных волн прилива в пунктах с длительными рядами их констант. Однако здесь представлена многолетняя изменчивость самых надежных результатов для волны  $M_2$ . Разброс средних годовых оценок суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  в два раза больше, чем у волны  $M_2$ . На рис. 7 представлен многолетний ход средних годовых оценок амплитуды и фазы волны  $M_2$  в Кронштадте (35 лет), Горном институте (35 лет), Выборге (31 год) и Шепелево (19 лет).

Оценка линейных трендов годовых оценок амплитуды и фазы волны  $M_2$  в этих пунктах показала следующее. В пунктах Кронштадт, Горный институт, Шепелево отсутствует значимый тренд в амплитуде (рис. 7 а). При этом наблюдается

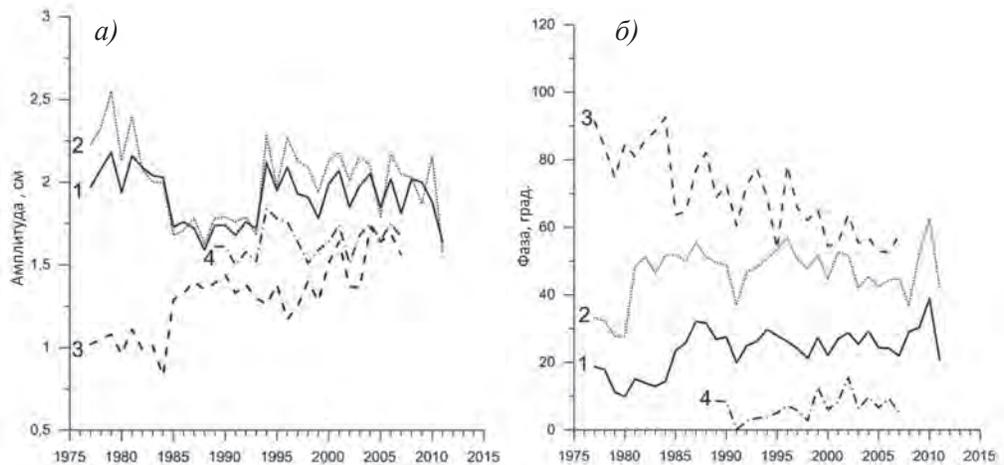


Рис. 7. Временной ход годовых оценок амплитуды (а) и фазы (б) волны  $M_2$ .

1 — Кронштадт, 2 — Горный институт, 3 — Выборг, 4 — Шепелево.

несущественное уменьшение амплитуды волны  $M_2$ : от  $-0,002$  см/год в Кронштадте до  $-0,04$  см/год на станции Горный институт, и его можно считать пренебрежимо малым. В Шепелево происходит несущественное увеличение амплитуды, равное  $0,0047$  см/год. Таким образом, однозначности результатов в оценке тренда амплитуды волны  $M_2$  для этих трех пунктов не получено.

В Выборге линейный тренд амплитуды волны  $M_2$  имеет значимый характер и составляет  $+0,019$  см/год. За период 19 лет увеличение амплитуды достигнет примерно  $0,37$  см, что находится на границе 95 %-ного доверительного интервала. В отношении линейного тренда фазы волны  $M_2$  получены более определенные результаты. В пунктах Кронштадт, Горный институт, Шепелево и Выборг наблюдается значимый линейный тренд. В первых трех пунктах происходит увеличение фазы волны  $M_2$  со скоростью  $+0,37^\circ$  в год в пункте Кронштадт и  $+0,23^\circ$  в год на станциях Горный институт и Шепелево. На станции Выборг за период 1977—2007 гг. отмечается уменьшение фазы со скоростью  $-0,955^\circ$  в год. При сохранении такой скорости изменение фазы волны  $M_2$  за 19 лет после 2007 г. составит  $18^\circ$ , что, возможно, потребует пересчета гармонических постоянных за очередной 19-летний цикл.

### Заключение

Большинство исследователей приливов Финского залива в XX веке опирались на недостаточно достоверные сведения о гармонических постоянных приливов [6]. При построении котидальных карт основных волн приливов, карт характера, максимальных значений и наибольших возможных значений прилива автор использовал новую, существенно более точную базу данных о гармонических постоянных для 21 пункта, что позволило получить более достоверные сведения о различных характеристиках приливов.

Вопрос о том, следует ли учитывать приливы в Финском заливе при инженерных изысканиях, уже не является дискуссионным, так как, по мнению автора, учет приливов на основе новых сведений позволяет получить наиболее достоверные статистические оценки в широком диапазоне колебаний уровня.

С помощью приведенных в работе карт основных волн приливов и общих сведений о долгопериодных приливах появилась возможность рассчитать приливные колебания уровня в любой части акватории Финского залива. Такие временные ряды могут представлять самостоятельный интерес, а также могут быть использованы для получения остаточных рядов (данные наблюдений минус результаты предвычислений).

По мнению автора работы, сезонная изменчивость приливов Финского залива представляет только теоретический интерес и нет необходимости в ее учете в практических целях вследствие малости самого эффекта.

Не получен однозначный ответ на очень важный вопрос о вековом ходе гармонических постоянных основных волн приливов. Можно сделать предположение о влиянии местных факторов на тренд амплитуды и фазы волны  $M_2$  в Выборге.

Как будет изменяться небольшой тренд фазы в пунктах Кронштадт, Горный институт, Шепелево, неясно. Ответ на этот вопрос может быть получен с помощью численного моделирования и определения конкретных гидрологических или атмосферных факторов, вызывающих тренд констант прилива.

В заключение хотелось бы выразить глубокую благодарность поколениям наблюдателей на постах российского побережья и островов Финского залива. Как показали результаты обработки данных этих наблюдений, все они имеют самое высокое качество в сравнении с данными, полученными для других окраинных морей России.

### Список литературы

1. *Альциулер В.М.* Максимальные приливные колебания Балтийского моря // Труды ГОИН. 1980. Вып. 152. С. 110—112.
2. *Владимирский Н.П., Стахевич В.С.* Руководство по обработке и предсказанию приливов. Л.: изд-во Гидрогр. управл. ВМФ СССР, 1941. 347 с.
3. *Войнов Г.Н.* Приливные явления в Карском море. СПб: изд-во Русского географического общества, 1999. 109 с.
4. *Войнов Г.Н.* Приливы Финского залива / В сб.: Материалы Первой научн. конф. СПбГУ «Год Финского залива — 2014». СПб. 2012. С. 57—62.
5. *Войнов Г.Н.* Способ расчета сезонной изменчивости основных волн приливов при их малой величине (на примере Балтийского моря) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 3 (93). С. 101—109.
6. *Войнов Г.Н.* Новые сведения о приливах в Финском заливе Балтийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2018. Т. 53. С. 83—96.
7. *Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А.* Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 596—609.
8. *Медведев И.П.* Сезонные колебания уровня Балтийского моря // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 42—54.
9. *Михайлов Ю.Д.* Оценка приливных колебаний уровня в Таллине и Кронштадте // Труды ГОИН. 1962. Вып. 69. С. 87—91.
10. *Перескоков А.И., Сидченко А.Н.* Приливные колебания уровня у восточного побережья Балтийского моря // Изв. ВГО. 1981. Т. 113, вып. 3. С. 264—268.
11. *Помыткин Б.А.* Приливо-отливные колебания уровня в Финском заливе // Сборник работ Ленингр. ГМО. 1977. Вып. 9. С. 154—160.
12. *Рундо А.М.* Приливо-отливные явления в Ботническом и Финском заливах // Бюлл. Российского гидрологического института. 1921. № 9. С. 8—10.
13. Справочник. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 1. Балтийское море. Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 175 с.
14. Справочное издание. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 3. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 450 с.
15. *Feistel R., Nausch G., and Wasmund N.* State and evolution of the Baltic Sea. 1952—2002. A detailed 50-year survey of meteorology and climate, physics, chemistry, biology and marine environment. Hoboken: Willey-Interscience, 2008. 703 p.
16. *Lisitzin E.* Die gezeiten des Finnischen meerbusens // Fennia. 1944. B. 68. No. 2. 19 s.
17. *Magaard L. and Krauss W.* Spektren der Wasserstandsschwankungen der Ostsee im Jahre 1958 // Kieler Meeresforsch. 1966, B. 22, h. 2. S. 155—162.
18. *Pugh D.T.* Tides, surges and mean sea-level. A handbook for engineers and scientists. New York: J. Willey. 1987. 472 p.
19. *Witting R.* Tidvattnen Ostersjon och Finska Viken // Fennia. 1911. V. 29. No. 2. 84 p.

## КОГДА НАСТУПИТ БЕЗЛЕДНЫЙ РЕЖИМ РЕГИОНОВ АРКТИКИ?

*В.Н. Малинин<sup>1</sup>, П.А. Вайновский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru

<sup>2</sup> ООО «Прогноз»

Рассмотрены особенности межгодовой вариабельности и возможных изменений в текущем столетии максимальной (март) и минимальной (сентябрь) площади распространения морского льда (ПРМЛ) в различных регионах Арктики и Северного полушария в целом за период 1979—2017 гг. по спутниковым данным. Впервые выполнен сравнительный анализ трендов на основе введения безразмерного индекса тренда, который позволяет сравнивать ПРМЛ, значительно различающиеся по абсолютной величине не только для различных регионов, но даже в сезонном ходе для одного и того же региона. Представлены оценки выхода на безледный режим в сентябре разных регионов на основе экстраполяции линейных и нелинейных трендов за период 1979—2017 гг. Для Северного полушария выход на безледный режим ожидается в 2074 г., для Арктического бассейна — в 2076 г.

*Ключевые слова:* Арктика, площадь морского льда, индекс тренда, безледный режим Арктики, температура воздуха.

## WHEN WILL ICE-FREE REGIME OF DIFFERENT ARCTIC REGIONS COME ON?

*V.N. Malinin<sup>1</sup>, P.A. Vainovsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University

<sup>2</sup> LLC “Prognoz”

The article describes the features of interannual variability and possible changes of the maximum (in March) and the minimum (in September) sea ice extent in different Arctic regions and the regions in the northern hemisphere in the current century according to satellite data for 1979—2017 period. For the first time, a comparative analysis of trends has been carried out based on inclusion of dimensionless trend index. It allows comparing sea ice extents which significantly differ in absolute value not only for different regions, but even in the seasonal course for the same region. Estimates of the time of the beginning of the ice-free period in September are presented based on the extrapolation of linear and non-linear trends for 1979—2017. In general, the ice-free period is expected in 2074 in the northern hemisphere, in the Arctic basin - in 2076. This can occur when the global air temperature increases by 1.85 °C compared with 1979.

*Keywords:* Arctic, sea ice extent, trend index, ice-free Arctic regime, air temperature

### Введение

Известно, что климат Арктики теплеет гораздо быстрее, чем климат на планете в целом. Средняя годовая температура в Арктике с 1900 г. повысилась примерно на 2,5 °C, в то время как в целом на земном шаре — примерно на 1 °C, причем в последние 30 лет отмечается ускорение повышения температуры в Арктике по сравнению с глобальной температурой. Такое явление, получившее название полярного усиления, формируется за счет положительных обратных связей между процессами, обеспечивающими повышение приземной температуры воздуха

в Арктике [2]. В результате площадь морского льда в Арктике стремительно уменьшается. Возможно, площадь современного ледяного покрова является минимальной за последние примерно 1500 лет [15]. Арктика является богатейшей кладовой природных ресурсов, и для их освоения необходима разработка долговременных (на длительную перспективу) прогнозов климатических характеристик. Таким образом, вопрос о том, когда Арктика полностью очистится от морского льда, становится крайне актуальным. Очевидно, это произойдет, прежде всего, в сентябре, когда площадь морского льда в годовом ходе достигает наименьших размеров.

Построение детерминированных прогнозов на длительную перспективу представляется очень сложным делом из-за недостаточности наших знаний об изменчивости природных процессов. Обычно для этого используются климатические сценарии МГЭИК, на основе которых рассчитываются оценки изменений глобального климата до 2100 г. с помощью комплекса (ансамбля) моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Наиболее широкое распространение такие модели получили в рамках проектов СМIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3) и СМIP5, результаты которых использовались соответственно в Четвертом [14] и Пятом [13] оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изучению климата (МГЭИК). При этом прогностические результаты, рассчитанные по отдельным моделям, характеризуются значительными расхождениями [8, 18].

Неопределенность оценок климатических прогнозов весьма значительна. По глобальной температуре воздуха на 2100 г. она составляет 4,5 °С, но еще больше неопределенность прогностических оценок климатических параметров для Арктики. Например, разброс прогнозных оценок года, когда в летний период может исчезнуть морской лед в Арктике, составляет более 70 лет (ближайший 2030 г.). Из-за значительных расхождений в получаемых результатах обычно принято рассчитывать средние значения параметров по всему комплексу климатических моделей, мерой неопределенности которых служат среднеквадратические ошибки на каждом шаге, или выбирать «лучший» сценарий и «лучшую» модель.

В работе [17] представлены результаты прогноза сентябрьской ледовитости Арктики по комплексу из 13 климатических (IPCC AR4) моделей в рамках проекта СМIP3 на 2100 г., которые свидетельствуют об огромном разбросе как диагностических, так и прогностических оценок ледовитости. Особенно заметным неудовлетворительное описание изменений площади морских льдов (ПМЛ) становится после 2000 г. Темпы уменьшения площади морских льдов существенно занижаются по сравнению с данными наблюдений. В результате даже в 2100 г. климатические модели не выходят на безледный режим в летний период.

В Пятом отчетном докладе МГЭИК [13] приводятся результаты моделирования сентябрьской ледовитости с использованием в рамках СМIP5 более 40 моделей для четырех климатических сценариев, которые также свидетельствуют об огромном разбросе прогностических оценок площади морского льда на 2100 г. Если по «агрессивному» сценарию RCP8.5 в 2100 г. возможен выход на безледный режим, то по наиболее мягкому сценарию RCP2.6, близкому к современному климату, после 2040 г. происходит стабилизация площади морского льда на уровне около 4 млн км<sup>2</sup>.

Полученные прогностические оценки площади морского льда в дальнейшем неоднократно уточнялись. В работе [8] приводится сравнение результатов моделирования площади морских льдов в рамках проектов СМIP3 и СМIP5 в XX и XXI веках для всей Арктики, Центральной Арктики и Баренцева моря. Модели ансамбля пятого поколения СМIP5 «агрессивного» сценария RCP8.5 гораздо лучше по сравнению с моделями третьего поколения СМIP3 воспроизводят средние значения и тренд наблюдаемых значений площади морского льда в Арктике. К концу XXI века, согласно СМIP3, площадь морского льда может составить 2 млн км<sup>2</sup>, в то время как аналогичная оценка по ансамблю СМIP5 выходит на нуль, т. е. на безледный режим. Однако неопределенность средней оценки площади морских льдов, характеризуемой значением  $\pm\sigma$ , достигает для СМIP3  $\pm 4$  млн км<sup>2</sup> и для СМIP5  $\pm 2$  млн км<sup>2</sup>. При этом 90 %-ный доверительный интервал для среднего значения ПМЛ по ансамблю СМIP5, определяемый по среднеквадратическому отклонению, составляет  $\pm 75$  лет. Такой разброс сводит на нет результаты климатических прогнозов.

Очевидно, в дополнение к климатическим моделям необходима разработка альтернативных способов долговременного прогноза ледовитости, в качестве которых могут быть использованы статистические методы. Например, если линейные (нелинейные) тренды описывают значительную часть дисперсии исходных рядов, то в предположении стационарности (неизменности) климатических условий, т. е. при сохранении их в будущем, нетрудно получить прогнозные оценки климатической характеристики практически на любой заданный год.

Цель данной работы состоит в экспертном прогнозе выхода на безледный режим минимальной (сентябрьской) ледовитости разных регионов Арктики и Северного полушария в целом на основе простого статистического метода трендов.

### Материалы и методы

В настоящее время наиболее точные данные о характеристиках морского льда можно получать с помощью спутниковых измерений радиометром SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) в микроволновом диапазоне, который фиксирует данные о морской поверхности при наличии облачности и любой освещенности, в том числе в течение полярной ночи. Основными параметрами, получаемыми со спутников, являются площадь морского льда (ПМЛ) и площадь распространения (протяженности) морского льда (ПРМЛ). ПМЛ представляет собой интегральную площадь океана, покрытую морскими льдами, а ПРМЛ — это площадь внутри границы 15%-ной сплоченности (концентрации) морских льдов [8]. Величину ПРМЛ, отнесенную к общей рассматриваемой площади (моря, региона, океана) и выраженную в процентах, называют ледовитостью.

Суточные и среднемесячные значения ПМЛ (Sea Ice Area) и ПРМЛ (Sea Ice Extent) находятся в свободном доступе на сайте NASA <https://neptune.gsfc.nasa.gov/csb/index.php?section=59> для девяти различных районов Арктики и всего Северного полушария с октября 1978 г. по настоящее время. В настоящей работе использовались среднемесячные данные ПРМЛ за период 1979—2017 гг. Способы и

алгоритмы обработки спутниковых данных представлены в работах [11, 12]. С учетом общедоступности непрерывно пополняемых спутниковых данных это делает их важнейшим источником фактической информации о современных тенденциях в состоянии ледяного покрова [2, 10, 16]. При этом оценки изменчивости и статистических трендов параметров ледяного покрова являются самыми точными и достоверными по сравнению с другими климатическими характеристиками [8].

Хотя результаты расчетов трендов ледовитости по спутниковым данным за различные периоды времени носят массовый характер, количественные оценки их сравнения отсутствуют. Дело в том, что для анализа используется коэффициент тренда  $a_1$ , который зависит от площади морского льда. Однако, поскольку площадь морского льда сильно варьирует не только для разных регионов, но даже в сезонном ходе для одного и того же региона, количественное сравнение трендов ледовитости практически невозможно.

В настоящей работе для этой цели вводится индекс тренда, который представляет собой отношение размаха тренда ( $a_1 n$ ) к его среднему значению ( $X_{cp}$ ) и выражается в условных единицах [6]:

$$I_{tp} = 100 a_1 n / X_{cp}, \quad (1)$$

где  $a_1$  — коэффициент уравнения линейного тренда ( $X = a_1 t + a_0$ ), характеризующий скорость изменения  $X$  в единицу времени  $t$ ;  $n$  — длина ряда. Индекс тренда — безразмерная величина, что очень удобно для сравнения характеристик разной размерности и даже одной размерности, но значительно различающихся по абсолютной величине. Это полностью относится к спутниковым данным ПРМЛ.

На рис. 1 приводится годовой ход оценок  $a_1$  и  $I_{tp}$  для Баренцева и Карского морей за период 1979—2017 гг. Можно отметить малую изменчивость значений  $a_1$  и, наоборот, высокую изменчивость значений  $I_{tp}$ . Если максимальная оценка

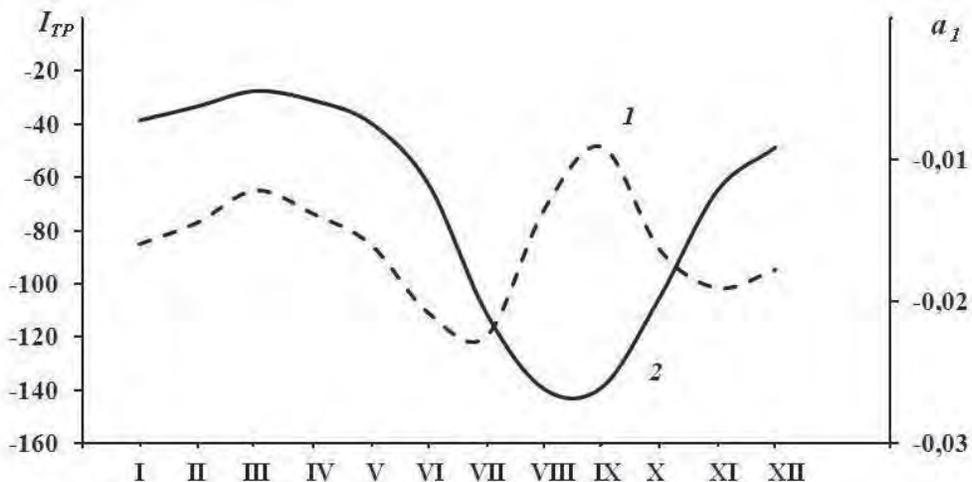


Рис. 1. Годовой ход коэффициентов тренда  $a_1$  (1) и индексов тренда  $I_{tp}$  (2) для акватории Баренцева и Карского морей, осредненный за период 1979—2017 гг.

$a_1$  превышает минимальную ровно в два раза, то для оценки  $I_{тр}$  это отношение составляет более пяти. Нетрудно видеть, что при почти одном и том же значении  $a_1 = -0,013 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup>/год (март и август) оценки  $I_{тр}$  составляют  $-27,4$  и  $-139,9$ , т. е. отличаются друг от друга в пять раз.

### Анализ трендов

Статистические оценки трендов ПРМЛ для марта и сентября за период 1979—2017 гг. для разных регионов Северного полушария приводятся в табл. 1. В соответствии с критерием Стьюдента при  $\alpha = 0,05$  получим приближенное критическое значение  $R^2_{кр} \approx 0,10$ . При  $R^2 > R^2_{кр}$  тренд считается значимым [5]. Из табл. 1 видно, что коэффициенты тренда  $a_1$  для Северного полушария ( $S_{NH}$ ) и Арктического бассейна ( $S_{AB}$ ) на порядок больше значений  $a_1$  для других северных регионов в сентябре, однако индексы тренда заметно меньше, чем в некоторых регионах Арктики.

Таблица 1

Характеристики линейного тренда ПРМЛ ( $10^5$  км<sup>2</sup>/год)  
для разных регионов Северного полушария в за период 1979—2017 гг.

Акватория	Сентябрь			Март		
	$R^2$	$a_1$	Индекс тренда	$R^2$	$a_1$	Индекс тренда
Баренцево и Карское моря	0,37	-0,091	-138,5	0,55	-0,121	-27,4
Берингово море	0,72	-0,002	-151,6	0,00	-0,001	-0,6
Канадский Арктический архипелаг	0,18	-0,038	-34,9	0,00	-0,000	-0,00
Моря Лабрадор и Баффина	0,22	-0,012	-59,4	0,12	-0,056	-16,1
Гренландское море	0,18	-0,037	-46,3	0,65	-0,088	-41,2
Гудзонов залив	0,51	-0,016	-125,6	0,01	-0,000	-0,00
Арктический бассейн	0,73	-0,649	-48,4	0,14	-0,003	-0,02
Охотское и Японское моря	----	---	---	0,31	-0,097	-34,3
Залив Св. Лаврентия	---	---	---	0,12	-0,021	-39,0
Северное полушарие	0,77	-0,845	-51,8	0,74	-0,386	-10,0

Примечание.  $R^2$  — доля дисперсии исходного ряда, описываемая трендом.

В сентябре все тренды являются значимыми. С увеличением ПРМЛ случайные колебания нивелируются, дисперсия временных рядов, как правило, уменьшается. Поэтому максимальный коэффициент детерминации отмечается для  $S_{NH}$  и  $S_{AB}$ . Минимальные оценки  $R^2$  имеют место для ПРМЛ Канадского Арктического архипелага и Гренландского моря. В марте для нескольких регионов (Берингово море, Канадский Арктический архипелаг, Гудзонов залив) тренды ледовитости оказываются незначимыми. Максимальный коэффициент детерминации тренда опять-таки свойствен  $S_{NH}$ . Быстрее всего значение  $I_{тр}$  уменьшается в марте в Гренландском море и заливе Св. Лаврентия. Практически неизменным остается ледяной покров на акватории Канадского Арктического архипелага, Гудзонова залива, а также Берингова моря. Все тренды в марте по величине  $I_{тр}$  значительно уступают

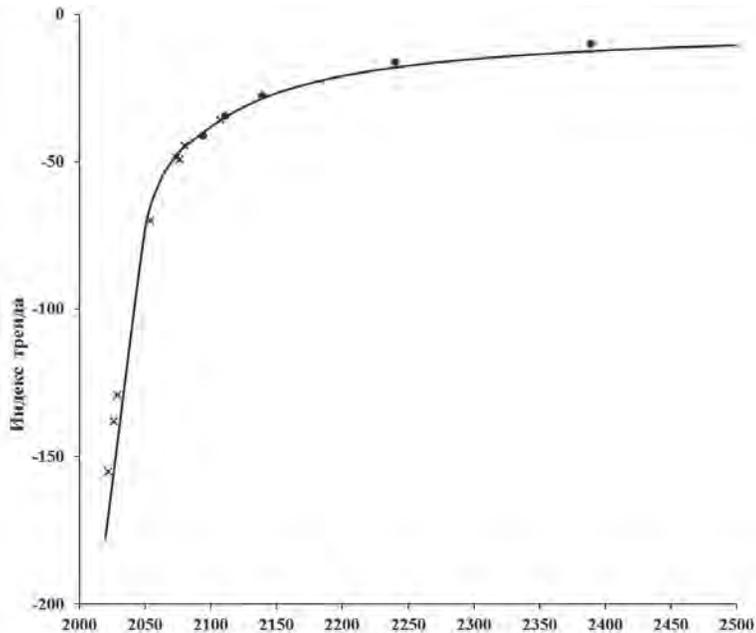


Рис. 2. Зависимость года выхода на безледный режим площади распространения морского льда в разных регионах в сентябре (кружки) и марте (крестики) от индекса тренда.

трендам в октябре. Особенно велики различия в Баренцевом и Карском морях, для которых индекс тренда в сентябре больше, чем в марте, на 108 единиц. Только для Гренландского моря значения индекса тренда примерно одинаковы.

Максимальные оценки индекса тренда отмечаются для сентябрьских значений ледовитости Берингова моря ( $I_{тр} = -151,6$ ) и Баренцева, Карского морей ( $I_{тр} = -138,5$ ). Максимальная оценка индекса тренда в марте наблюдается для Гренландского моря ( $I_{тр} = -42,1$ ). Для  $S_{AB}$  и  $S_{NH}$  индексы тренда в сентябре близки (48,4 и 51,8), однако в марте значение  $I_{тр}$  для  $S_{AB}$  близко к нулю, т. е. Арктический бассейн практически полностью покрывается льдами.

Индексам тренда можно дать четкую интерпретацию. Обратимся к рис. 2, на котором приводится распределение года выхода на безледный режим ( $N_{бр}$ ) в сентябре и марте в зависимости от значимых индексов тренда  $I_{тр}$ . Нетрудно видеть, что чем больше индекс тренда, тем быстрее наступает безледный режим, а с уменьшением  $I_{тр}$  период выхода на  $N_{бр}$  резко увеличивается, причем  $N_{бр} \rightarrow \infty$  при  $I_{тр} \rightarrow 0$ . В результате аппроксимации данной зависимости была получена простая гиперболическая формула вида

$$N_{бр}(t) = -3481,1/I_{тр} + 3,41. \quad (2)$$

Здесь  $N_{бр}(t) = N_{бр} - 2000$ . Формула (2) точно аппроксимирует зависимость между  $N_{бр}$  и  $I_{тр}$  ( $R^2 = 0,99$ ), поэтому средняя квадратическая ошибка мала ( $\sigma_N = 4,1$  года). Если, например,  $I_{тр} = -50$ , то  $N_{бр} = 73 + 2000 = 2073 \pm 4$  г.

## К оценке выхода на безледный режим регионов Северного полушария в сентябре

Рассмотрим оценки выхода на безледный режим регионов Северного полушария в сентябре на основе трендового подхода. Как уже было указано выше, в его основе лежит предположение стационарности (неизменности) климатических условий за весь период времени, т. е. климатический режим в период 1979—2017 гг. не должен изменяться вплоть до выхода на безледный режим. Если же произойдет очередное «полярное усиление», то рассчитанные оценки выхода на безледный режим будут отклоняться в сторону более ранних сроков.

Помимо линейного тренда, будем использовать также нелинейный тренд в виде полинома второй степени. В табл. 2 приводятся годы выхода на безледный режим для разных регионов. Как известно, величина тренда — весьма изменчивая характеристика, которая полностью зависит от длины ряда. При ее изменении тренд может появляться, исчезать, менять свою интенсивность и форму [5]. В связи с этим для проверки степени устойчивости линейного тренда был выполнен следующий эксперимент. В качестве начального периода был взят промежуток времени 1979—2010 гг., для которого рассчитывался линейный тренд ПРМЛ для всех регионов. Затем путем добавления каждый раз по одному году были рассчитаны тренды вплоть до 2017 г.

Итак, был получен набор из восьми трендов. Из него была выбрана его максимальная и минимальная оценки. Например, если для  $S_{NH}$  максимальный тренд отмечался за период 1979—2012 гг. ( $a_1 = -0,890$ ), то минимальный тренд в период 1979—2011 гг. ( $a_1 = -0,815$ ). Расхождение между ними составляет 9 %. Именно для этих трендов дополнительно рассчитывался выход на безледный режим ПРМЛ, оценки которого даны в табл. 2. При условии максимального тренда выход на ноль в Северном полушарии происходит в 2066 г., в случае минимального тренда — в 2081 г., т. е. расхождение составляет всего 15 лет.

Таблица 2

Оценки выхода на начальный год безледного режима ледовитости различных регионов Северного полушария на основе аппроксимации линейного и нелинейного тренда

Акватория	Линейный тренд			Нелинейный тренд
	По минимальному тренду	1979—2017 гг.	По максимальному тренду	
Баренцево и Карское моря	2032	2026	2024	2018
Берингово море	2027	2022	2019	2027
Канадский Арктический архипелаг	2094	2107	2114	2060
Моря Лабрадор и Баффина	2064	2062	2053	2050
Гренландское море	2089	2080	2070	2046
Гудзонов залив	2032	2029	2019	----
Арктический бассейн	2088	2076	2073	2042
Северное полушарие	2081	2074	2066	2040

Аналогичный расчет был выполнен и для регионов Арктики. Из табл. 2 видно, что минимальное расхождение в оценках выхода на безледный режим

наблюдается для Баренцева, Карского и Берингова морей (восемь лет), а максимальное расхождение — для Канадского Арктического архипелага и Гренландского моря (20 и 19 лет). Это свидетельствует о достаточной устойчивости оценок линейного тренда за период 39 лет. Однако неопределенность во втором случае заметно выше, так как экстраполяция тренда выполняется на более длительный период времени.

Одновременно оценки выхода на безледный режим были рассчитаны по формуле (2). Сравнение их с оценками, приведенными в табл. 3, показало, что среднее расхождение равно нулю, а максимальное расхождение составляет 4 года, т. е. формула (2) может быть использована непосредственно для долговременного прогноза ПРМЛ.

Следует отметить, что распределение трендов опосредованно учитывает физико-географические особенности регионов и особенности воздействия на ПРМЛ различных гидрометеорологических факторов, которые к настоящему времени довольно хорошо изучены ([3, 4, 7, 9] и др.). Если бы они были одинаковыми, то тренды для всех регионов совпадали бы и выход на безледный режим стал бы одновременным.

Выход на безледный режим по нелинейному тренду повсюду за исключением Берингова моря происходит раньше. Наибольшее ускорение (47 лет) отмечается для Канадского Арктического архипелага, наименьшее — для Баренцева и Карского морей (восемь лет). Нет выхода на безледный режим в Гудзоновом заливе. Дело в том, что после 2000 г. произошла определенная стабилизация ледяного покрова залива, в результате чего полиномиальная кривая получила тенденцию вверх. Ближайшие годы покажут, насколько устойчивой является такая стабилизация. Заметим, что близкая оценка выхода на безледный режим  $S_{NH}$  по нелинейному тренду за период 1979—2014 гг. получена в работе (2035 г.) [1]. На качественном уровне можно говорить о том, что ускорение за счет нелинейного тренда может приближенно показывать, как будет вести себя ледяной покров при увеличении темпов потепления в Арктике.

При использовании трендового подхода к прогнозу года выхода на безледный режим ПРМЛ регионов Арктики есть ряд неопределенностей. Помимо сохранения в будущем текущего климатического режима, прогностические оценки зависят от того, насколько точно тренд описывает дисперсию исходного ряда. Очевидно, что чем больше коэффициент детерминации тренда, тем выше должна быть точность прогностических оценок ПРМЛ. Если для ПРМЛ Северного полушария и Арктического бассейна точность описания дисперсии трендами в сентябре можно считать вполне удовлетворительной, то для некоторых регионов (Гренландское море, море Лабрадор и др.) коэффициенты детерминации невелики. Возникает вопрос, являются ли для таких регионов полученные прогностические оценки выхода на безледный режим случайными?

Рассмотрим данный вопрос на примере наиболее интересных морей — Гренландского и Баренцева с Карским, для которых коэффициент детерминации тренда в сентябре равен 0,18 и 0,37 соответственно. Как известно, межгодовая изменчивость временного ряда может быть выражена суммой трех компонентов: трендом,

циклическим и случайным компонентами. Случайный компонент поддается прогнозированию на один-два шага, что нас не устраивает. Если циклический компонент представить суммой значимых гармоник, то их несложно рассчитать на более длительный срок.

Было выявлено, что в сентябрьской ледовитости Баренцева и Карского морей присутствуют четыре значимые гармоники (9,5; 6,3; 4,75; 3,2 года), суммарный вклад которых в дисперсию временного ряда составляет 33,3 % (табл. 3). При этом максимальный вклад (9,4 %) дают гармоники с периодом 9,5 и 4,75 года. Если гармоники не являются случайными, то они должны повторяться с тем же периодом и в другие месяцы. В ледовитости Карского и Баренцева морей за март отмечаются три значимые гармоники, вклад которых в дисперсию равен 23 %, причем две из них (6,3 и 4,75 года) повторяются и в сентябре. В предположении постоянства данных гармоник во времени выполнен модельный расчет (рис. 3), согласно которому выявлено, что с их учетом выход на безледный режим БКМ происходит в 2021 г., т. е. отклонение от тренда составляет пять лет и, по существу, не выходит за рамки ошибки тренда.

Таблица 3

Оценки вклада в дисперсию временного ряда  
сентябрьских значений гармоник и тренда для ПРМЛ  
Баренцева и Карского морей и Гренландского моря за период 1980—2017 гг.

Баренцево и Карское моря				Гренландское море			
Сентябрь		Март		Сентябрь		Март	
$\tau$	$B, \%$	$\tau$	$B, \%$	$\tau$	$B, \%$	$\tau$	$B, \%$
9,50	9,4	19,0	8,2	12,67	9,7	6,33	8,7
6,33	7,3	6,33	7,6	9,50	9,0	—	—
4,75	9,4	4,75	7,2	5,43	16,2	—	—
3,17	7,2	—	—	4,75	13,0	—	—
Тренд	37,3	—	54,8	—	18,4	—	65,0
Сумма	70,6	—	77,8	—	66,3	—	73,7

*Примечание.*  $\tau$  — период гармоники (число лет),  $B$  — вклад гармоники в дисперсию исходного ряда (%).

Что касается Гренландского моря, то, как и следовало ожидать, там в межгодовой изменчивости ПРМЛ в сентябре основные гармоники играют значительную роль, описывая около 50 % дисперсии временного ряда (см. табл. 3). При этом наибольшая гармоника (4,75 года) лишь незначительно по своему вкладу уступает тренду. Для Гренландского моря также выполнен модельный расчет выхода на безледный режим с различными вариантами учета гармоник. Было выявлено, что за счет большого «веса» короткопериодных гармоник (5,4 и 4,7 года) отмечаются большие отклонения прогнозистической кривой ПРМЛ от линии тренда. При этом до 2080 г., когда линия тренда пересекает нулевую отметку, происходит пять переходов через эту отметку — самый ранний в 2055 г. Естественно, такой прогноз не имеет смысла. Однако если использовать только «длиннопериодные» гармоники (12,7 и 9,5 года), то результаты заметно улучшаются (рис. 4). В этом случае выход

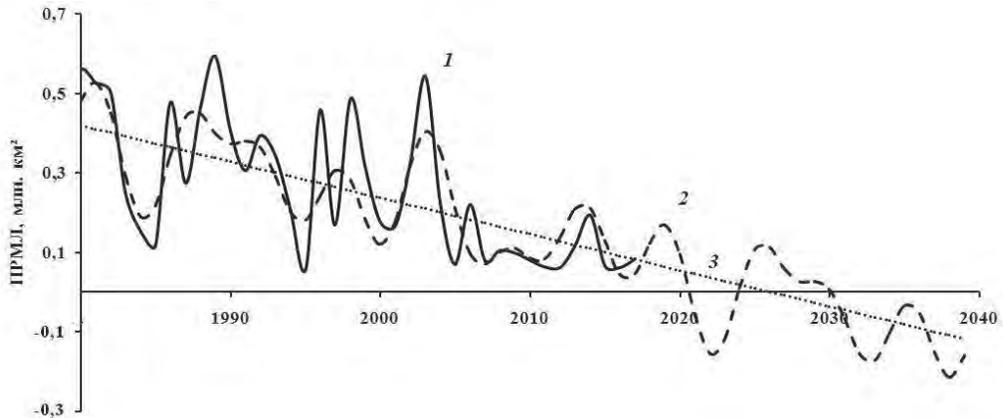


Рис. 3. Результаты экстраполяции сентябрьской ПРМЛ для акваторий Баренцева и Карского морей.

1 — фактические значения ПРМЛ,  
2 — расчетные значения ПРМЛ (тренд плюс гармоники 9,5; 6,3 и 4,7 года), 3 — линия тренда.

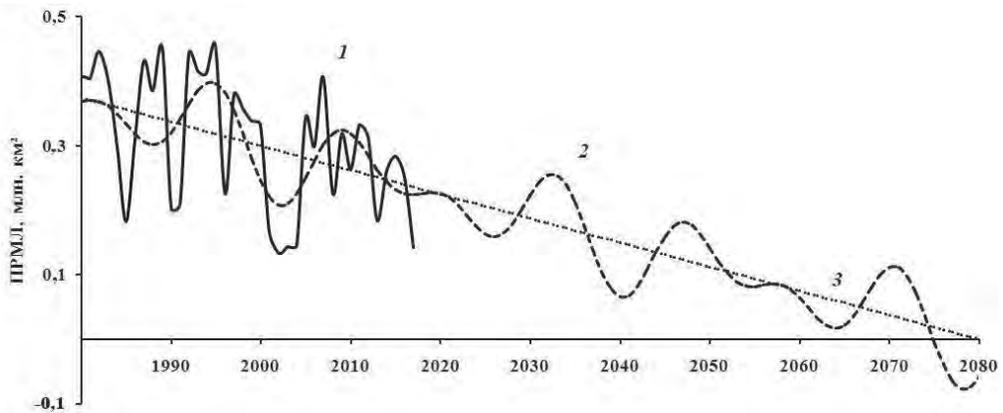


Рис. 4. Результаты экстраполяции сентябрьской ПРМЛ для акватории Гренландского моря.

1 — фактические значения ПРМЛ,  
2 — расчетные значения ПРМЛ (тренд плюс гармоники 12,7 и 9,5 года), 3 — линия тренда.

на безледный режим происходит в 2075 г., т. е. отклонение от тренда (пять лет) не выходит за рамки ошибки тренда.

Итак, оценки неопределенности, связанные с малыми коэффициентами детерминации тренда ПРМЛ в некоторых регионах Арктики, показывают, что учет гармоник в расчетах выхода на безледный режим в сентябре не выходит за рамки среднеквадратической ошибки тренда.

## Заключение

В настоящей статье рассмотрены особенности возможных изменений в текущем столетии максимальной (март) и минимальной (сентябрь) ПРМЛ в различных регионах Арктики и Северного полушария ( $n = 10$ ) по спутниковым данным за период 1989—2017 гг. Впервые выполнен сравнительный анализ трендов на основе введения безразмерного индекса тренда  $I_{\text{тр}}$ . Необходимость введения  $I_{\text{тр}}$  связана с тем, что оценки ПРМЛ значительно различаются по абсолютной величине не только для разных регионов, но даже в сезонном ходе для одного и того же региона. Показано, что индексы тренда имеют четкую интерпретацию. Чем больше индекс тренда, тем быстрее наступает безледный режим, и, наоборот, с его уменьшением время выхода на безледный режим резко увеличивается, причем  $N_{\text{бр}} \rightarrow \infty$  при  $I_{\text{тр}} \rightarrow 0$ .

Выполнена с высокой точностью ( $R^2 = 0,99$ ) аппроксимация зависимости  $I_{\text{тр}}$  от  $N_{\text{бр}}$  гиперболической формулой. Показано, что максимальные оценки индекса тренда отмечаются для сентябрьских значений ледовитости Берингова моря ( $I_{\text{тр}} = -151,6$ ) и Баренцева, Карского морей ( $I_{\text{тр}} = -138,5$ ). В марте максимальная оценка индекса тренда наблюдается для Гренландского моря ( $I_{\text{тр}} = -42,1$ ).

Представлены оценки выхода на безледный режим в сентябре на основе экстраполяции линейных и нелинейных трендов за период 1979—2017 гг. С учетом того что величина тренда сильно зависит от длины ряда, была выполнена проверка устойчивости линейного тренда. Для этого выбирались оценки максимального и минимального тренда за последние восемь лет (с 2010 по 2017 г.) и для них определялся выход на безледный режим. Показано, что для всех регионов расхождения в оценках выхода на безледный режим являются малыми и составляют от восьми до 20 лет, что свидетельствует о достаточной устойчивости оценок линейного тренда за период 39 лет.

Быстрее всего очищение от морского льда по линейному тренду может произойти в Беринговом море (2022 г.), затем в Баренцевом и Карском морях (2026 г.), а наиболее длительно — на акватории Канадского Арктического архипелага (2107 г.). В целом для всего полушария выход на безледный режим ожидается в 2074 г., в Арктическом бассейне — в 2076 г. Это может произойти при повышении глобальной температуры воздуха на  $1,85$  °С по сравнению со значением за 1979 г. При этом даже для регионов, где коэффициент детерминации тренда ПРМЛ мал, трендовый подход к оценке выхода на безледный режим в сентябре оказывается достаточно успешным, поскольку учет гармоник не выходит за рамки среднеквадратической ошибки тренда.

Прогностические оценки ПРМЛ получены в предположении постоянства во времени тренда ледовитости Арктики, т. е., по сути, при сохранении настоящего климатического режима в будущем. Однако в случае повышения темпов потепления, что, вообще говоря, вполне реально, выход на безледный режим Арктики летом может произойти раньше.

## Список литературы

1. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5—19.
2. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Ретина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50—65.
3. 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.
4. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб: Гидрометеиздат, 2000. 91 с.
5. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 407 с.
6. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3—11.
7. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера — арктические льды — океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 231—248.
8. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // Лед и Снег. 2017. Т. 57, № 1. С. 77—107.
9. 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.
10. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 28—41.
11. Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L., Gloersen, P., Comiso, J. C., and Zwally, H. J. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 15 803 —15 814.
12. Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L., DiGirolamo, N., and Ivanoff, A. Intersensor calibration between F13 SSMI and F17 SSMIS for global sea ice data records // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 9. P. 233—236, doi:10.1109/LGRS.2011.2166754, 2012.
13. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
14. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
15. Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years // Nature. 2011. V. 479. P. 509—512.
16. Parkinson C.L. Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-Yr Trends // J. Climate. 2014. V. 27. P. 9377—9382.
17. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Research Letters, VOL. 34, L09501, doi: 10.1029/2007GL029703, 2007.
18. Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W.N. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. doi:10.1029/2012GL052676.
19. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2015. V. 373. P. 20140159.

## ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА СООБЩЕСТВА МОРСКИХ РЫБ В СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

*А.С. Кровнин, С.П. Мельников, А.И. Никитенко, Г.П. Мурый*

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, akrovnin@vniro.ru

Потепление вод в Североатлантическом регионе с 1996 г. обусловило существенные сдвиги границ ареалов основных промысловых рыб. Усиление адвекции более теплых и соленых атлантических вод в Баренцево и Норвежское моря привело к продвижению трески и пикши в северо-восточном направлении. Ареалы путассу и сельди в Норвежском море расширились во всех направлениях. Ареал окуня-клювача в море Ирмингера расширился на юго-запад в море Лабрадор в направлении вод с отрицательными аномалиями. Рассмотрены вероятные сценарии климатических изменений и связанных с ними изменений в распределении запасов промысловых рыб.

*Ключевые слова:* Североатлантический регион, изменения климата, распределение промысловых рыб.

## CLIMATE CHANGE IMPACT ON FISH COMMUNITIES IN THE NORTH ATLANTIC REGION

*A.S. Krovnin, S.P. Melnikov, A.I. Nikitenko, G.P. Moury*

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography

Warming of the North Atlantic basin since 1996 has resulted in significant shifts of boundaries of major commercial fish areas. The strengthening of advection of warmer and more saline Atlantic waters into the Barents and Norwegian seas has led to northeastward progression of NE Arctic cod and haddock. At the same time, areas of blue whiting and herring in the Norwegian Sea have spread in all directions. The redfish area in the Irminger Sea has extended to the southwest in the Labrador Sea, in waters with negative temperature anomalies. Possible scenarios of climatic changes and associated changes in distribution of commercial fish stocks are considered in the paper.

*Keywords:* North Atlantic basin, climate change, distribution of main commercial fishes.

### Введение

Северная Атлантика и прилегающие арктические воды относятся к регионам интенсивного рыболовства с ежегодным выловом промысловых рыб около 8 млн т (рис. 1). Увеличение интереса к этому региону в последние два десятилетия связано с его ресурсным потенциалом и наблюдаемыми и ожидаемыми климатическими изменениями. Важнейшими показателями климатических изменений в регионе являются изменение термического режима вод и связанное с ним сокращение ледового покрова в Арктике.

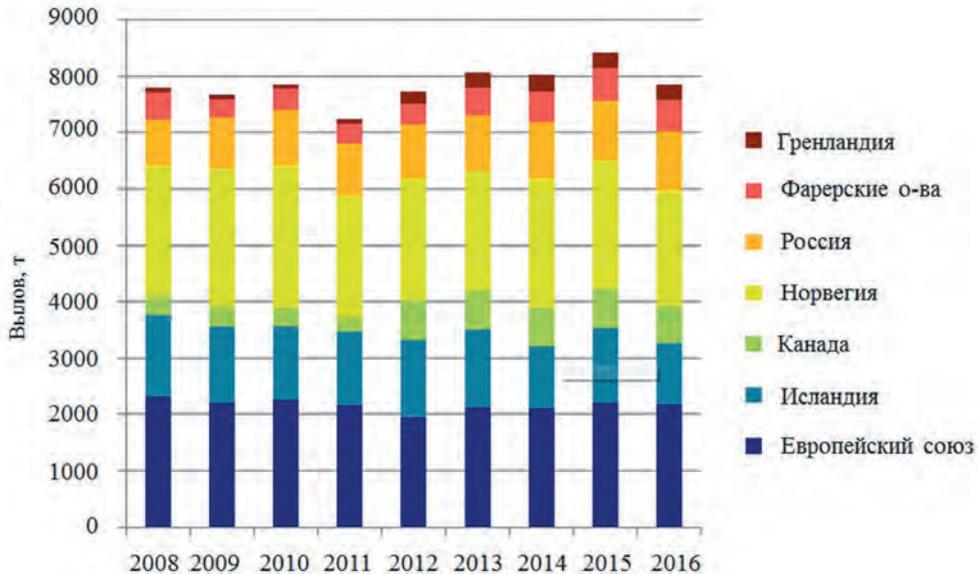


Рис. 1. Международный вылов в Северной Атлантике в 2008—2016 гг.

Установление положительной фазы Атлантической многодекадной осцилляции (АМО) с середины 1990-х годов сопровождалось потеплением слоя поверхностных вод. Одновременно произошло уменьшение интенсивности и сокращение площади субполярного циклонического круговорота (СЦК), что также способствовало потеплению Норвежского и Баренцева морей [2, 12, 13]. По мнению авторов указанных работ, основной причиной уменьшения интенсивности СЦК стало ослабление вертикальной зимней конвекции в море Лабрадор со второй половины 1990-х годов, обусловленное ростом атмосферного давления в центре исландского минимума.

В основе пищевой цепи лежит первичная продукция, контролирующая объем энергии и пищи, доступной высшим трофическим уровням, включая рыбу. Региональные модели для Северо-Восточной Атлантики (СВА) [8] показывают снижение чистой первичной продукции, а следовательно, и снижение объема вылова в большинстве подрайонов СВА. Глобальные климатические модели также предполагают общее снижение первичной продуктивности для большей части СВА. Весеннее цветение фитопланктона в арктических районах в настоящее время ограничено присутствием морского льда и сильной вертикальной стратификацией вод. Поскольку потепление Арктики сопровождается уменьшением ледовитости и появлением обширных свободных от льда акваторий, к середине текущего столетия продукция арктического фитопланктона может увеличиться и воспроизвести условия, наблюдающиеся в настоящее время в Северо-Восточной Атлантике.

Потепление поверхностных вод в Северо-Восточной Атлантике спровоцировало серьезные биогеографические сдвиги, включающие увеличение в приполярных

районах числа теплолюбивых видов зоопланктона и, соответственно, уменьшение числа холодолюбивых видов [4]. Все зоопланктонные сообщества характеризовались когерентными долговременными сдвигами, но темпы этих биогеографических сдвигов были удивительно высокими. Умеренно теплолюбивые, псевдоокеанические виды сместились к северу примерно на  $10^\circ$  широты (от  $52$  до  $62^\circ$  с.ш.,  $10^\circ$  з.д.), или на  $23$  км/год в период с 1958 по 2005 г. [5]. Величина смещения соответствовала темпам смещения некоторых изотерм по направлению к Северному полюсу. Описанные сдвиги обусловили увеличение разнообразия каланоидных копепод в США.

Анализ 50 видов рыб в Северо-Восточной Атлантике показал, что реакция 70 % из них на потепление проявлялась в изменениях в распределении и численности [17]. В частности, численность теплолюбивых видов с меньшим размером тела увеличилась, в то время как численность холодолюбивых видов с большей длиной тела уменьшилась. В Баренцевом море сдвиг от более холодолюбивого к теплолюбивому сообществу рыб, когда арктическое сообщество, характеризовавшееся полярным триглопсом, черным палтусом и липарисами, сместилось на север и было замещено в основном бореальными видами (треской, пикшей, камбалой-ершом), произошел между 2004 и 2012 гг. [9].

Целью настоящей работы является анализ влияния современных изменений климата на разные по экологии места обитания сообщества морских рыб в Североатлантическом регионе.

### Материалы и методы

Анализ межгодовой изменчивости пространственного распределения рыб в Северной Атлантике выполнен на основе промыслово-статистической информации из Центра системы мониторинга рыболовства и связи Федерального агентства по рыболовству, которая формируется на основе суточных судовых донесений (ССД) [3]. Используются промысловые данные по окуню-клювачу моря Ирмингера за 1982—2015 гг., треске, пикше, сельди и путассу Северо-Восточной Атлантики за 1995—2017 гг. Для каждого из исследуемых видов промысловые данные осреднены по периодам в зависимости от особенностей межгодовой динамики их распределения.

Для анализа динамики пространственного распределения трески и пикши выполнены расчеты географических центров их промысловых скоплений по формулам

$$\varphi_{centr} = \frac{\sum \varphi_i c_i}{\sum c_i}, \quad \lambda_{centr} = \frac{\sum \lambda_i c_i}{\sum c_i},$$

где  $\varphi_{centr}$  и  $\lambda_{centr}$  — соответственно широта и долгота центроида,  $\varphi_i$  и  $\lambda_i$  — широта и долгота точек в  $i$ -м квадрате,  $c_i$  — суммарный вылов рыб в  $i$ -м квадрате [1].

С учетом отчетливой дифференциации распределения нагульных скоплений трески и пикши анализ межгодовой динамики распределения их скоплений выполнен по трем районам: северо-западному, северо-восточному и южному.

Океанологическая информация включает среднемесячные данные о температуре и солености воды на стандартных горизонтах в узлах регулярной сетки с шагом  $1^\circ$  по широте и долготе (от поверхности до дна) из базы данных EN4.0.2 [11, 15]. Их среднемесячные аномалии были рассчитаны относительно базового периода 1981—2010 гг. Поскольку основной российский вылов пелагических и донных рыб был получен в период нагула, рассчитанные аномалии термохалинных характеристик вод были осреднены за период с мая по ноябрь каждого года. Для разных видов рыб использован наиболее показательный океанографический параметр, представляющий собой аномалии температуры или солености. Для донных видов рыб были использованы данные о придонных температуре воды и солености. Для пелагических видов рыб значения аномалий термохалинных характеристик взяты для горизонтов основного распределения их уловов: сельди — 150 м, путассу — 200 м.

### Результаты

Как отмечалось выше, недавнее заметное потепление в Северной Атлантике и северных морях привело к существенным изменениям границ районов для большинства промысловых рыб. Реакция промысловых рыб на потепление была разнонаправленной. На основе данных об уловах и океанологической информации за 1982—2017 гг. были выделены три группы промысловых видов в зависимости от их реакции на потепление.

### Донные виды

Основной российский промысел донных рыб (северо-восточные арктические треска и пикша) ведется преимущественно на акватории Баренцева моря. Начиная со второй половины 1990-х годов отмечается генеральное расширение нагульного ареала трески к северу на  $4\text{--}5^\circ$  широты (рис. 2).

Причиной этого расширения стало усиление адвекции в Баренцево море более теплых и соленых атлантических вод. Анализ данных о распределении уловов позволил выделить три основных района донного промысла: северо-западный, северо-восточный и южный (рис. 3). Межгодовая динамика положения центров скоплений трески для этих выделенных районов свидетельствует о том, что с потеплением (и осолонением) вод северо-западная граница нагульного ареала сдвинулась далеко на север от архипелага Шпицберген, а ее северо-восточная граница — ближе к архипелагу Земля Франца-Иосифа и к западному побережью архипелага Новая Земля. Первоначальной причиной выявленных изменений в распределении нагульных скоплений трески стало ослабление СЦК [2, 6, 7, 12], обусловившее усиление притока атлантических вод в Северо-Восточную Атлантику и далее на восток и северо-восток. Если в 1995—1998 гг. аномалии солености в придонном слое исследуемой акватории были отрицательными (от  $-0,04$  до  $-0,02$  ‰), то к 2015—2017 гг. они увеличились в среднем до  $0,04$  ‰. Наиболее значительное увеличение (до  $0,08$  ‰) отмечалось в западной части Баренцева моря с максимумом значений в 2012—2017 гг. в водах, прилегающих

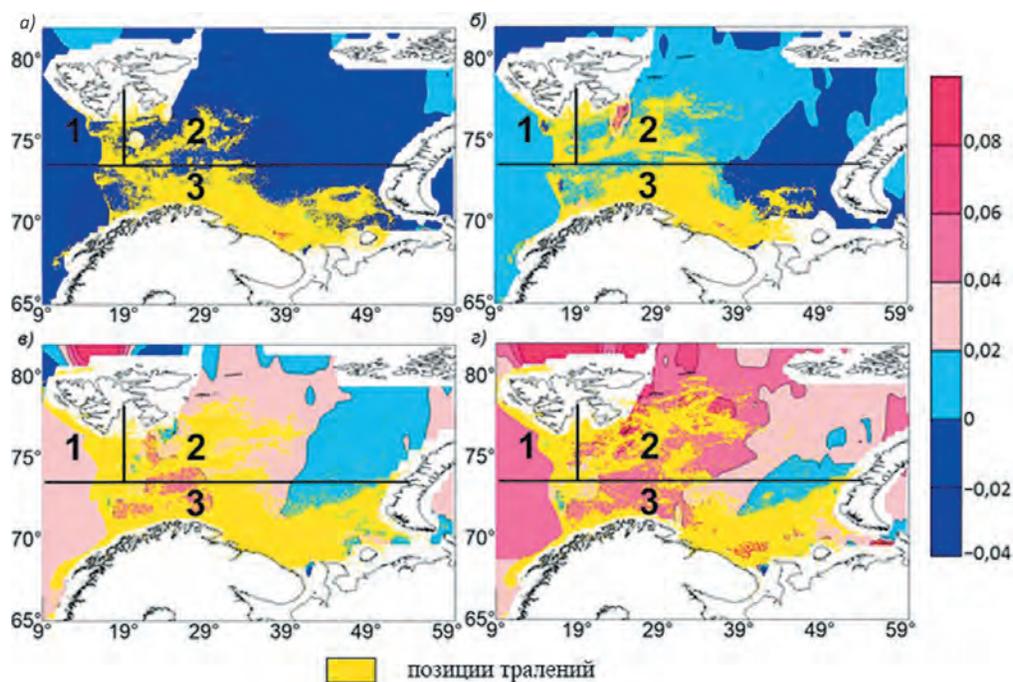


Рис. 2. Распределение тралений северо-восточной арктической трески и аномалий солёности (‰).  
 а) 1995—1998 гг., б) 1999—2002 гг., в) 2003—2011 гг., г) 2012—2017 гг.  
 1 — северо-западный район, 2 — северо-восточный район, 3 — южный район.

к архипелагу Шпицберген. В двух других районах нагульной миграции трески аномалии солёности возросли не столь значительно, как на северо-западе моря, составив 0,02—0,04 ‰.

Вышеописанные океанологические процессы в Северо-Восточной Атлантике обусловили схожие изменения в характере распределении северо-восточной арктической пикши (рис. 4, 5).

### *Пелагические виды*

В отличие от трески и пикши в случае пелагических видов (норвежская весенне-нерестующая сельдь и путассу), которые облавливаются преимущественно в Норвежском море, районы и схемы промысла расширились во всех направлениях. В холодные и умеренные годы (вторая половина 1990-х годов) российский промысел путассу был сосредоточен в центральной и южной частях Норвежского моря, где аномалии солёности на горизонте 200 м составляли около  $-0,03$  ‰. В начале 2000-х годов район промысла значительно продвинулся на северо-восток — до  $75^{\circ}$  с.ш.,  $20^{\circ}$  в.д., где аномалии солёности оставались на уровне 1996—2000 гг.

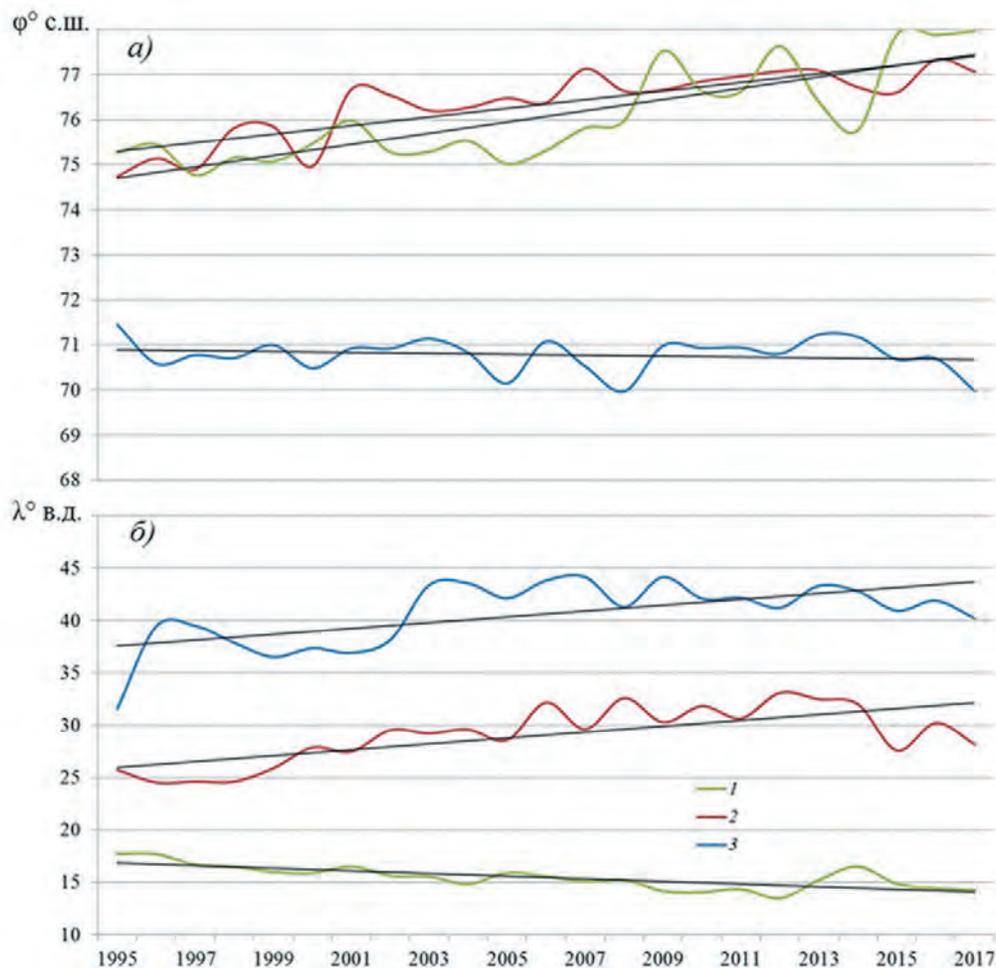


Рис. 3. Изменение положения географических центров скоплений северо-восточной арктической трески по районам.

1 — северо-западный район, 2 — северо-восточный район, 3 — южный район.

В то же время наблюдалось расширение границ промысла в юго-западном направлении вплоть до банки Поркьюпайн [14], где аномалии солености составляли в среднем 0,05 ‰. Отмеченные изменения в характере распределения нагульных скоплений были связаны, по мнению авторов, с более чем двукратным ростом (с 5,5 до 12,2 млн т) общего запаса путассу и созданием благоприятных условий среды для нагула рыб. После 2006 г. граница области нагула расширилась до моря Ирмингера на юго-западе и Гренландского моря на северо-западе, в водах с аномалией солености до 0,05 ‰ (рис. 6).

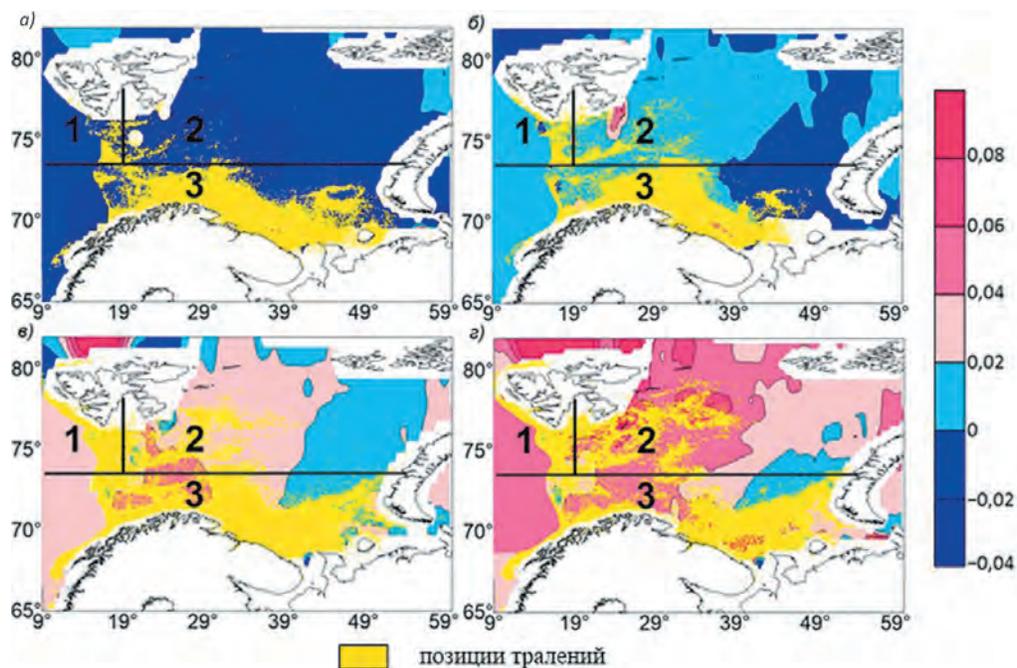


Рис. 4. Распределение тралений северо-восточной арктической пикши и аномалий солёности (‰).

а) 1995—1998 гг., б) 1999—2002 гг., в) 2003—2011 гг., г) 2012—2017 гг.

1 — северо-западный район, 2 — северо-восточный район, 3 — южный район.

Смещение нагульного ареала сельди в период с 1995 по 2015 г. также происходило в целом во всех направлениях при таких же океанологических условиях, как и в случае путассу. Однако резкое снижение уровня пополнения запаса сельди после 2006 г. привело к уменьшению ее численности, биомассы и в конечном итоге к сокращению площади нагульного ареала более чем два раза (рис. 7).

### *Глубоководные пелагические виды*

Для третьей группы глубоководных пелагических видов рыб, представленных в данной статье окунем-клювачом моря Ирмингера, изменения границ ареала под воздействием климата лучше всего проявляются в поле температуры воды и ее аномалий в различных слоях обитания этого вида. В случае окуня-клювача в отличие от рассмотренных выше видов границы нагульного ареала смещались в направлении вод с отрицательными аномалиями, сопряженными с центром СЦК.

На рис. 8 приведено распределение аномалий температуры воды и суммарных уловов окуня в трех диапазонах глубины (0—400, 400—600 и 600—1000 м) в весенне-летний (май — август) сезон 1982—1985, 1999—2006 и 2014—2015 гг. В наиболее холодный период первой половины 1980-х годов промысловые

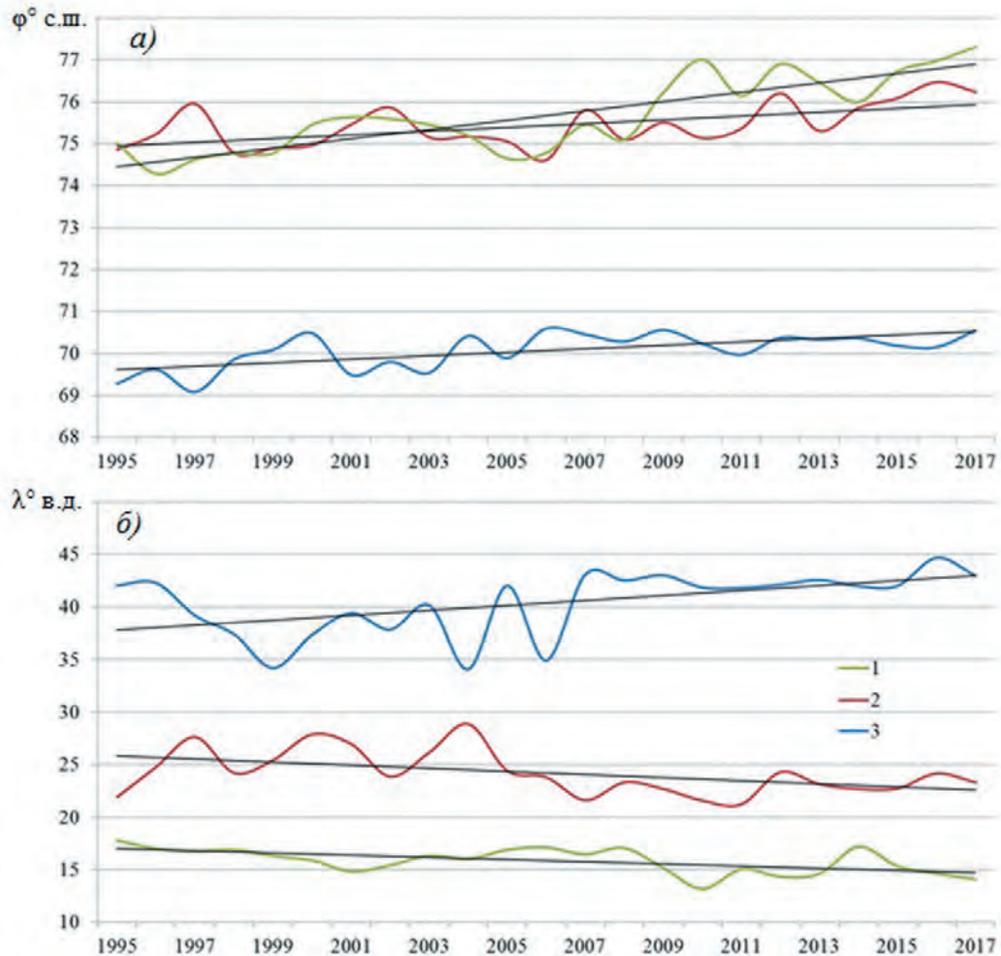


Рис. 5. Изменение положения географических центров скоплений северо-восточной арктической пикши по районам.

1 — северо-западный район, 2 — северо-восточный район, 3 — южный район.

скопления окуня распределялись в верхнем 400-метровом слое северной и центральной частей моря Ирмингера при слабых отрицательных температурных аномалиях — от  $-0,1$  до  $-0,3$  °C (рис. 8 а). Потепление вод, начавшееся во второй половине 1980-х годов, привело к перераспределению скоплений окуня не только в пространстве, но и по вертикали. В период максимального потепления 1999—2006 гг. положительные аномалии более  $0,8$ — $1,1$  °C в слое 0—400 м наблюдались практически на всей акватории моря Ирмингера, тогда как в районе основного промысла в море Лабрадор их значения не превышали  $0,4$  °C (рис. 8 з). В то же время на северо-востоке моря Ирмингера основной промысел окуня велся на глубине более 600 м при температуре воды, близкой к норме (рис. 8 е).

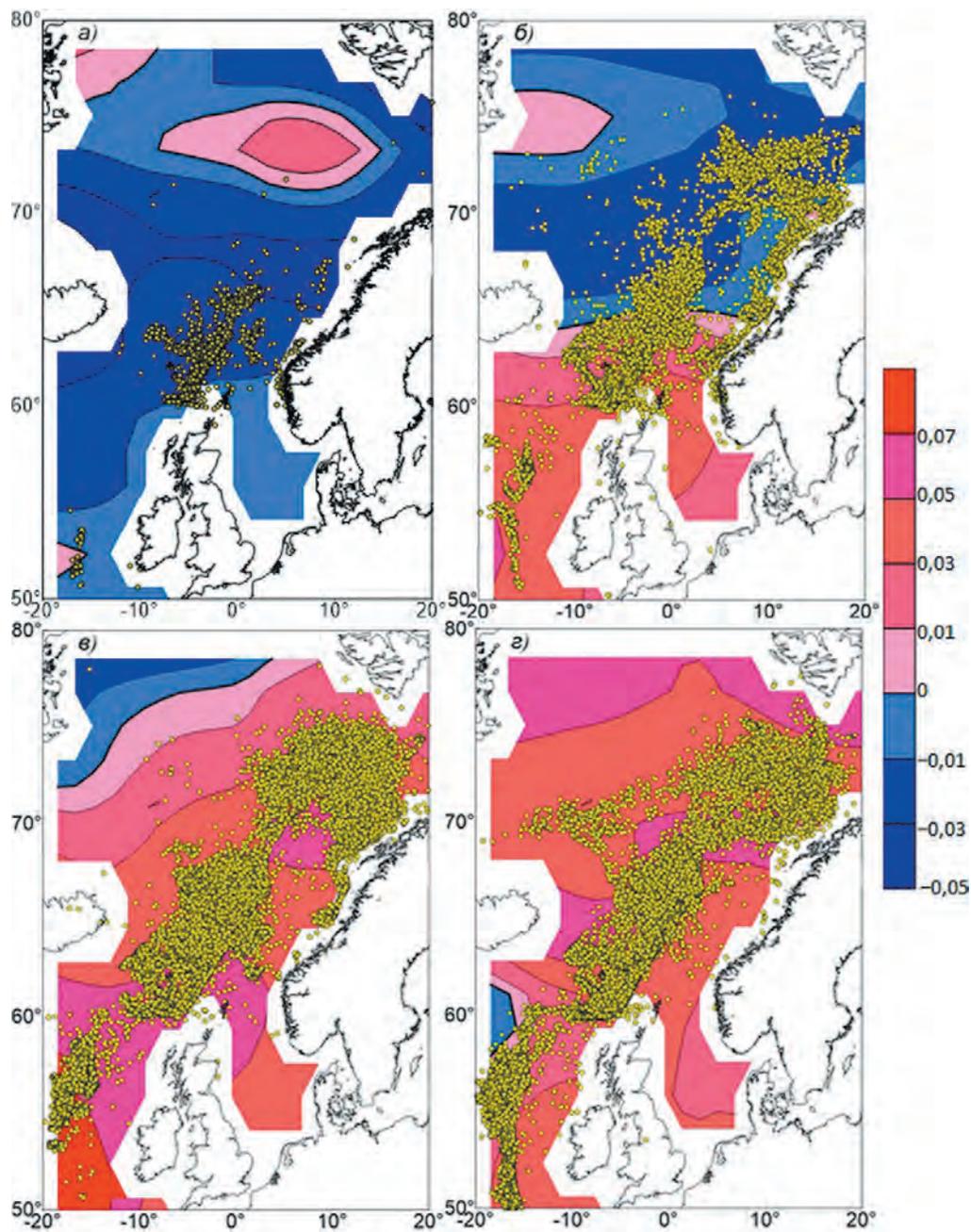


Рис. 6. Распределение тралений (позиции показаны желтыми кружками) путассу и аномалий солености (‰).

а) 1995 г., б) 1996—2000 гг., в) 2001—2005 гг., г) 2006—2017 гг.

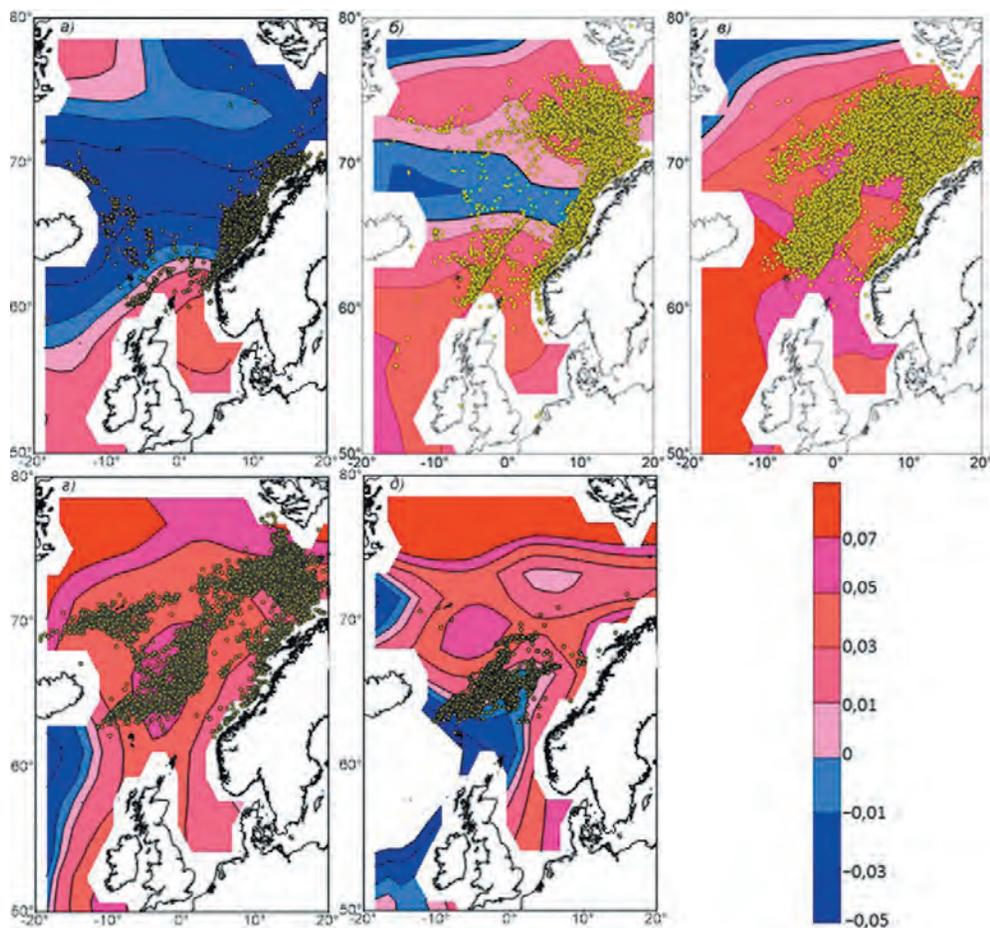


Рис. 7. Распределение тралений (позиции показаны желтыми кружками) норвежской весенне-нерестующей сельди и аномалий солёности (%).  
 а) 1995—1996 гг., б) 1997—2002 гг., в) 2003—2010 гг., г) 2011—2015 гг., д) 2016—2017 гг.

В последующие семь лет характер распределения аномалий температуры существенно не изменялся. Однако наметилась тенденция к уменьшению их значений. При этом отмечалось увеличение интенсивности промысла окуня в промежуточном слое (400—600 м). В 2014—2015 гг. интенсивность охлаждения вод на всей акватории района исследований возросла (рис. 8 ж, з, и). Похолодание вод в море Ирмингера сопровождалось расширением акватории, в пределах которой термические условия во всей 1000-метровой толще вод были близки к норме. Одновременно на фоне наблюдавшихся изменений в термическом режиме вод в слое 0—400 м отмечалось смещение промысловых концентраций из моря Лабрадор в море Ирмингера в традиционный район нагула.

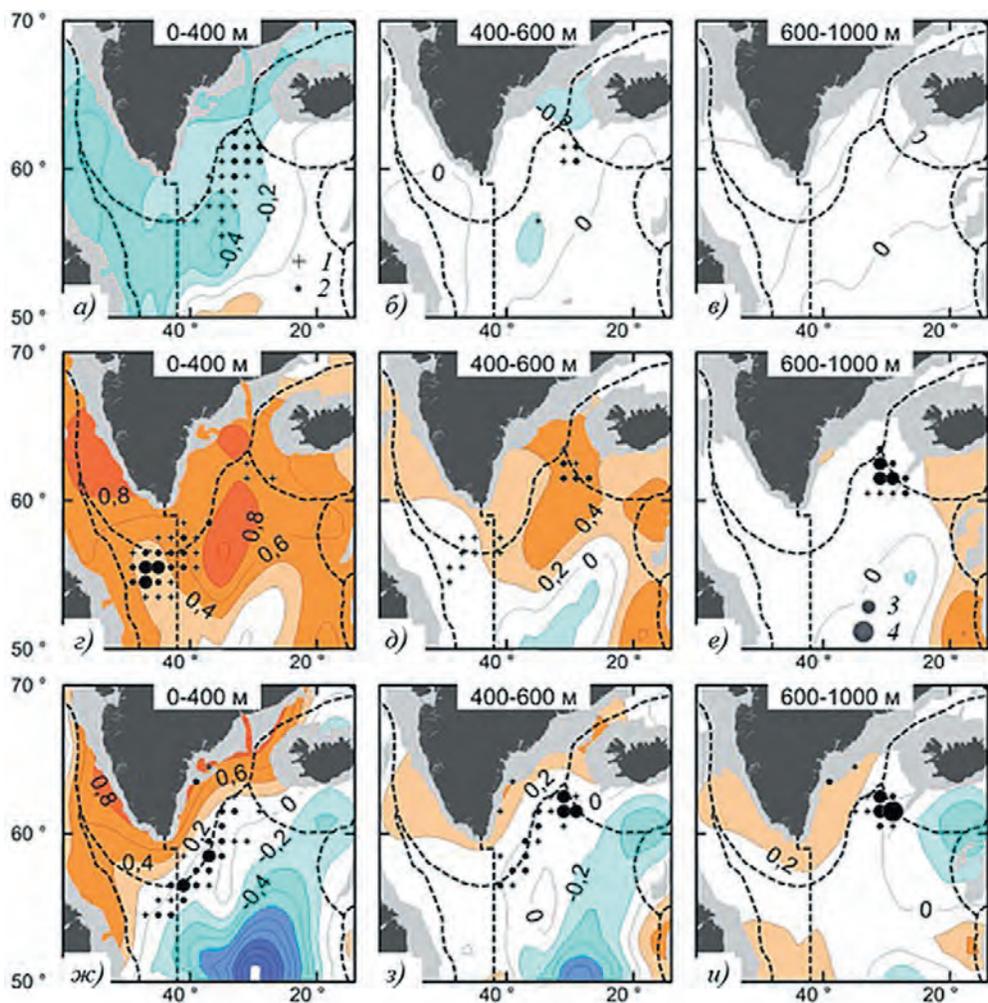


Рис. 8. Распределение аномалий температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) в период май — август и общий вылов окуня в морях Ирмингера и Лабрадор в 1982—1985 гг. (а — в), 1999—2006 гг. (з — е), 2014—2015 гг. (жс — и).

Штриховыми кривыми показаны границы 200-мильных ИЭЗ и граница между НЕАФК и НАФО.  
1) 1—100 т; 2) 100—1500 т; 3) 1500—10000 т; 4) 10000—100000 т.

### Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии наблюдающихся в Североатлантическом бассейне изменений климата на распределение промысловых видов рыб, обитающих практически во всей толще вод — от приповерхностных слоев до придонных. Происходящие в Северной Атлантике и прилегающих арктических морях изменения как открывают новые возможности для рыболовства,

так и порождают новые вызовы. В этой связи рассмотрим наиболее вероятные сценарии климатических изменений, а также характера распределения запасов и их промысла.

Результаты моделирования показывают, что при различных сценариях эмиссии парниковых газов максимальные темпы потепления в XXI веке будут наблюдаться в Арктическом регионе [10], включая Баренцево море (рис. 9).

В случае дальнейшего потепления вод Баренцева моря расширение ареала теплолюбивых видов в его северные и восточные районы продолжится. Однако следует учитывать, что такие донные виды, как треска и пикша, обитающие в мелководных шельфовых зонах до глубины 300—400 м, уже практически достигли северной границы континентального шельфа. Вероятность того, что эти виды продолжат смещаться далее в районы континентального склона, очень мала. С учетом рельефа дна они будут продвигаться на восток в районы с подходящими температурными и кормовыми условиями. Только пелагические виды, такие как мойва, сельдь, сайка, будут способны мигрировать дальше в северном направлении, в более глубоководные районы.

Увеличение акватории распределения трески и других хищников приведет к изменениям в трофических отношениях рыб и их жертв — усилению пресса хищничества трески на молодь черного палтуса, сайки и других видов, которые обитают в районах за пределами массовых концентраций естественных хищников. Сохранение тенденции к потеплению вод создает перспективы хозяйственного освоения дополнительной сырьевой базы в Карском море, а возможно, и в море Лаптевых. Сокращение площади ледового покрова и увеличение протяженности миграций основных промысловых видов рыб формирует предпосылки для организации здесь лова черного палтуса, трески, пикши, мойвы, сайки, отдельных видов проходных рыб.

Вместе с тем данные наблюдений показали, что скорость фактического повышения глобальной температуры поверхности океана в 1982—2015 гг. была более чем в 1,5 раза ниже [18], чем по моделям Межправительственной группы

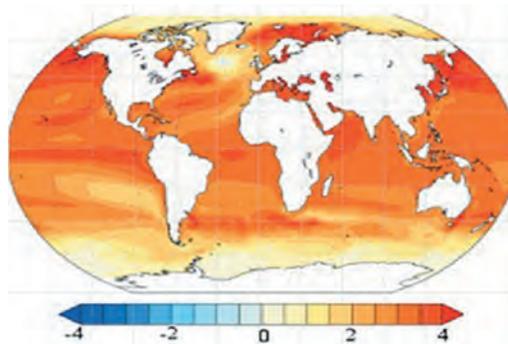


Рис. 9. Изменения температуры поверхности океана (°C) в период 2090—2099 гг. по сравнению с периодом 1990—1999 гг. при наиболее жестком (RCP-8.5) сценарии выброса  $\text{CO}_2$  в атмосферу [10].

экспертов по изменению климата (МГЭИК) (рис. 10). Поэтому современный тренд потепления может быть связан в основном с природными процессами. Отметим, что потепление происходит неравномерно вследствие наличия 60-летнего климатического цикла с чередованием периодов потепления и похолодания.

В Северной Атлантике такие колебания известны как Атлантическая мультитидекадная осцилляция (АМО). Ожидается, что переход к ее очередной отрицательной фазе и начало периода похолодания произойдут около 2030 г. (рис. 11). Прогноз изменения индекса АМО до 2050 г. сделан авторами статьи на основе 60-летней периодичности его изменения.



Рис. 10. Фактические и смоделированные изменения глобальной температуры поверхности океана по модели CMIP5 (IPCC AR5) в 1982—2015 гг. [18].

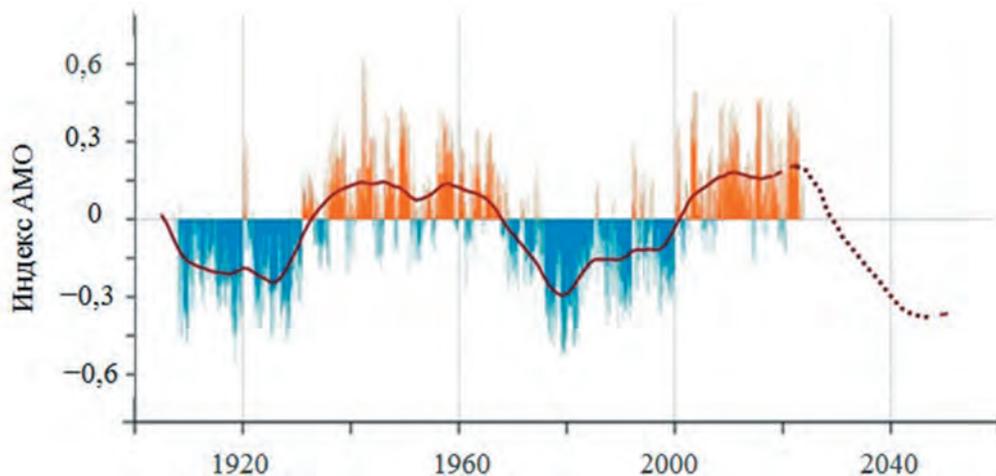


Рис. 11. Среднегодовой индекс АМО и его прогноз до 2050 г.

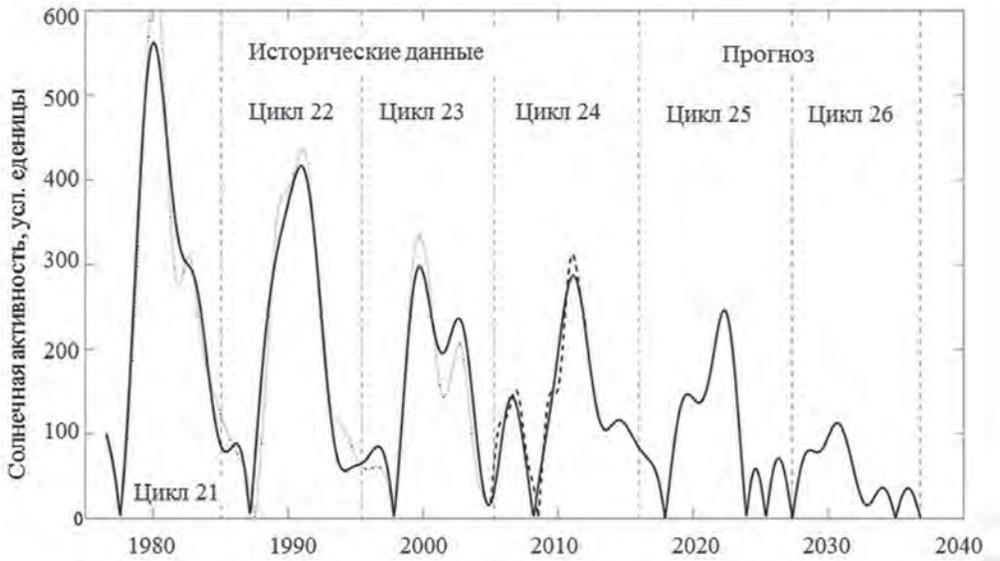


Рис. 12. Исторические данные и прогностическая оценка изменения солнечной активности с 1970 по 2040 г. [14].

Кроме того, ожидается, что на первую половину 2030-х годов придется начало нового векового минимума солнечной активности, который можно рассматривать как еще один фактор, способствующий похолоданию климата в последующие десятилетия (рис. 12). По сравнению с началом 1980-х годов, когда наметилась тенденция к уменьшению солнечной активности, в 2030-е годы максимум 11-летнего цикла (цикл 26) будет в 5—6 раз ниже [16]. В этом случае тенденции в развитии биологических и климатических процессов в арктических морях сменятся на противоположные, что будет сопровождаться возвратом пелагических и донных рыб в традиционные районы промысла.

### Заключение

Анализ данных за 1982—2017 гг. выявил существенные изменения в распределении основных промысловых гидробионтов в Северной Атлантике и прилегающих арктических морях, связанные с климатическими изменениями. Наблюдаемые изменения климата определялись установлением положительной фазы АМО в 1996 г. и существенным ослаблением и сокращением площади СЦК. Усиление адвекции более теплых и соленых атлантических вод в Баренцево и Норвежское моря обусловило продвижение донных видов рыб в период нагула, прежде всего, в северо-восточном направлении. В то же время районы пелагических видов в Норвежском море расширялись во всех направлениях. Изменения границ ареала окуна в море Ирмингера носили «аномальный» характер. С середины 1990-х годов его скопления сместились на юго-запад вслед за сокращением СЦК.

Рассмотрены вероятные сценарии климатических изменений и характера распределения запасов и их промысла. В случае дальнейшего потепления вод Баренцева моря расширение ареалов теплолюбивых видов в его северные и восточные районы продолжится. Это создаст перспективы хозяйственного освоения дополнительной сырьевой базы в Карском море, а возможно, и море Лаптевых.

Другой сценарий, основанный на предположении о естественном характере современного потепления, предполагает возврат пелагических и донных видов рыб в традиционные районы промысла.

Исследования влияния изменений климата на сообщества морских рыб должны включать как качественные, так и количественные оценки связи между биолого-промысловыми и климатическими параметрами. В настоящей работе представлены лишь качественные оценки воздействия температуры и солености воды на распределение основных промысловых видов рыб в Североатлантическом регионе. Наша дальнейшая работа предполагает поиск количественных, прежде всего статистически значимых, связей между климатическими параметрами и рассчитанными географическими центрами промысловых скоплений гидробионтов.

### Список литературы

1. Боровков В.А., Карсаков А.Л., Ярагина Н.Ф., Анциферов М.Ю., Ившин В.А. Эффекты современных изменений климата в распределении промысловых скоплений северо-восточной арктической трески в период нагула // Вопросы промысловой океанологии. 2014. № 11. С. 61—76.
2. Сарафанов А.А. 2013. Циркуляция и термохалинные характеристики вод субарктической Атлантики: среднее состояние и изменения в масштабе десятилетий / Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: изд-во ИОРАН. 50 с.
3. ЦСМС Центра системы мониторинга рыболовства и связи – судовые суточные донесения [Electronic resource]. URL: <http://cfmc.ru/> (дата обращения: 02.03.2018 г.).
4. *Beaugrand G., Brander K.M., Lindley J.A., Souissi S., Reid P.C.* Plankton effect on cod recruitment in the North Sea // *Nature*. 2003. 426. P. 661—664 (also available at <https://doi.org/10.1038/nature02164>).
5. *Beaugrand, G., Luczak, C., Edwards, M.* Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean // *Global Change Biology*, 2009. 15(7). P. 1790—1803. (also available at <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01848.x>).
6. *Berx B., Payne M. R.* The Sub-Polar Gyre Index – a community data set for application in fisheries and environment research // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. 9. P. 259—266.
7. *Chafik L., Häkkinen S., England M. H., Carton J. A., Nigam S., Ruiz-Barradas A., Miller L.* Global linkages originating from decadal oceanic variability in the subpolar North Atlantic // *Geophys. Res. Lett.* 2016. 43(20). P. 10 909—10 919. doi:10.1002/2016gl071134.
8. *Fernandes, J.A., Papathanasopoulou, E., Hattam, C., Queirós, A.M., Cheung, W.W.L., Yool, A., Pope, E.C.* et al. Estimating the ecological, economic and social impacts of ocean acidification and warming on UK fisheries // *Fish and Fisheries*. 2017. 18(3). P. 389—444 (also available at <https://doi.org/10.1111/faf.12183>).
9. *Fossheim, M., Primicerio, R., Johannesen, E., Ingvaldsen, R.B., Aschan, M. & A.V. Dolgov.* Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic // *Nature Climate Change*. 2015. 5. P. 673—676 (also available at <https://doi.org/10.1038/nclimate2647>).
10. *Gattuso J.-P., Magnan A., Billé R., Cheung W.W.L., Howes E.L., Joos F., Allemand D.* et al. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions scenarios // *Science*. 2015. 349 (6243): aac4722 (also available at <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>).
11. *Good S.A., Martin M.J., Rayner N.A.* EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2013. No. 118. P. 6704—6716. doi:10.1002/2013JC009067.

12. *Häkkinen, S., Rhines, P.B.* Decline of subpolar North Atlantic circulation during the 1990s // *Science*. 2004. 304. P. 555—559.
13. *Häkkinen S, Rhines P.B.* Shifting surface currents in the northern North Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C04005. doi:10.1029/2008JC004883.
14. *Hätún H., Payne, M.R., Jacobsen J.A.* The North Atlantic subpolar gyre regulates the spawning distribution of blue whiting (*Micromesistius poutassou*) // *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sci.* 2009. V. 66. Is. 5. P. 759—770.
15. Met Office Hadley Centre — EN4: quality controlled subsurface ocean temperature and salinity profiles and objective analyses [Electronic resource]. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/index.html> (дата обращения: 03.08.2017 г.).
16. *Shepherd S.J., Zharkov S.I., Zharkova V.V.* Prediction of Solar Activity from Solar Background Magnetic Field Variations in Cycles 21—23 // *Astrophysical J.* 2014. V. 795. P. 46. doi:10.1088/0004-637X/795/1/46.
17. *Simpson, S.D., Jennings, S., Johnson, M.P., Blanchard, J.L., Schon, P.J., Sims, D.W. & M.J Genner.* Continental shelf-wide response of a fish assemblage to rapid warming of the sea // *Current Biology*. 2011. 21 (18). P. 1565—1570 (also available at <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.08.016>).
18. *Tisdale B.* Dad, why are you a global warming denier? A short story that's right for the times. 2018. Available at: <https://bobtisdale.wordpress.com/2018/01/10/illustrations-from-my-short-story-dad-why-are-you-a-global-warming-denier>.

## **МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИАЭРОДРОМНЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ г. ЭНГЕЛЬС)**

*И.С. Лазарев, Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, И.О. Бакланов*

Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
lazarev-ilya@list.ru

Представлены результаты мониторинга и прогнозирования загрязнения грунтов приаэродромных территорий авиационным топливом. В основу расчета положена математическая модель образования капель керосина при взлете и посадке самолетов, когда двигатели работают в форсажном режиме. Модель прошла апробацию на военном аэродроме «Энгельс-2» (г. Энгельс) и показала высокую сходимость результатов расчетов и измерений уровня загрязнения грунтов керосином (81 %). Установлено, что наибольшее загрязнение грунтов авиационным топливом находится на расстоянии до 300 м от взлетно-посадочной полосы.

*Ключевые слова:* аэродром, загрязнение грунтов, керосин, модель каплеобразования, модель загрязнения грунтов, форсажный режим.

## **MONITORING AND FORECASTING CONTAMINATION OF LAND NEXT TO THE AIRFIELD (FOR EXAMPLE, ENGELS)**

*I.S. Lazarev, Zh. Yu. Kochetova, O.V. Bazarsky, I.O. Baklanov*

N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy

The article presents the results of monitoring and forecasting of soil contamination in the area near an airfield with aviation fuel. The calculation is based on a mathematical model of kerosene droplets formation during takeoff and landing of aircraft when the engines are operating in the afterburner mode. The model was tested at the military airport «Engels-2» (Engels) and showed a high convergence of the calculated and measured results of soil contamination levels with kerosene (81 %). It is established that the greatest contamination of soil with aviation fuel is at a distance of up to 300 m from the runway.

*Keywords:* aerodrome, monitoring, pollution, soils, kerosene, model of droplet formation, model of soil pollution, afterburning regime

### **Введение**

В Российской Федерации в настоящее время эксплуатируется более 70 военных аэродромов, из них к активно действующим относится около 30. Основным компонентом, загрязняющим грунты аэродромов, является керосин. Он относится к веществам третьего класса опасности, и его ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) в грунтах составляет 100 мг/кг.

Авиационное топливо накапливается в толще грунтов, фильтруется, проникает в нижние слои и может представлять угрозу загрязнения водоносным горизонтом. Под военными аэродромами скапливаются керосиновые линзы массой до сотен тонн, движущиеся с грунтовыми водами в направлении естественных водоемов [7]. В ежегодном докладе о результатах 2014 г. и основных направлениях

деятельности МЧС на 2015—2018 гг. экологическая ситуация на военных аэродромах характеризуется как приближенная к катастрофической [5].

Существующие модели в основном описывают развитие ситуации при аварийных сбросах, когда топливо находится в жидкой фазе [2, 3, 9]. При этом недостаточно изучена эволюция керосиновых облаков, образующихся в форсажном режиме работы двигателей самолетов. Однако эта составляющая загрязнения грунтов за десятилетия эксплуатации аэродромов становится не менее значимой, чем загрязнение, обусловленное аварийными сбросами.

Цель настоящей статьи — верификация математической модели каплеобразования керосина при работе двигателей самолетов в форсажном режиме и загрязнения грунтов приаэродромной территории.

### Методика прогнозирования

В основе прогнозирования загрязнения грунтов приаэродромной территории в г. Энгельс лежит математическая модель конденсации капель керосина в атмосфере и пространственного загрязнения грунтов [4]. Разработана расчетная программа на основе универсальной математической системы Mathcad, позволяющая в автоматическом режиме прогнозировать загрязнение грунтов военных аэродромов с учетом особенностей их эксплуатации.

При описании каплеобразования авторы исходили из того, что отработавшие газы авиационных двигателей и дренажных систем могут конденсироваться при температуре ниже критической температуры керосина. При конденсации керосина из-за множества процессов, происходящих в турбулентной среде спутного следа самолета, распределение капель топлива по радиусу  $R_i$  можно считать нормальным. С учетом энергии, выделяющейся при охлаждении паров керосина, и поверхностной энергии, необходимой для их конденсации, авторами ранее было установлено, что радиус сконденсированных капель несгоревшего топлива может изменяться от 35 до 595 мкм (рис. 1) [4].

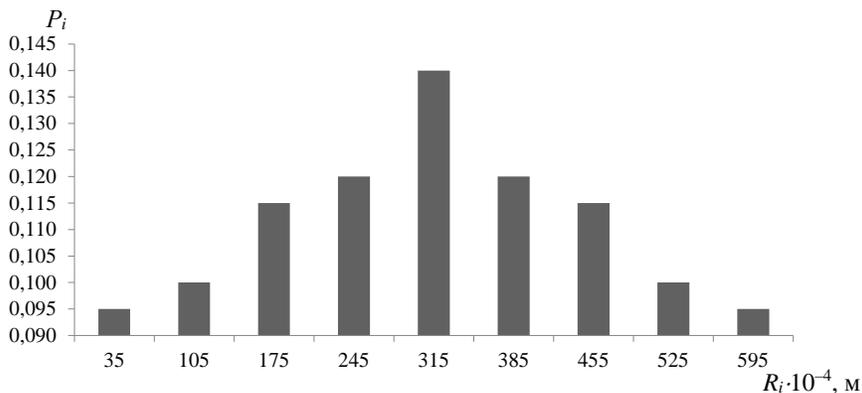


Рис. 1. Нормальное распределение вероятности образования капель несгоревшего топлива радиусом  $R_i$ .

Алгоритм расчета модели образования капель из паров керосина и загрязнения грунтов приаэродромных территорий включает следующие шаги.

1. Расчет массы керосина ( $m_i$ , кг) в каждой  $i$ -й градации за один вылет самолета в зависимости от радиуса капель топлива:

$$m_i = P_i M, \quad (1)$$

где  $P_i$  — вероятность образования капель керосина радиусом  $R_i$ ,  $M = 1$  кг — масса выбрасываемого несгоревшего керосина за один самолетовылет [1].

2. Расчет массы керосина в каждой градации ( $m_{\Sigma i}$ ) за все время существования аэродрома с учетом среднего числа вылетов самолетов в год ( $N$ ):

$$m_{\Sigma i} = m_i T N, \quad (2)$$

где  $T = 80$  лет — время существования аэродрома г. Энгельс,  $N = 5000$ .

3. Расчет скорости горизонтального разлета ( $v_r$ , м/с) капель керосина в каждой  $i$ -й градации:

$$v_r = \frac{v_{cp}^2}{v_{cp} + \frac{6\eta}{P_B R_i}} \left[ 1 - e^{\frac{-1,5 \left( \frac{P_B v_{cp}}{2} + \frac{3\eta}{R_i} t_{ri} \right)}{P_0 R_i}} \right], \quad (3)$$

где  $v_{cp} = 4$  м/с — среднегодовая скорость ветра, направление которого перпендикулярно взлетно-посадочной полосе на высоте 100 м [10];  $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$  Па·с — коэффициент динамической вязкости воздуха;  $P_B = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воздуха при нормальных условиях;  $t_{ri}$  — время (с) ускоренного осаждения капель керосина, зависящее от параметра осаждения  $b = (9\eta)/(2 P_0 R_i^2)$  [4];  $P_0 = 8 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup> — плотность охлажденной капли керосина.

Время осаждения частиц в каждой  $i$ -й градации  $t_{ri}$  представлено на рис. 2.

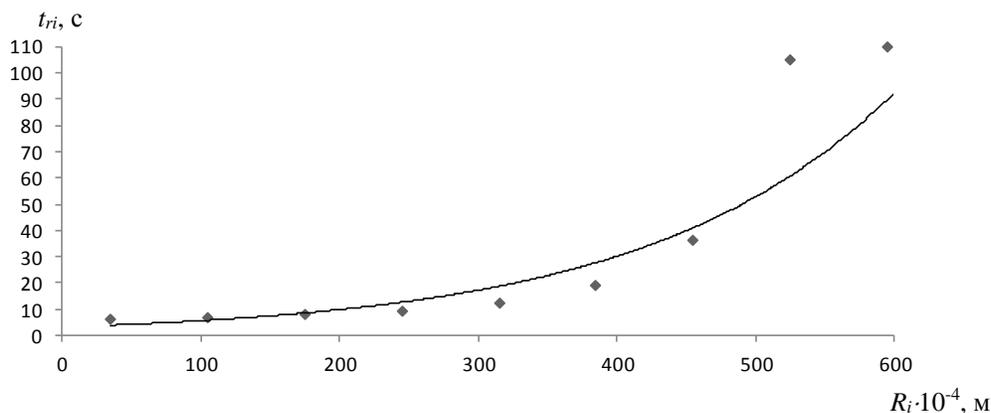


Рис. 2. Зависимость времени ускоренного осаждения частиц керосина ( $t_{ri}$ ) от их радиуса ( $R_i$ ).

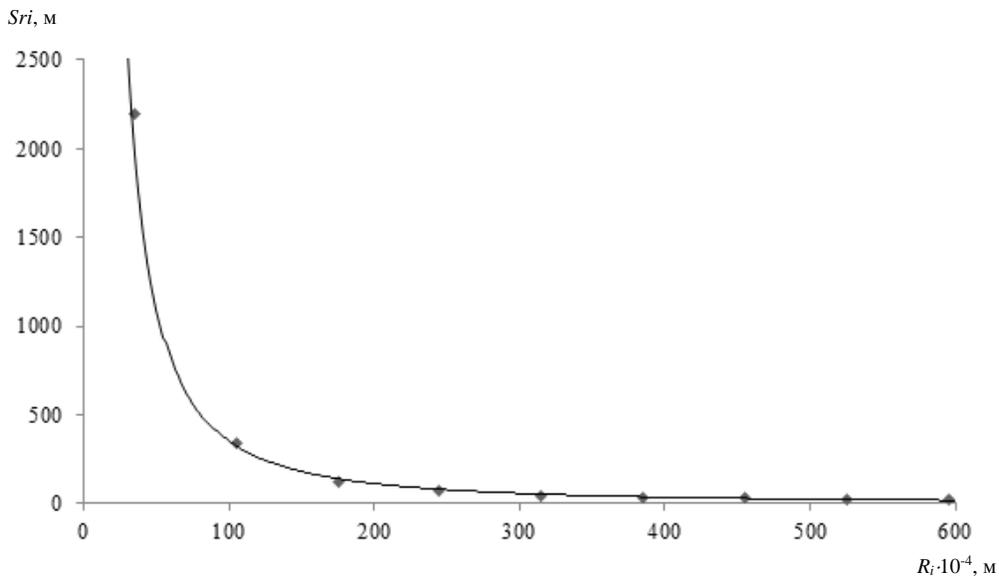


Рис. 3. Дальность разлета капель керосина перпендикулярно взлетно-посадочной полосе ( $Sr_i$ ) в зависимости от их радиуса ( $R_i$ ).

4. Расчет дальности разлета капель керосина ( $Sr_i$ , м) перпендикулярно взлетно-посадочной полосе в каждой  $i$ -й градации определяется выражением  $Sr_i = V_r t_{ri}$ . Результаты расчета представлены на рис. 3.

5. Введение исходных данных о ширине полос ( $\Delta l_i$ , м), загрязненных каплями керосина радиусом каждой градации, перпендикулярных взлетно-посадочной полосе.

6. Расчет массы грунта ( $M_{гpi}$ , кг) в каждой полосе шириной  $\Delta l_i$  загрязненного на глубине  $h = 0,02$  м, при средней плотности грунта  $\rho_{гр} = 1200$  кг/м<sup>3</sup> по всей длине  $L = 2000$  м между маяками ближайших приводов исследуемого аэродрома:

$$M_{гр} = L h \Delta l_i \rho_{гр}. \quad (4)$$

7. Концентрация в грунте ( $C_i$ , мг/кг) в каждой полосе шириной  $\Delta l_i$  топлива, выброшенного за время эксплуатации аэродрома:

$$C_i = m_{\Sigma i} / M_{гpi}. \quad (5)$$

### Мониторинг концентрации керосина в грунте

Отбор проб грунтов проводили в соответствии с Руководящим документом РД 52.04.186-89 на удалении от взлетно-посадочной полосы с шагом 5, 10, 50 м и далее 100 м до 1 км в разных направлениях. С помощью GPS-пеленгатора фиксировали координаты точек отбора проб. Определение концентрации керосина в почвогрунтах по аттестованным методикам предполагает консервирование и

транспортировку проб грунта в специализированные лаборатории, сложную пробоподготовку с извлечением нефтяных углеводородов из почвы с применением токсичных растворителей, анализ экстрактов с помощью специального оборудования (флуориметры, ИК-спектрометры, хроматографы). Дорогостоящая стандартная схема определения загрязнителей грунтов на масштабных приаэродромных территориях обуславливает сокращение числа контролируемых точек, что приводит к значительному понижению точности геомониторинга. В настоящее время отбор проб производят в местах предполагаемого повышенного содержания загрязнителей (склады ГСМ, станции перекачки топлива) и по одной-две пробы отбирают на прилегающих территориях в селитебной зоне (детские площадки, школьные двory).

Для повышения оперативности и снижения стоимости исследования загрязнения грунтов аэродромов в полевых условиях разработан универсальный пьезосенсорный датчик, действие которого основано на явлении обратного пьезоэффекта [6]. Датчик прошел апробацию в лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии № 97 ФМБА России и применяется для ранжирования проб грунтов по уровню загрязнения перед дорогостоящим лабораторным анализом для оперативного контроля экологической ситуации на аэродромах государственной авиации (города Воронеж, Липецк) [8]. Применение датчика позволяет определять концентрацию легких нефтепродуктов в почвах и грунтах различной природы *in situ* без сложных стадий пробоотбора, пробоподготовки, интерпретации результатов анализа. Время определения концентрации керосина в одной контрольной точке не превышает 10 мин, относительная погрешность измерений составляет менее 20 %.

### Верификация модели

В программе Surfer были построены карты загрязнения грунтов территорий аэродрома Энгельс-2 и прилегающих к нему селитебной и рекреационной зон (рис. 4).

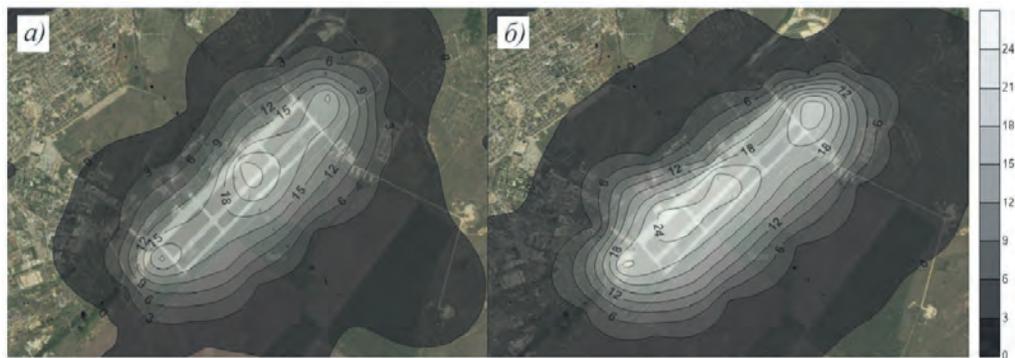


Рис. 4. Измеренное (а) и рассчитанное (б) значения кратности превышения ПДК керосина в грунте на территории аэродрома Энгельс-2.

Сопоставление расчетных значений загрязнения керосином грунтов приаэродромной территории с измеренными значениями концентрации керосина проводили методом корреляционного анализа. Теснота связи (коэффициент корреляции Пирсона) составила 0,81. Из рассмотрения были исключены точки контроля грунтов, расположенные на территориях склада горюче-смазочных материалов и в местах перекачки топлива, где концентрация керосина в грунтах превышала расчетную в два-три раза. В остальных случаях наибольшее расхождение значений было получено вблизи взлетно-посадочной полосы, что объясняется смывами с аэродромного покрытия, не учтенными в модели.

### Выводы

Разработанная модель образования, рассеяния капель керосина и загрязнения ими грунтов в результате взлета и посадки самолетов при форсажном режиме работы двигателей, а также составленная расчетная программа, позволяют оперативно оценивать загрязнение грунтов аэродромов государственной авиации и прилегающих к ним территорий с учетом времени и особенностей эксплуатации аэродромов.

В соответствии с расчетными и экспериментальными данными установлено, что основная масса керосина оседает в грунты на расстоянии от взлетно-посадочной полосы до 300 м, а повышенное содержание керосина фиксируется и на расстоянии более 2 км. Надо отметить, что на расстоянии 800 м от взлетно-посадочной полосы аэродрома Энгельс расположен дачный поселок. Подобное расположение рекреационной и селитебных зон относительно аэродромов характерно для большинства военных аэродромов, что вызвано естественным и неизбежным ростом урбанизации, постепенным слиянием городов с авиационными комплексами. Полученные в работе результаты прогнозного и полевого испытания загрязнения грунтов объектов авиационной деятельности рекомендуется учитывать при проектировании градостроительства; при установлении границ санитарно-защитных зон авиационных комплексов, масштабы которых рекомендуется уточнять ежегодно в зависимости от интенсивности деятельности аэродромов; при проведении мероприятий по повышению экологической грамотности населения.

### Список литературы

1. Авиационные правила АП-34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. М.: Росавиация, 2003. 99 с.
2. Александров Э.Л. О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1993. № 4. С. 36—45.
3. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А. Прикладные аспекты экологии при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники // Оптика атмосферы и океана. 2013. № 8. С. 636—641.
4. Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю. Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнение грунтов приаэродромной территории // Вестник МГТУ. 2019. № 1. С. 64—71.
5. Доклад о результатах 2014 года и основных направлениях деятельности МЧС России на 2015—2018 годы [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.mchs.gov.ru/activities/results/2014\\_god/Doklad\\_o\\_rezultatah\\_2014\\_g.\\_i\\_osnovnih\\_n](http://www.mchs.gov.ru/activities/results/2014_god/Doklad_o_rezultatah_2014_g._i_osnovnih_n), 2015. Дата обращения 11.05. 2019.

6. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Кучменко Т.А. Экспресс-оценка загрязнения грунтов керосином по сигналам пьезосенсора на основе многослойных углеродных нанотрубок // Вестник МГУ. Серия 2: Химия. 2017. Т. 58, № 1. С. 28—35.
7. Кочетова Ж.Ю. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды. Воронеж: изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 204 с.
8. Патент 2302627 RUS, МПК G01N 27/12. Газоанализатор с открытым входом на основе пьезосенсора / Т.А. Кучменко, Ж.Ю. Кочетова, Ю.Е. Силина. Заявл. 31.01.2006; Оpubл. 10.07.2007.
9. Свириденков А.А., Третьяков В.В. Влияние коагуляции капель на характеристики факела распыливания за форсунками // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3 (9). С. 157—161.
10. Свод правил СП 131.13330.2012. Строительная климатология. СНиП 23-02-99. М., 2015. 113 с.

**АРЕАЛ БЕРЕЗЫ ШЕРСТИСТОЙ  
(*BETULA LANATA* (REGEL) V. VASSIL)  
И ВЛИЯНИЕ НА НЕГО ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

*А.Г. Чурюлина, М.В. Бочарников*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, agchurylina@gmail.com

Составлены современный и вероятностный ареалы березы шерстистой (*Betula lanata* (Regel) V. Vassil), относящейся к реликтовому подроду *Costatae* (Regel), представители которого в конце третичного периода входили в состав северных фаций лесов тургайского типа. Оценена динамика растительного покрова с участием исследуемого вида на основе прогнозных карт, полученных при компьютерном моделировании. Результаты исследования позволили выявить особенности характера распространения березы шерстистой к 2050 и 2070 гг. С одной стороны, наблюдается сокращение площадей, потенциально пригодных для произрастания вида, а с другой — повышение вероятности сосредоточения популяций березы шерстистой в отдельных горных районах своего ареала.

*Ключевые слова:* реликт, динамика ареала, климатический сценарий, изменение климата.

**GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION  
OF THE *BETULA LANATA* (REGEL) V. VASSIL AND  
THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON ITS DYNAMICS**

*A.G. Churiulina, M.V. Bocharnikov*

Lomonosov Moscow State University

The modern and projected distributions of the *Betula lanata* (Regel) V. Vassil are determined. The *Betula lanata* (Regel) V. Vassil relates to the relict subgenus *Costatae* (Regel), whose species were part of turgai-type forests at the end of the Tertiary period. The dynamics of vegetation cover with the participation of the *Betula lanata* is estimated on the basis of forecast maps obtained by computer simulation. The results of the study revealed the distribution features of the *Betula lanata* by 2050 and 2070. There is, on the one hand, a reduction in the areas, which are potentially suitable for the growth of this species. On the other hand, there is an increased probability of concentration of *Betula lanata* populations in certain mountainous areas within its distribution area.

*Keywords:* relict, dynamics of the geographical distribution, climate scenario, climate change.

**Введение**

Проблема оценки последствий развивающегося изменения климата является актуальной в рамках концепции сохранения биологического разнообразия [10, 15—18]. Характерным компонентом растительного покрова большинства горных систем Сибири является высокогорная растительность, которая формирует хорошо выраженные высотные пояса [11]. Сложная экотопическая структура высокогорий обусловила высокую степень биологического разнообразия сообществ и их сложную организацию [5]. Именно поэтому наблюдаемые и ожидаемые изменения климата наиболее существенное влияние оказывают на чувствительные высокогорные фитоценозы, развивающиеся в экстремальных условиях.

Оценить возможную динамику ареалов высокогорных видов растений, приуроченных к труднодоступным местообитаниям, в настоящее время стало возможно благодаря развитию и усовершенствованию методов современных технологий. Моделирование потенциальных ареалов, а также построение прогнозных моделей распространения вида в зависимости от различных климатических факторов уже применяются в международных и российских исследованиях [12, 13, 23, 24]. Кроме того, выявление характера распространения видов растений связано с историей формирования их ареалов в рамках глобальной биологической эволюции. Данный факт подразумевает учет биотических процессов, а значит, и связи характера распространения вида с его экологией и ценотической приуроченностью при анализе полученных результатов.

Цель настоящего исследования заключается в пространственном моделировании ареала высокогорного вида — березы шерстистой (*Betula lanata* (Regel) V. Vassil.), широко распространенной в горах Сибири и Дальнего Востока.

### Объект исследования

Береза шерстистая (*Betula lanata* (Regel) V. Vassil.) — дерево, но в северной части ареала и в субальпийском поясе гор часто имеет форму кустарника высотой 3—15 м [2]. Занимает огромную территорию — от Охотского моря на востоке до Байкала на западе и от реки Колымы и Верхоянского хребта на севере до Корейского полуострова на юге. Этот вид является близким и родственным каменной березе (*Betula Ermani* Cham.) с явной отличительной особенностью — сильно опушенными почками и орешками иных размеров и формы. Относится к березам подрода *Costatae* (Rgl.), которые к концу третичного времени входили в состав северных фаций лесов тургайского типа, окаймляя с севера темнохвойные елово-пихтовые леса и отчасти входя в их состав, а также в состав горных хвойно-широколиственных лесов. Дифференциация этих берез началась еще раньше, насколько можно судить по их ископаемым остаткам. Это стало результатом как различных условий географической обстановки, так и различного типологического окружения.

Излюбленными местообитаниями *Betula lanata* являются вогнутые места горных склонов преимущественно южных экспозиций, защищенные от резких зимних северо-западных ветров. Зимой эти места подвержены сильным снежным заносам, так как дующие в области северо-западные и северные ветры сдувают снег с наветренных склонов и переносят на противоположные. По этим причинам снег в рощах с *Betula lanata* задерживается дольше, чем в других насаждениях. Реже приходится встречать насаждения шерстистой березы по выпуклым частям склонов, обращенных к морю в непосредственной близости с ним. Иногда они приурочены к долинам небольших горных рек с каменистой почвой.

В плиоцене вследствие начинающегося охлаждения климата растительные зоны начали отступать в юго-западном направлении. Одновременно в том же направлении продвигалась и шерстистая береза. Она с севера окаймляла темнохвойные леса, а в горах образовывала верхнюю границу леса. Чем дальше шерстистая

береза продвигалась от центра своего распространения, находившегося в северо-восточной Азии (Анадырь, Чукотка, бассейн нижнего течения Колымы), тем все больше и больше уменьшалась ее свита. Горные хребты, хотя бы в незначительной степени совпадавшие с направлением миграции растительности, представляли собой удобные пути движения для ее горных комплексов [2].

В настоящее время береза шерстистая, несмотря на широкое распространение на территории Сибири и Дальнего Востока, имеет ограниченный по площади ареал и ее сообщества относятся к классу региональных редких [9]. Относительно обеспеченности охраной отметим, что в Красной книге только одного субъекта РФ (Республика Саха) можно найти березу каменную (*Betula Ermanii* Cham.). Согласно критериям МСОП, ей присвоен статус редкости 2a — вид, сокращающийся в численности в результате изменения условий существования или разрушения местообитания.

### Материалы и методы

Основой для построения ареала березы шерстистой послужили фондовые материалы из гербарных коллекций России: кафедры биогеографии географического факультета (MWG) и биологического факультета (MW) Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (LE), Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН (МНА), Центрального сибирского ботанического сада СО РАН им. проф. И.М. Красноборова (NS), Центрального сибирского ботанического сада СО РАН им. М.Г. Попова (NSK), Гербария им. П.Н. Крылова Томского государственного университета (TK). Кроме того, для определения мест находок исследуемого вида использовались данные онлайн-источников (<https://www.gbif.org>, <http://www.plantarium.ru>) [19, 20]. Всего общий перечень местонахождений модельного вида включает 590 геолокаций, нанесение которых на картографическую основу в среде ГИС (программа ArcGis 10.3.1) позволило выявить ареал березы шерстистой.

Полученная карта распространения вида послужила основой для дальнейшего воссоздания вероятностного ареала исследуемого вида с помощью компьютерного моделирования методом максимальной энтропии (программное обеспечение Maxent). Используемые данные о параметрах среды включают 19 биоклиматических переменных BIOCLIM, усредненных за временной интервал 1970—2000 гг. ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)) [22]. Для удобства оценки результатов применялся логистический выходной формат данных, где вероятность находок вида находится в интервале от 0 до 1. Полученные картосхемы были преобразованы в программе ArcGis с изменением шкалы вероятности и разбиением ее на десять классов. Цветовая шкала разбита таким образом, что значимыми считаются показатели вероятности после 0,7 (отображены цветом от светло-желтого до красного).

Проведенный статистический анализ результатов моделирования вероятностного ареала, представленных кривыми отклика модели на отдельные параметры и таблицей значений корреляции данных о местонахождении вида с параметрами

окружающей среды, позволил выявить ключевые климатические факторы, определяющие характер распространения березы шерстистой.

Для оценки динамики растительного покрова под влиянием климатических изменений составлены прогнозные карты распространения исследуемого вида. В работе использовалась новая версия модели общей циркуляции атмосферы и океана, созданной совместно японским исследовательским сообществом, известная как модель междисциплинарных исследований климата (MIROC5) [25]. Пространственно-временные изменения оценивались при помощи прогнозных данных на 2050 и 2070 гг. при современных тенденциях накопления парниковых газов. Таким образом, был выбран такой климатический сценарий, при котором выбросы парниковых газов продолжают возрастать в течение всего XXI века (сценарий RCP 8.5, согласно пятому докладу Межправительственной комиссии по изменению климата — IPCC Fifth Assessment Report).

Визуальный анализ эмпирических данных при сравнении полученных моделей распространения вида проведен в SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) [21]. Выявлены ключевые факторы, влияющие на произрастание вида и его приуроченность к горным местообитаниям. С помощью диаграммы рассеяния через линейное уравнение регрессии и коэффициент детерминации проанализирован характер связи этих переменных.

## Результаты и их обсуждение

### *Картографирование ареала березы шерстистой*

На основе оригинальной базы данных (590 находок) была составлена карта местонахождений вида с указанием конкретных пунктов, отражающая ареал березы шерстистой, широко распространенной на территории Сибири и Дальнего Востока (рис. 1).

Несмотря на обширную территорию, на которой встречается береза шерстистая, площади, занятые ее популяциями, незначительны. Сокращению площади насаждения влаголюбивой третичной растительности сильно содействовали ксеротермические периоды межледниковья и послеледниковья. В эти периоды лесная растительность занимала сравнительно небольшие площади; потепление климата вызывало увеличение высоты верхней границы лесов и продвижение вверх всех растительных поясов, что привело к вытеснению рощ шерстистой березы лиственничниками и сосняками на большей части горных склонов [3]. Именно этим надо объяснить существенную разорванность ареала шерстистой березы в Восточной Сибири. С продвижением на север и вблизи моря высота нижней границы березняков сильно уменьшается и этот вид встречается небольшими группами или в виде отдельных деревьев в ельниках, кедровниках и смешанных лесах. Диапазон высот произрастания березы шерстистой составляет 500—1500 м над уровнем моря [1].

На карте местонахождений березы шерстистой можно выделить следующие районы ее распространения (см. рис. 1).

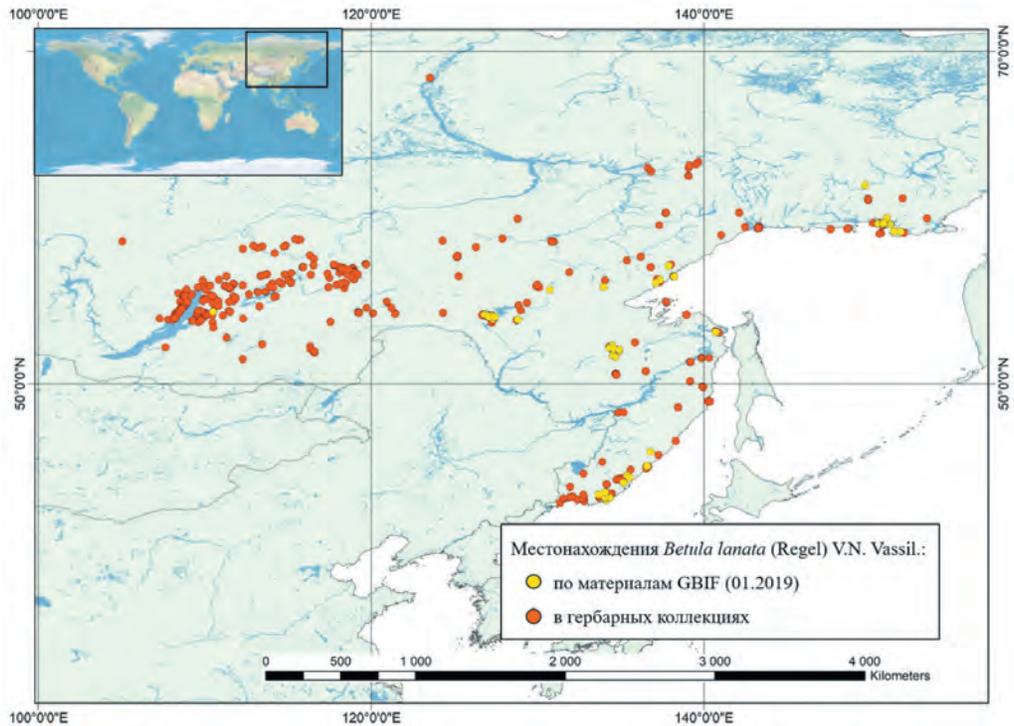


Рис. 1. Карта местонахождений березы шерстистой (*Betula lanata*).

1. Приморский район с сосредоточением вида вдоль горных хребтов Сихотэ-Алиня, Джугджура и в приокеанической части Колымского нагорья на побережье Охотского моря. В фитоценологическом отношении горноберезняки среднего Сихотэ-Алиня совпадают с таковыми вдоль побережья Охотского моря и на Камчатке. Но во всех сихотэалиньских группировках, а также на побережье Охотского моря заметную роль играют кустарники. На территории среднего Сихотэ-Алиня насаждения *Betula lanata* встречаются на высоте от 1000—1100 до 1200—1400 м над уровнем моря в зависимости от мезорельефа [8]. Ассоциации горноберезняков благодаря своему промежуточному положению (между ельниками и субальпийским поясом растительности) характеризуются большим разнообразием строения и состава. Описание и типология горных березняков для южного Сихотэ-Алиня представлены в работе Н.Е. Кабанова [7]. Так же как и в среднем Сихотэ-Алине, насаждения шерстистой березы приурочены к поясу, с одной стороны граничащему с темнохвойными лесами, а с другой — с высокогорными кустарниками и каменистыми осыпями, причем они редко занимают сплошную полосу, а чаще чередуются с зарослями кустарников и осыпями. На восточном склоне Джугджурского хребта береза шерстистая растет небольшими группами и в виде отдельных особей по долинам горных рек, занимая субальпийский пояс

среди зарослей *Pinus pumila* Rgl. на границе с высокогорными полянами с преобладанием *Dryas ajanensis* Juz., вересковых кустарничков и карликовых ив на высоте от 700 до 900 м над уровнем моря.

2. Континентальный район с достаточно большим, по данным гербарных коллекций, скоплением мест находок вида в северном Забайкалье в горах Станового нагорья. Здесь популяции березы шерстистой занимают высотную зону от 1000 до 1650—1700 м над уровнем моря. Входя в состав лиственничных лесов в поясе редколесья, исследуемый вид поднимается высоко в горы, сменяясь криволесьем, состоящим из кедрового стланика, березы шерстистой и ольховника [4]. Являясь на данной территории характерным элементом растительности подгольцового пояса, криволесья из березы шерстистой занимают 7,6 % [6].

3. Район, занимающий среднее положение между вышеназванными двумя районами, с произрастанием вида на Алданском нагорье и Становом хребте. Здесь, в юго-западной Якутии (бассейн реки Тунгир), по данным В.Н. Сукачева (1912) [14], насаждения шерстистой березы встречаются очень редко близ вертикальной границы леса, где они занимают небольшие площади. Им описана там всего лишь одна ассоциация этой березы (*Ermani betulium calamagrostosum*) в верховьях реки Тагил, притоке реки Черемной, в отрогах Яблонового хребта, по пологому склону к небольшому ручейку. Отсутствие каких-либо иных ассоциаций шерстистой березы неслучайно. Суровые климатические условия Якутии существенно сократили число исконных спутников данной породы, каковыми мы склонны считать виды, характерные для насаждений географически замещающих видов в приморских странах, где береза шерстистая играет большую роль и находится в условиях, более близких к тем, которые имели место в до- и послеледниковое время.

Таким образом, по мере удаления от моря число ассоциаций шерстистой березы и характерных для ее насаждений видов все более уменьшается, что позволяет говорить об удалении ее по мере продвижения на запад от современного оптимума распространения данной группы, так как разнообразие ассоциаций и многочисленность видового состава являются показателями оптимума существования формации. Обеднение и в одном, и в другом отношении свидетельствует об обратном [3].

### ***Моделирование вероятностного ареала березы шерстистой***

Потенциальный ареал березы шерстистой при моделировании совпадает с ее существующим географическим распространением на материковой части Дальнего Востока и юге Восточной Сибири, простираясь широкой полосой от побережья Охотского моря на восточной границе своего ареала до Прибайкалья на западной (рис. 2). Наибольшая вероятность произрастания вида (70 % и выше) характерна для северной части Сихотэ-Алиня, юго-восточного склона хребта Джугджур, а также среднегорий Яблонового и Баргузинского хребтов и Алданского нагорья. Появление на карте области с вероятностью произрастания березы шерстистой на Среднем хребте полуострова Камчатка не случайно. Мягкий морской климат Камчатки благоприятствует произрастанию каменной березы, являющейся близким и родственным шерстистой березе видом, географически замещающим ее на островах.

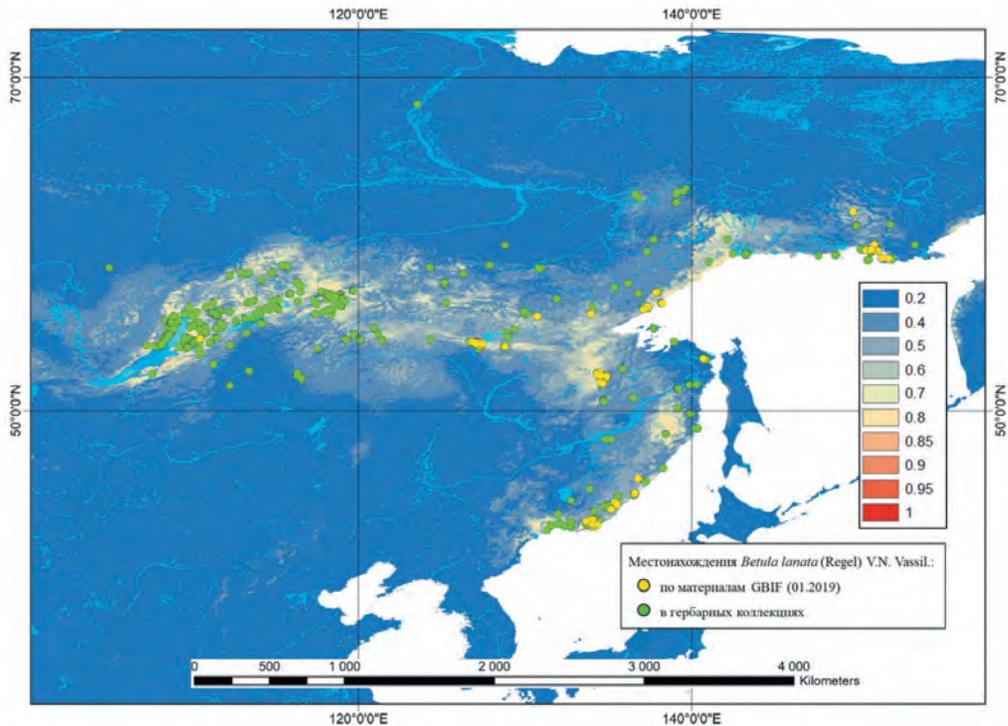


Рис. 2. Карта вероятностного распространения березы шерстистой (*Betula lanata*) на основе биоклиматических переменных (Bioclimatic variables).

Шкала вероятности разбита на десять классов с отображением увеличения вероятности произрастания вида от 0 до 1 (синие области — на данном участке условия непригодны для произрастания вида; красные области — участки с благоприятным сочетанием условий для произрастания вида, схожие с современными местообитаниями).

Анализ статистических результатов (тест «permutation importance») показывает, что совокупность факторов, характеризующих температурный режим (табл. 1), играет одну из ключевых ролей в формировании ареала березы шерстистой, произрастание которой приурочено к горным склонам преимущественно южной экспозиции, защищенным от резких порывов (до 14 м/с по шкале Бофорта) зимних северо-западных ветров.

Таблица 1

Ключевые переменные (Bioclimatic Variables), влияющие на вероятностное распространение березы шерстистой (*Betula lanata*)

Переменная	Вклад, %	Важность при пермутации, %
Bio8 — средняя температура наиболее влажного квартала (июль — сентябрь)	4,9	15,1
Bio1 — среднегодовая температура	8,5	12,8

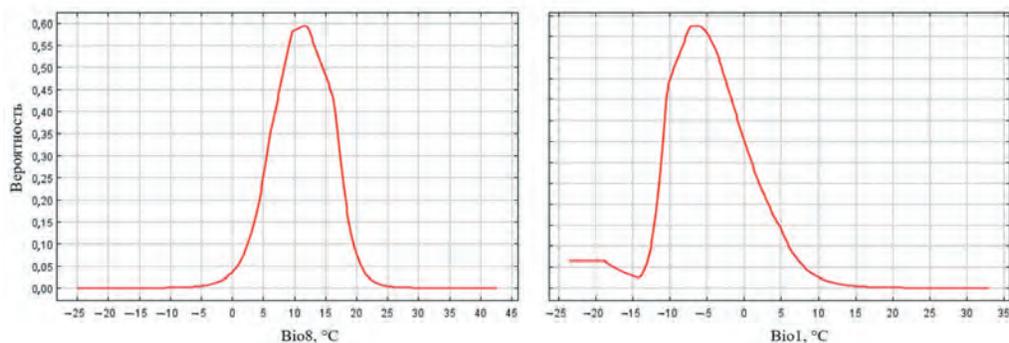


Рис. 3. Зависимость вероятностного распространения березы шерстистой (*Betula lanata*) от биоклиматических переменных Bio8 (средняя температура наиболее влажного квартала (июль — сентябрь)) и Bio1 (среднегодовая температура).

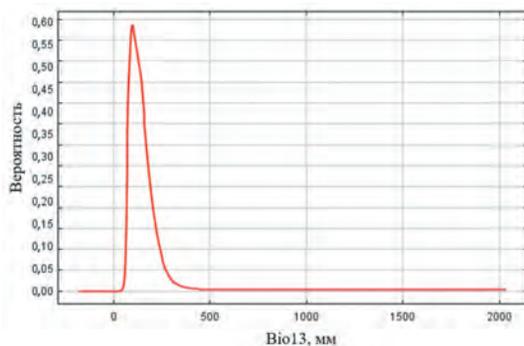


Рис. 4. Зависимость вероятностного распространения березы шерстистой (*Betula lanata*) от биоклиматической переменной Bio13 (осадки наиболее влажного месяца, июля).

Благоприятными (вероятность произрастания вида выше 50 %) считаются условия, когда средняя температура наиболее влажного квартала (июль — сентябрь) сохраняется в диапазоне от 8 до 14,5 °C, а значения среднегодовой температуры составляют от –10 до –3 °C (рис. 3).

Другой альтернативный тест для оценки вклада переменных (тест «jack-knife») показал наибольшее влияние на распределение исследуемого вида количества осадков наиболее влажного месяца, июля (Bio13) (рис. 4).

Эти данные подтверждают приуроченность березы шерстистой к горным местообитаниям с большим количеством осадков в самый влажный месяц года (июль) и связь ее с березами подрода *Costatae* (Rgl.) с центром распространения в древней Берингии. Сложная система горных хребтов материковой части Северо-Восточной Азии послужила дорогой, по которой горные комплексы, сопровождающие березу шерстистую, могли распространяться в сторону Байкала [3].

### Динамика растительного покрова под влиянием климатических изменений

Результаты прогноза распространения березы шерстистой на 2050 и 2070 гг. при климатическом сценарии, предусматривающем в будущем наибольшую концентрацию диоксида углерода (RCP 8.5), согласуются с полученными выводами о ключевой роли комплекса температурных факторов (рис. 5 и 6). Основное влияние на произрастание вида по-прежнему оказывает количество осадков наиболее влажного периода. Вероятность нахождения вида более 50 % наблюдается при значениях переменной от 80 до 150 мм к 2050 г. и от 90 до 160 мм к 2070 г. В будущих условиях наблюдается сужение области оптимума и сосредоточение вида, прежде всего, в горных районах континентальной части Сибири и Дальнего Востока РФ. Из прогнозных карт видно сокращение площади ареала, но увеличение вероятности произрастания горноберезняков в отдельных частях прежнего ареала березы шерстистой — в районе северного Сихотэ-Алиня, а также Байкальского и Баргузинского хребтов.

Интерпретация результатов, полученных в виде диаграммы рассеяния в SAGA GIS (рис. 7), показывает тесную линейную связь ключевого фактора (количество

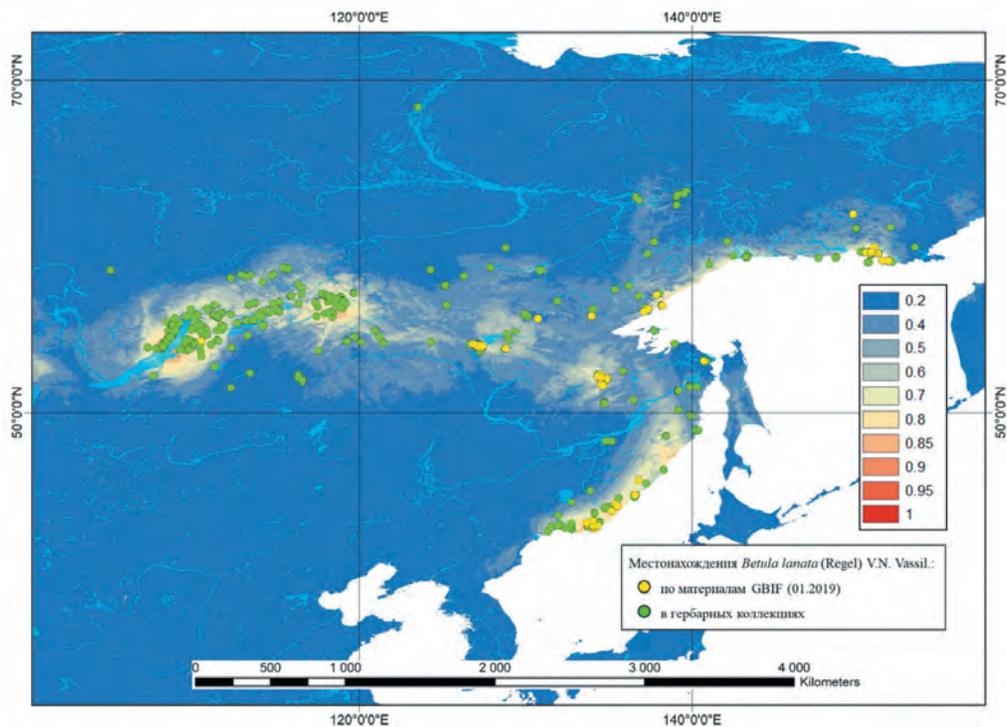


Рис. 5. Карта прогноза распространения березы шерстистой (*Betula lanata*) к 2050 г. при современных тенденциях накопления парниковых газов (сценарий RCP 8.5).

Условные обозначения см. рис. 2.

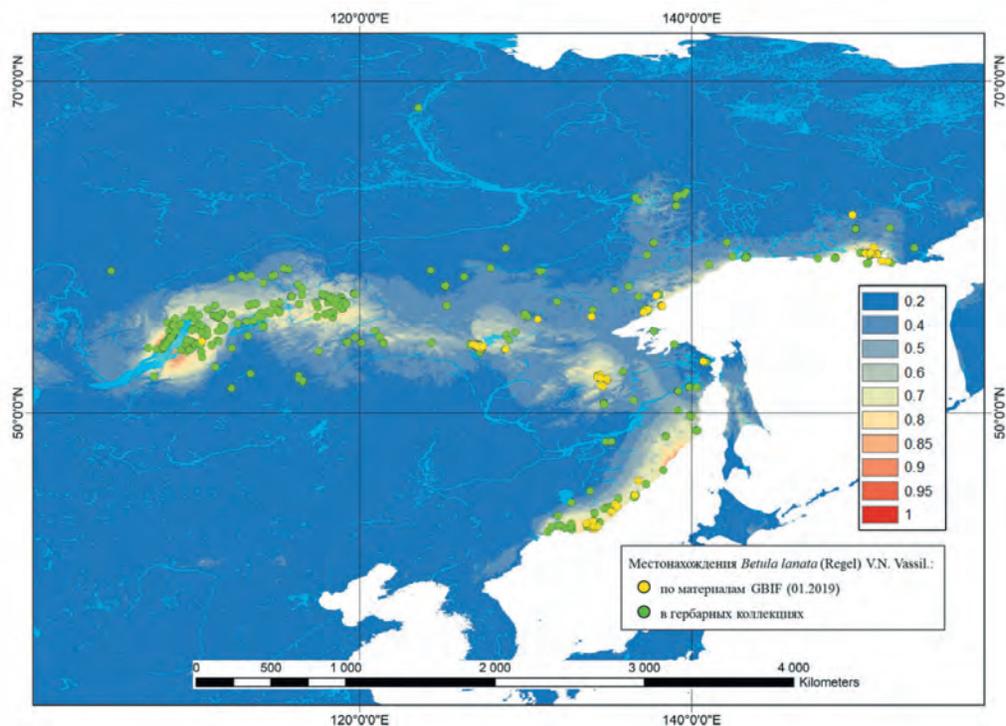


Рис. 6. Карта прогноза распространения березы шерстистой (*Betula lanata*) к 2070 г. при современных тенденциях накопления парниковых газов (сценарий RCP 8.5).

Условные обозначения см. рис. 2.

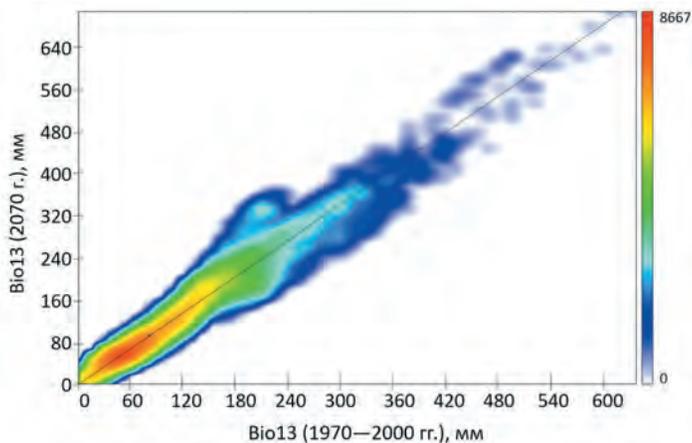


Рис. 7. Диаграмма рассеяния количества осадков наиболее влажного месяца, июля (Bio13) в различные временные интервалы.

Цветовая шкала: Красный цвет говорит о высокой плотности точек (пикселей), синий — об их разреженности.

осадков наиболее влажного месяца) в полученных моделях вероятностного и прогнозного распространения березы шерстистой при коэффициенте детерминации, равном 0,95. Уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$\text{Bio13 (2070 г.)} = 1,07 + 1,13\text{Bio13 (1970 — 2000 гг.)}$$

Среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) составляет 28,44 мм.

Наблюдается скопление точек в диапазоне значений от 20 до 100 мм. Кроме того, количество осадков наиболее влажного месяца к 2070 г. увеличится на 20—50 мм по сравнению с количеством осадков в современных климатических условиях.

### Заключение

Характер ареала исследуемого вида — березы шерстистой, относящейся к подроду берез третичной флоры, — имеет связь с историей орогенеза и конкретными климатическими условиями на территории ее распространения.

Оценка влияния климатического сценария на распространение березы шерстистой на территории Сибири и Дальнего Востока показала сокращение ее ареала. В некоторых случаях негативные последствия климатических изменений нивелируются увеличением вероятности нахождения вида и сосредоточением его в определенных частях ареала при общем сокращении распространения. Влияние вклада климатических переменных в прогнозные модели будет со временем изменяться, сказываясь на характере распространения исследуемых видов. С получением новых данных, в том числе о местонахождениях видов растений и их экологической приуроченности, необходимо дорабатывать прогнозные карты с целью оценки динамики ареалов моделируемых видов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 17—77—10142 «Изучение ботанического разнообразия и структурно-динамических свойств растительного покрова Станового нагорья».*

### Список литературы

1. Баранов В.И. Заметки о березах из лесостепи Западной Сибири. Омск: изд-во Зап.-Сиб. отд. РГО, 1924—1925. Т.4. Вып. 2. С. 47—55.
2. Васильев В.Н. К систематике и географии дальневосточных берез // Ботан. журнал. 1942. Т. 27. № 1—2. С. 3—19.
3. Васильев В.Н. Каменная береза (*Betula Ermanii* Cham. s.l.): Экология и ценология // Ботан. журн.-нал. 1941. Т. 26. № 2—3. С. 172—206.
4. Давыдова М.И., Каменский А.И., Неклюкова Н.П., Тушинский Г. К. Физическая география СССР / Под ред. Г. К. Тушинского. Изд. 2-е. М.: Просвещение, 1966. 847 с.
5. Зеленая книга Сибири: редкие и нуждающиеся в охране растительные сообщества / Под ред. акад. РАН И. Ю. Коропачинского. Новосибирск: Наука, 1996. 397 с.
6. Дудов С.В. Ботаническая география хребта Тукурингра (на примере Зейского заповедника) / Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: изд-во МГУ, 2016.
7. Кабанов Н.Е. Типы растительности южной оконечности Сихотэ-Алиня // Труды ДВФ АН СССР. Сер. Бот., 1937. Т. 2. С. 273—332.
8. Колесников Б.П. Растительность восточных склонов среднего Сихотэ-Алиня // Труды Сихотэ-Алинского государственного заповедника. 1938. Вып. 1. С. 25—208.

9. Крестов П.В., Верхолат В.П. Редкие растительные сообщества Приморья и Приамурья. Владивосток: ДВО РАН, 2003. 200 с.
10. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48. С. 11—32.
11. Намзатов Б.Б. Биоразнообразие в байкальском регионе: уровни, подходы, состояние изученности (растительный мир) // Kyulovia. 2001. Т. 3. № 1. С. 3—12.
12. Санданов Д.В. Оценка состояния популяций восточноазиатских видов растений в различных частях ареала // Растительный мир Азиатской России. 2010. № 2 (6). С. 80—87.
13. Солодянкина С.В., Истомина Е.А., Сороковой А.А., Чепиного В.В. Моделирование потенциального ареала ветреницы байкальской (*Anemone baicalensis*, *Ranunculaceae*) с использованием данных тематических карт // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 92—99.
14. Сукачев В.Н. Растительность верхней части р. Тунгири Олекминского округа Якутской области (фитоценологический очерк) // Труды Амурск. экспед. ботан. исслед. 1910 г. СПб, 1912. Вып. 16. С. 1—286.
15. Цепелев В.Ю., Паниди Е.А., Торлопова Н.В., Бобков А.А. Использование характеристик растительного покрова таежной зоны для мониторинга климатических изменений XXI в. // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 40. С. 221—235.
16. Чурюлина А.Г., Бочарников М.В. Моделирование потенциального ареала реликтового вида (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) на основе климатических данных // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 54. С. 100—108.
17. Школьник И.М., Пигольцина Г.Б., Ефимов С.В. Оценка возможного влияния изменений климата на агроклиматические условия произрастания хлопчатника и яровой пшеницы в Средней Азии // Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 7—32.
18. Школьник И.М., Пигольцина Г.Б., Ефимов С.В. Воздействия глобального потепления на сельское хозяйство аридных зон Средней Азии в середине XXI века по оценкам ансамбля региональной климатической модели // Труды ГГО. 2018. Вып. 589. С. 5—49.
19. *Betula lanata* (Regel) V. Vassil. in GBIF Secretariat 2017. GBIF Backbone Taxonomy. URL: <https://www.gbif.org/occurrence/1697227861>. Last accessed 19.01.2019.
20. *Betula lanata* (Regel) V. Vassil. in Plantarium 2007—2018. Open on-line atlas and key to plants and lichens of Russia and neighbouring countries. URL: <http://www.plantarium.ru/page/view/item/6549.html>. Last accessed 19.01.2019.
21. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhrer J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geosci. Model Dev., 8. 1991—2007, doi: 10.5194 / gmd-8-1991-2015. Download.
22. Fick S.E., Hijmans R.J. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // Intern. J. Climatology. 2017. Wiley Online. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5086>.
23. Phillips S.J., Dudik M., Schapire R.E. A maximum entropy approach to species distribution modeling / Proc. 21st Intern. Conf. on Machine Learning. New York: ACM Press, 2004. P. 655—662.
24. Remya K., Ramachandran A., Jayakumar S. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India // Ecol. Engineering. 2015. V. 82. P. 184—188.
25. Watanabe M. et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity // J. Climate. 2010. V. 23. P. 6312—6335.

## КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ СВЧ-РАДИОМЕТРА, ОРИЕНТИРОВАННОГО В НАДИР

*П.В. Ключев<sup>1, 2</sup>, С.А. Лебедев<sup>2, 3</sup>*

<sup>1</sup> Тверской государственный университет, pasha.kliuev2015@yandex.ru

<sup>2</sup> Геофизический центр РАН

<sup>3</sup> Майкопский государственный технологический университет

Представлены результаты расчетов климатической изменчивости ледового режима Рыбинского водохранилища по данным СВЧ-радиометра, ориентированного в надир и находящегося на борту спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3, проводящих альтиметрические измерения. Анализ разности максимальной и минимальной радиояркостной температуры по трем частотам вдоль 59-го и 66-го треков для каждого цикла показал следующие климатические изменения ледового режима водоема за 1992—2017 гг. Ледостав наступает позднее и дата его начала смещается со скоростью  $0,886 \pm 0,181$  сут/год, а время начала вскрытия — со скоростью  $-0,206 \pm 0,046$  сут/год. Продолжительность ледостава сокращается за исследуемый интервал времени со скоростью  $-1,095 \pm 0,189$  сут/год.

*Ключевые слова:* Рыбинское водохранилище, ледовый режим, климатическая изменчивость, дистанционное зондирование, спутниковая радиометрия.

## CLIMATIC VARIABILITY OF THE RYBINSK RESERVOIR ICE REGIME BASED ON THE NADIR-ORIENTED MICROWAVE RADIOMETER

*P.V. Klyuev<sup>1, 2</sup>, S.A. Lebedev<sup>2, 3</sup>*

<sup>1</sup> Tver State University

<sup>2</sup> Geophysical Center RAS

<sup>3</sup> Maykop State Technological University

The paper presents the results of calculations of the climatic variability of the Rybinsk reservoir ice regime based on nadir-oriented microwave radiometers data of satellite TOPEX/Poseidon and Jason-1/2/3 satellites performing altimetry measurements. Analysis of the difference between the maximum and minimum brightness temperatures at three frequencies along 59 and 66 tracks for each cycle showed the following climatic changes of the reservoir ice regime for 1992—2017. Freeze-up occurs later and its start date is shifted at a rate  $0.886 \pm 0.181$  days/year, and the time of the opening of the autopsy is shifted at a rate  $-0.206 \pm 0.046$  days/year. The duration of ice formation is reduced over the studied time interval at a rate  $-1.095 \pm 0.189$  days/year.

*Keywords:* Rybinsk Reservoir, ice regime, climate variability, remote sensing, satellite radiometry.

### Введение

Лед на озерах и водохранилищах является частью криосферы Земли, которую затрагивают климатические изменения. Одновременно с изменением площади

льда в Арктике [4] происходят изменения ледового режима озер и водохранилищ [2, 3, 13].

Уникальную возможность исследования климатических изменений льдов Арктики и Антарктики, ледового режима на крупных озерах и реках дают данные дистанционного зондирования Земли [2, 5, 7, 10, 17, 18, 21, 24, 25]: радиометрия в видимом, инфракрасном и СВЧ (микроволновом) диапазонах; радиолокация с синтезированной апертурой; скаттерометрия; спутниковая альтиметрия. Преимущества и недостатки изучения льда различными методами дистанционного зондирования Земли представлены в табл. 1.

Таблица 1

Преимущества различных методов дистанционного зондирования Земли при изучении льда		
Прибор	Преимущества	Недостатки
<i>Пассивные методы зондирования</i>		
Радиометр видимого диапазона	Высокое пространственное разрешение	Чувствительность к облачному покрову и времени суток Низкая частота повторного обзора
Радиометр инфракрасного диапазона	Хорошее пространственное разрешение Высокая частота повторного обзора	Чувствительность к облачному покрову
Радиометр микроволнового диапазона	Всепогодность Высокая частота повторного обзора	Низкое пространственное разрешение
<i>Активные методы зондирования</i>		
Радар с синтезированной апертурой	Всепогодность Высокое пространственное разрешение	Низкая частота повторного обзора
Скаттерометр	Всепогодность Высокая частота повторного обзора	Низкое пространственное разрешение
Альтиметр	Всепогодность	Измерения в надир вдоль треков Низкая частота повторного обзора

По сравнению с 50-ми и 70-ми годами прошлого века, когда активно проводилась авиаразведка ледовой обстановки Рыбинского водохранилища, исследованием ледового режима водоема в настоящее время почти не занимаются.

При Рыбинской гидрометеорологической обсерватории (ныне метеостанции Рыбинск Ярославской ЦГМС) с конца XIX до начала XX века полевой сбор информации (на постах и рейдовых вертикалях, ледово-термических разрезах и съемках) считался одним из основных методов получения информации о ледовом режиме, а с 1947 до 1972 г. применялась авиационная разведка, с помощью которой было выявлены два типа замерзания водоема, зависящих от условий погоды (штиль/ветренная погода) [9, 11, 14]. В последнее время исследование ледовой обстановки Рыбинского водохранилища стало проводиться по данным

дистанционного зондирования Земли в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах [19]. Целью настоящей работы является исследование ледового режима Рыбинского водохранилища с помощью такого метода дистанционного зондирования, как СВЧ-радиометрии с ориентированием в надир.

### Объект исследования

Рыбинское водохранилище, сооруженное в 1947 г., представляет собой один из больших искусственных водоемов в России [20, 22]. Во время его наполнения плотины гидроузла перекрыли реки Волгу и Шексну. Рыбинское водохранилище, образованное Рыбинской ГЭС, расположено на расстоянии 767 км от истока реки Волги у г. Рыбинска. Волжский сток, направленный в Рыбинское водохранилище, определяется лежащими выше по течению Верхневолжским, Ивановским и Угличским водохранилищами, а также Вазуским водохранилищем, расположенным на реке Вазузе. Шекснинское водохранилище, располагающееся выше, зарегулировало сток реки Шексны [8, 15].

Основные характеристики Рыбинского водохранилища приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры Рыбинского водохранилища [1, 6]

Параметр	Значение
Нормативный подпорный уровень (НПУ)	101,81 м
Минимально допустимый уровень (мертвого объема, УМО)	96,91 м
Максимально допустимый форсированный подпорный уровень (ФПУ) при пропуске максимальных расходовобеспеченностью 0,01 %	103,81 м
Минимальный навигационный уровень (МНУ)	99,31 м
Площадь зеркала при НПУ	4550 км <sup>2</sup>
Площадь зеркала при УМО	2385 км <sup>2</sup>
Объем водохранилища при НПУ	
– полный	25420 млн м <sup>3</sup>
– полезный	16670 млн м <sup>3</sup>
Объем водохранилища при проектном ФПУ	35420 млн м <sup>3</sup>
Площадь мелководий глубиной до 2 м	910 км <sup>2</sup>
Наибольшая глубина	30,4 м
Средняя глубина	5,6 м

На Рыбинском водохранилище, как и в природных водоемах этой климатической зоны, осенью происходит образование первичных форм ледовых образований. Формирование ледяного покрова на водохранилище происходит обычно позднее, чем на реках, что обусловлено размером водохранилища, скоростью течений и ветра и тепловым режимом в нем [11].

Разные части Рыбинского водохранилища сковываются льдом несинхронно. Водоем покрывается льдом вначале в заливах и бухтах на мелководьях, а затем ледяной покров появляется на реке и в центральных плесах водоема. Более глубокие участки покрываются льдом позже, чем реки этой климатической зоны, на 6—8 дней.

На обширных пространствах водохранилища перед образованием сплошного ледяного покрова в избытке образуются сало, внутриводный лед, шуга, льдины. Под воздействием ветра лед начинает прибывать к наветренному берегу. По этой причине у наветренного берега ледяной покров формируется в первую очередь и характеристики его иные (поверхность торосистая, под льдом накапливается шуга) по сравнению со льдом у подветренного берега (поверхность льда ровная). Во время ледостава могут возникать промоины. Их появление можно обнаружить на узких участках искусственных водоемов по причине увеличения скорости течения и турбулентного перемешивания водных масс, тепла которых, накопленного в летний период, достаточно для таяния льда снизу. Полыньи зачастую расположены в зоне влияния водоприемников ГЭС, где скорость течения велика: воздействие Рыбинской ГЭС можно отследить на расстоянии 15 км от гидроузла [12].

Отличительной чертой ледового режима Рыбинского водохранилища, как и некоторых других водоемов, представляется просадка ледяного покрова на дно мелководий. Данное явление объясняется постепенным снижением уровня воды зимой. Ледяной покров деформируется, возникают трещины, в некоторых местах вода сочится на поверхность и формируется наслуз (наледь). Площадь ледяных полей, просевших до дна, зачастую может составлять десятки и даже сотни квадратных километров.

В разных частях Рыбинского водохранилища разрушение ледяного покрова и его очищение развиваются по-разному. В верхних частях водоема во вскрытии большая роль отводится динамическим факторам. Ближе к плотине влияние динамических факторов уменьшается. Обычного для рек ледохода здесь не бывает, но наблюдается дрейф льда, обусловленный влиянием ветра и в какой-то мере течений.

Очищение Рыбинского водохранилища от льда происходит на 20 дней позже, чем очищение водотоков этой климатической зоны. Типичные явления при вскрытии — образование заторов льда на участках выклинивания подпора и скопление льда у наветренных берегов и на отмелях подчас мощностью до 4 м. На ледовый режим в нижнем бьефе Рыбинского водохранилища влияет количество сбрасываемой воды в Угличском гидроузле и ее температура. Близ него вода сковывается льдом на короткое время или не сковывается вовсе. Лед образуется на протяжении порой нескольких десятков километров ниже гидроузла. Расположение границы ледяного покрова изменчиво: во время холодов и при уменьшении попусков воды из водохранилища она подходит к плотине гидроузла, во время оттепели и при увеличении попусков отходит от нее [11]. Начало ледовых явлений на водотоках бассейна Верхней Волги чаще всего приходится на начало ноября, и продолжают они в среднем 150—160 суток. Средние даты образования сплошного ледяного покрова и очищения от льда — 10 ноября и 20 апреля соответственно [1, 9, 20].

### Данные и метод

Изучение ледового режима Рыбинского водохранилища проводилось по данным микроволновых радиометров, ориентированных в надири, спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2/3 (J-1/2/3). Радиометр спутника T/P имеет рабочие

частоты 18, 21 и 34 ГГц (пространственное разрешение 43, 36 и 23 км соответственно) и спутников J-1/2/3 — частоты 18,7; 23,8 и 34,0 ГГц (пространственное разрешение 42, 36 и 23 км соответственно) [16]. По времени отбирались данные для следующих орбитальных циклов:

- Т/Р: фаза А, цикл с 1-го по 364-й (с 25 сентября 1992 г. по 3 августа 2002 г.);
- J-1: фаза А, цикл с 1-го по 260-й (с 17 января 2002 г. по 18 января 2009 г.);
- J-2: фаза А, цикл с 0-го по 303-й (с 14 июля 2008 г. по 24 сентября 2016 г.);
- J-3: фаза А, цикл с 0-го по 117-й (с 19 февраля 2016 г. по 16 сентября 2017 г.).

Два трека — 59-й (восходящий) и 66-й (нисходящий) — спутников Т/Р и J-1/2/3 пересекают центральную часть Рыбинского водохранилища, где ледяной покров присутствует каждую зиму (рис. 1). Измерения вдоль треков повторяются

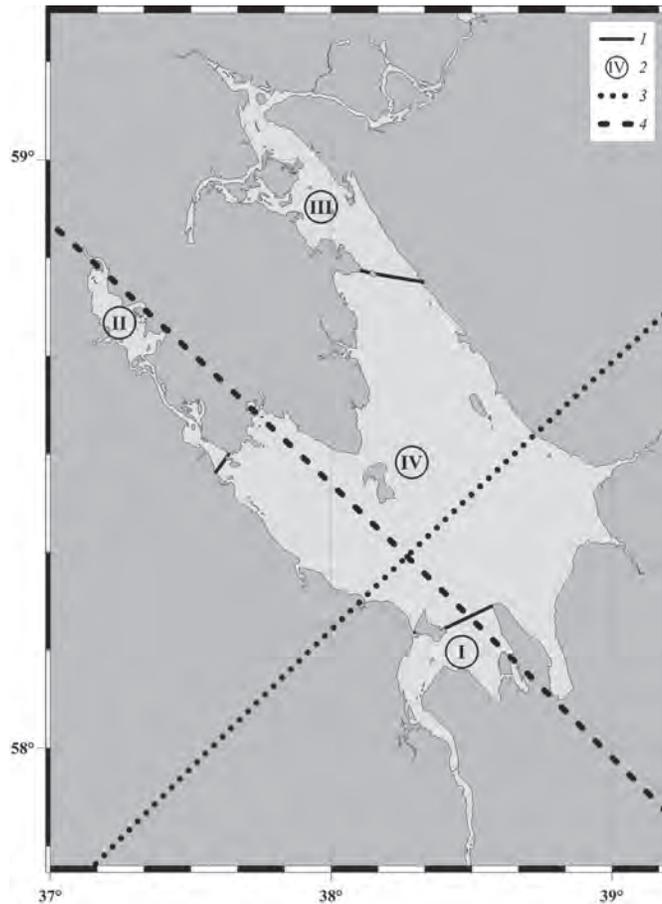


Рис. 1. Схема Рыбинского водохранилища [16].

1 — граница между плесами; 2 — плесы: волжский (I), моложский (II), шекснинский (III), главный (IV); 3 — трек 59 спутников Т/Р & J1 & J2 & J3; 4 — трек 66 спутников Т/Р & J1 & J2 & J3.

каждые 10 сут. Измерения радиометром производятся с периодичностью 1 с. В случае водных объектов большой ширины вдоль трека спутника, каким является Рыбинское водохранилище (см. рис. 1), это позволяет идентифицировать наличие ледового покрова по радиояркостной температуре, измеренной на частоте 18—18,7; 21—23,8 и 34—37 ГГц [23]. Преимущества использования СВЧ-радиометров для мониторинга ледовой поверхности различных водоемов обуславливает тот факт, что диэлектрическая постоянная и излучательная способность в надир для чистой воды и для чистого льда различаются более чем в два раза (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики  
разных типов засвеченных в надир поверхностей

Тип засвеченной поверхности	Диэлектрическая постоянная		Излучательная способность в надир	
	18,7 ГГц	34 ГГц	18,7 ГГц	34 ГГц
Чистая вода	60+35 <i>i</i>	20+33 <i>i</i>	0,37	0,43
Чистый лед	3,1+0,001 <i>i</i>	3,1+0,001 <i>i</i>	0,92	0,92

Метод анализа данных, полученных с помощью микроволнового радиометра, основан на определении и изучении разности значений максимальной и минимальной радиояркостной температуры, измеренных вдоль трека для каждого цикла на каждой из трех частот. Длина трека выбиралась таким образом, чтобы засвеченные области попадали и на сушу. За счет большой частоты измерений радиометром происходит перекрытие засвеченных областей, и при этом засвеченная область попадет как на акваторию водохранилища, так и на сушу (рис. 2). В итоге получается сглаженная область, которая свидетельствует об изменчивости радиояркостной температуры вдоль трека.

На рис. 3 приведены примеры кривых изменчивости радиояркостной температуры вдоль 59-го трека спутника J-3 за 19 июля и 19 февраля 2017 г. Из рисунка видно, что разность значений минимальной и максимальной радиояркостной температуры является наибольшей при отсутствии ледового покрова, а наименьшей при его наличии. Это связано с тем, что радиояркостная температура суши всегда выше радиояркостной температуры водной глади. Однако стоит отметить, что разность значений максимальной и минимальной радиояркостной температуры вдоль трека зимой меньше, чем летом.

Для дальнейшей обработки данных о временной изменчивости разности максимальной ( $T_{я\max}$ ) и минимальной ( $T_{я\min}$ ) значений радиояркостной температуры для каждого трека и для каждой частоты нормировались  $((T_{я} - T_{я\min}) / (T_{я\max} - T_{я\min}))$  для унификации программного обеспечения.

Примеры кривых изменения нормированной разности максимальной радиояркостной температуры для суши и минимальной радиояркостной температуры для зеркала Рыбинского водохранилища по частотам 18,7; 21; 34 ГГц за 2004 г. (с 1 января по 23 декабря) вдоль 66-го трека спутника J-1 во времени приведены

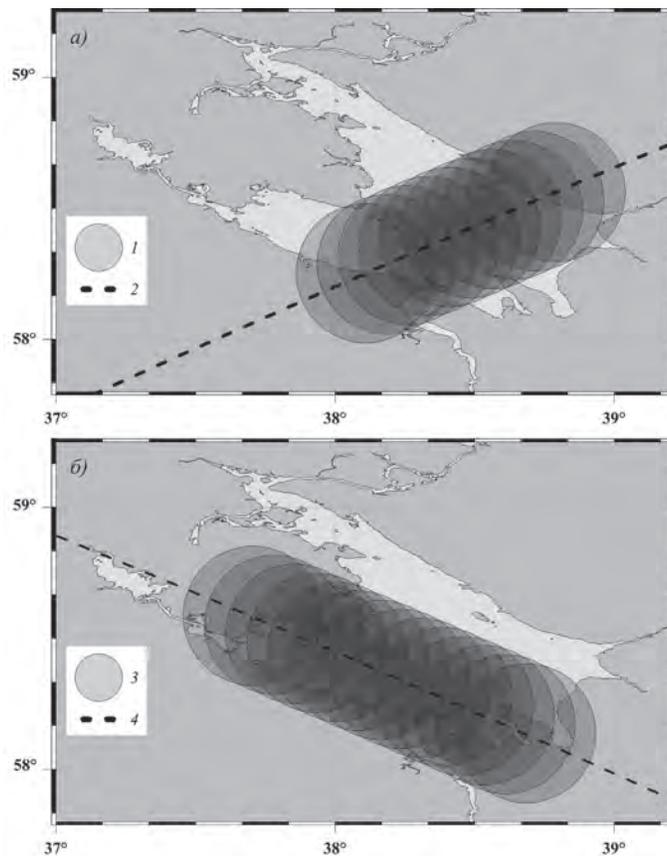


Рис. 2. Засвеченные области и сформированная сглаженная область в границах зеркала Рыбинского водохранилища на частоте 18,7 ГГц.

*a* — засвеченные области (1), расположенные на 59-м треке (2);  
*б* — засвеченные области (3), расположенные на 66-м треке (4).

на рис. 4. Кроме того, показана граница, отделяющая период наличия ледяного покрова на зеркале Рыбинского водохранилища от периода его отсутствия.

### Валидация метода

Применимость предложенного метода можно оценить, используя независимые *in situ* данные наблюдений за речным ледяным покровом из Информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России Центра регистра и кадастра [<http://gis.vodinfo.ru>]. Анализ спутниковых данных и данных наблюдений показал достаточно высокую их корреляцию: среднее значение по трем сравниваемым показателям (начало, окончание и продолжительность ледостава) составляет 0,84, что свидетельствует о близости результатов спутниковых

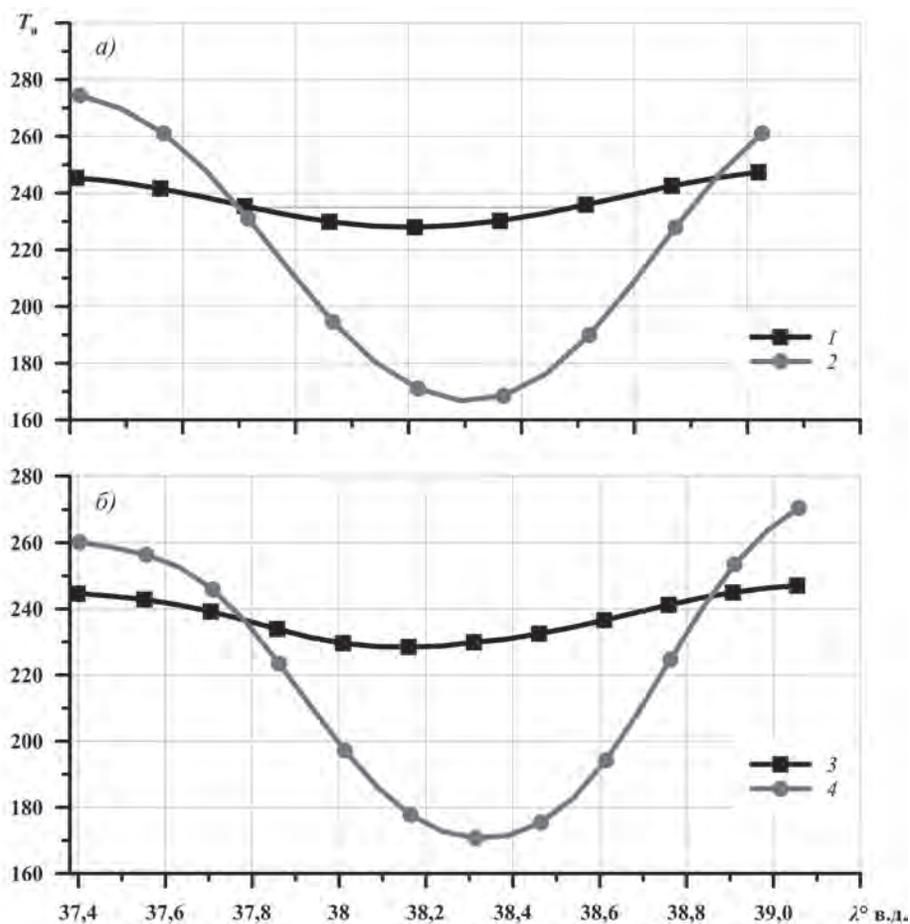


Рис. 3. Кривые изменения радиояростной температуры ( $T_r$ ) на частоте 18,7 ГГц спутника J-3.

*a* — вдоль 59-го трека за 19 февраля 2017 г. (1) и 19 июля 2017 г. (2);  
*б* — вдоль 66-го трека за 19 февраля 2017 г. (3) и 19 июля 2017 г. (4).

и полевых измерений. Коэффициент детерминации 0,7 означает наличие тесной связи дистанционных и *in situ* данных о ледяном покрове Рыбинского водохранилища.

Валидация показывает, что предложенный метод обеспечивает достаточно надежные результаты для определения времени замерзания, таяния и продолжительности ледостава на акватории Рыбинского водохранилища. Путем осреднения результатов, полученных на трех частотах, были определены характеристики ледовых условий в данном водоеме (начало, конец и продолжительность ледостава). Анализ временных рядов показывает выраженную межгодовую изменчивость.

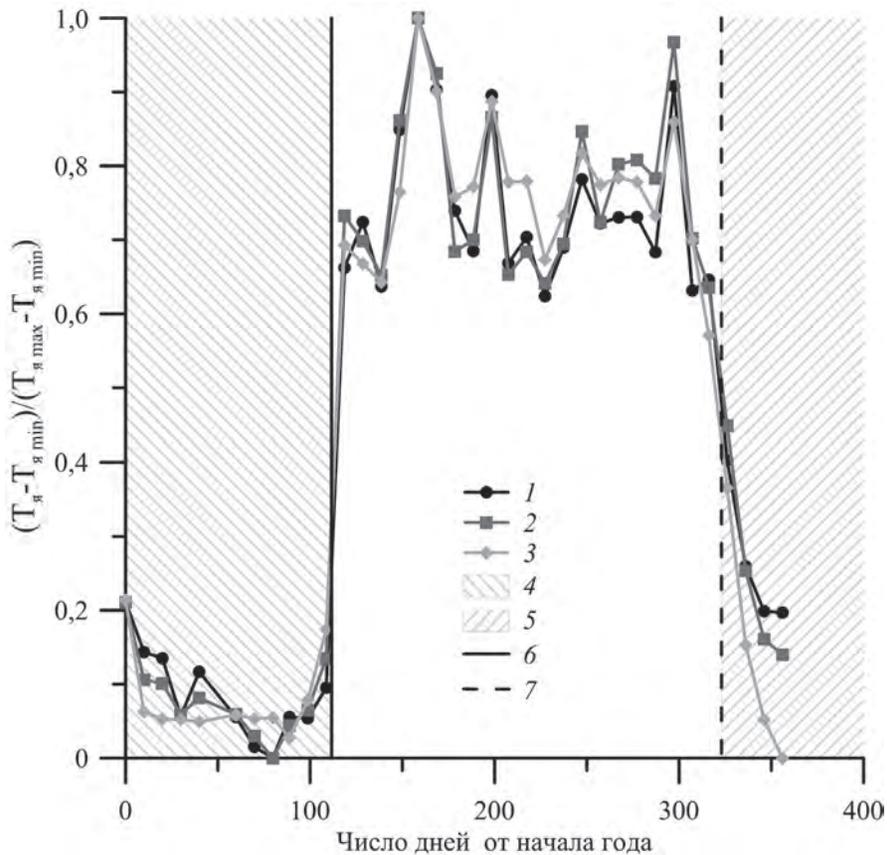


Рис. 4. Кривые изменения в течение года нормированной разности значений максимальной ( $T_{я \max}$ ) и минимальной ( $T_{я \min}$ ) радиояростной температуры  $(T_{я} - T_{я \min}) / (T_{я \max} - T_{я \min})$  для зеркала Рыбинского водохранилища за период с 1 января по 23 декабря 2004 г. по 66-му треку спутника J-1.

1 — на частоте 18,7 ГГц, 2 — на частоте 21 ГГц, 3 — на частоте 34 ГГц, 4 — ледяной покров в начале года, 5 — ледяной покров в конце года, 6 — граница лед — вода, 7 — граница вода — лед.

## Результаты

На рис. 5 представлена климатическая изменчивость дат начала ледостава и вскрытия ледяного покрова, а также продолжительности ледостава на акватории Рыбинского водохранилища за 1992—2017 гг. по данным альтиметра и бортового радиометра спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3. Дата начала ледостава сдвигается со скоростью  $0,886 \pm 0,181$  сут/год, а дата вскрытия — со скоростью  $-0,206 \pm 0,046$  сут/год. Продолжительность устойчивого состояния ледяного покрова за исследуемый интервал времени уменьшается со скоростью  $-1,095 \pm 0,189$  сут/год.

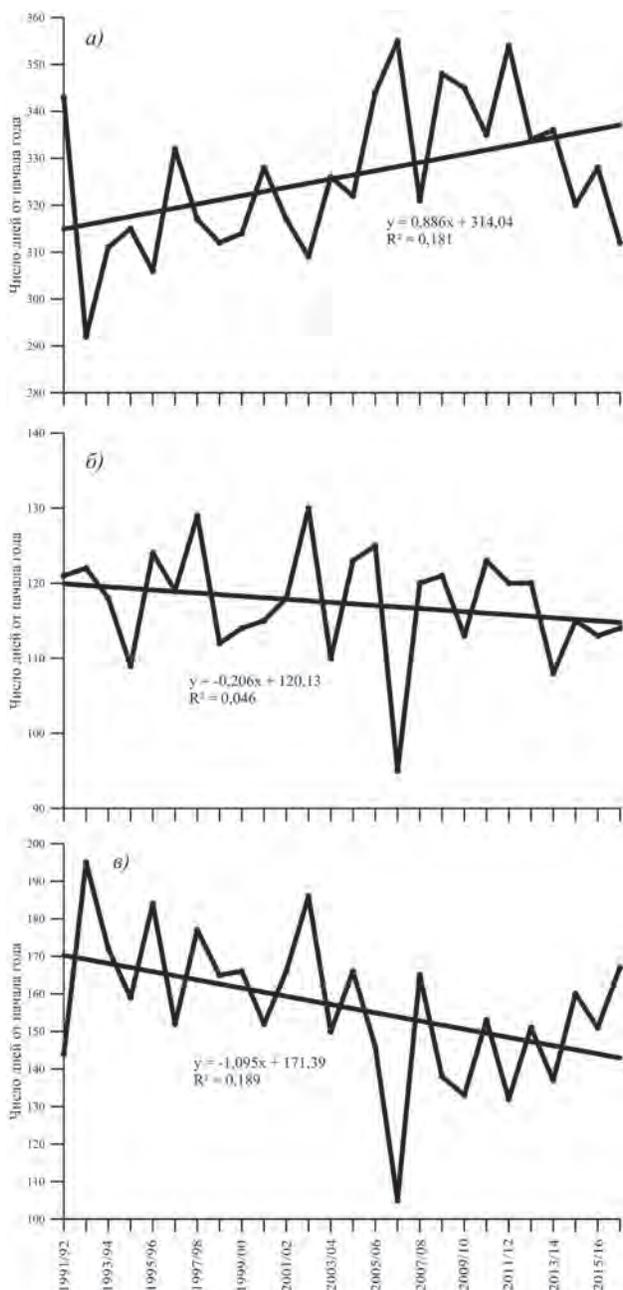


Рис. 5. Климатическая изменчивость времени начала ледостава (а), конца ледостава (б) и продолжительности ледостава (в) на акватории Рыбинского водохранилища за 1992—2017 гг., полученная в результате анализа данных бортового радиометра спутников Т/Р и J-1/2/3.

## Заключение

Предложен простой метод определения времени замерзания и вскрытия внутренних водоемов, основанный на анализе разности максимальной и минимальной радиояркостной температуры, измеренных микроволновым радиометром вдоль трека для каждого цикла. Показана климатическая изменчивость времени начала, окончания и продолжительности устойчивого состояния ледяного покрова на акватории Рыбинского водохранилища за период с 1992 по 2017 г.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Минобрнауки России (тема № 0145-2019-0004) (подготовка данных) при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-41117\_РГО\_а «Оценка современного гидрологического состояния крупных озер и водохранилищ Восточно-Европейской равнины на основе численного моделирования и новых алгоритмов обработки данных спутникового микроволнового зондирования» (интерпретация и анализ полученных результатов).*

## Список литературы

1. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А. Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 325 с.
2. Баклагин В.Н. Критический анализ спутниковых данных о пространственном распределении льда на озерах // Успехи современного естествознания. 2019. № 2. С. 41—48.
3. Баклагин В.Н. Совершенствование метода дешифрирования космических снимков больших озер на классы «вода» — «лед» // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2, 3. С. 290.
4. Бобылев Л.П., Шалина Е.В., Йоханнессен О.М., Заболотских Е.В., Сандвен С., Бабина О.И. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. Т. 78, № 1. С. 38—47.
5. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового изучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 2. С. 210—215.
6. Васильев Ю.С., Масликов В.И., Шилин М.Б. Режим регулирования стока Рыбинского водохранилища как основной фактор формирования экологической ситуации в осушной зоне // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 28—42.
7. Воробьев А.Е., Очирова Д.В. Особенности космического мониторинга геоэкологического состояния территории разрабатываемых месторождений нефти и газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. № 1 (52). С. 177—184.
8. Воропаев Г.В., Авакян А.Б. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
9. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги / Под ред. З.А. Видулиной, В.А. Знаменского. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
10. Горный В.И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов / В сб.: Труды III Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Москва, 10–12 ноября 2003 г. М.: Полиграфсервис, 2004. С. 10—16.
11. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
12. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 464 с.
13. Каретников С.Г. Опыт создания схем замерзания и вскрытия Ладожского озера / В сб.: Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г. Петро-заводск: изд-во Карельского НЦ РАН, 2015. Т. I. С. 433—439.

14. Клюев П.В. Лебедев С.А. Исследование ледового покрова Рыбинского водохранилища // Вестник ТвГУ. Серия «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 66—78.
15. Кудинов К.А. Природные ресурсы Молого-Шекснинской низины. Рыбинское водохранилище. Часть III. Вологда: Северо-Западное книжное изд-во, 1974. 255 с.
16. Лебедев С.А., Клюев П.В. Идентификация ледяного покрова Рыбинского водохранилища и исследование его межгодовой изменчивости по данным спутниковой альтиметрии и радиометрии // Вестник ТвГУ. Серия «География и Геоэкология». 2018. № 1. С. 20—36.
17. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Издательский центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. 366 с.
18. Леухин А.Н., Безродный В.И., Воронин А.А. Дистанционное зондирование Земли с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны // Ученые записки Казанского университета. Серия «Физико-математические науки». 2018. Т. 160. Кн. 1. С. 25—41.
19. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
20. Рыбинское водохранилище и его жизнь. / Под ред. Б.С. Кузина, Б.К. Штегмана. Л.: Наука, 1972. 363 с.
21. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.
22. Федоров М.П., Чусов А.Н., Шилин М.Б., Голубев Д.А., Масликов В.И., Шишкин А.И. Прикладная экология акваномов. СПб.: Политехнический университет, 2012. 255 с.
23. Rybushkina G., Troitskaya Y., Soustova I. Ice cover determination of the Volga and the Don River reservoirs on the base of Jason-2 satellite observations //2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014. С. 149—152.
24. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / Eds. L.L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. 464 p.
25. Satellite Altimetry for Earth Sciences / Eds. F. Frappart, O. Andersen, S. Lebedev, G. Ramillien. MDPI, 2019. 484 p.

## К ВОПРОСУ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТА ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ ВУЗА

*Н.А. Брейдер, Ю.А. Урютова*

Российский государственный гидрометеорологический университет, n.breider@rshu.ru

Представлен обзор существующей системы контроля деятельности вузов в Российской Федерации. Дана характеристика конкретных форм государственного контроля деятельности университетов. Проведен анализ действенности процедур контроля в отношении основных объектов контроля деятельности университета. Выделены два блока системы контроля деятельности университетов (внутренний и внешний контроль), а также три компонента внешнего контроля деятельности университетов (государственный контроль, профессиональный контроль, общественный контроль). Сделан акцент на значимости внутреннего контроля в системе управления качеством в РГГМУ.

*Ключевые слова:* система контроля, университеты, образовательные программы, аккредитация, государственная аккредитация, профессионально-общественная аккредитация образовательных программ, качество образования, рейтинги вузов, внутренний контроль, внутренний аудит.

## QUALITY CONTROL IN EDUCATION AS A TOOL FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF HIGHER EDUCATION

*N.A. Breider, Y.A. Uryutova*

Russian State Hydrometeorological University, rshu@rshu.ru

This paper provides an overview of existing monitoring system of higher education institutions in the Russian Federation: description of forms of state control over universities, analysis of monitoring procedure effectiveness in the main control objects of university, description of two control system units (internal and external controls), three components of external control (state control, professional control, public control). The article focuses on the significance of internal control in the quality management system in RSHU.

*Keywords:* monitoring system; university; educational programs; accreditation; state accreditation; professional-public accreditation of educational programs; quality education; ranking of higher education institutions; internal control, internal audit.

### Введение

В настоящее время российская система высшего образования претерпевает значительные трансформации, влекущие за собой снижение качества образования. Для процесса реформирования системы высшего образования характерно обеспечение современного качества образования в соответствии с проекционными потребностями личности и государства на основе сохранения его фундаментальных составляющих. Введение экономических моделей управления в систему образования, перенесение финансовой ответственности на плечи регионального

и муниципального бюджета, коррупция в сфере образовательных изданий, постоянная серия экспериментов над обучающимися ради погашения кредитов от международных финансовых институтов — все эти факторы способствуют полному регрессированию бывшей, недавно развитой системы российского высшего образования.

Целью данной статьи является характеристика конкретных форм государственного контроля деятельности университетов и оценка значимости внутреннего контроля в системе управления качеством в РГГМУ.

### **Современная ситуация в управлении высшим образованием на разных уровнях**

Масштабные изменения в системе высшего образования доказывают, что они объективно определяются социальными потребностями и могут рассматриваться как стратегические ориентиры государственной политики в образовательной сфере в целом. Такое понимание образовательной реформы нашло отражение в Федеральном законе «Об образовании в Российской Федерации».

Анализ современной ситуации в управлении высшим образованием на разных уровнях позволяет сделать вывод о том, что объект управления в условиях внедрения инноваций (экономических, технологических, педагогических, организационных) усложняется; возрастает скорость изменений в объекте управления; руководитель вынужден принимать решения в условиях ограниченности ресурсов (кадровых, временных, финансовых); динамично развивается конкурентная образовательная среда.

Федеральные государственные стандарты в области образования, выдвигая цели подготовки конкурентоспособных на рынке труда выпускников, формулируют условия, необходимые для осуществления образовательного процесса, а также называют в качестве атрибута выпускника, будущего специалиста, набор так называемых компетенций. Суть всех компетенций одна — способность решить ту или иную проблему.

Главная задача нашего университета — подготовка такого человека. Университет готовит как ученых, так и выпускников *интеллектуальных* профессий, способных креативно работать в различных сферах человеческой жизни, в том числе в образовании.

Мировыми трендами цивилизационного развития в настоящее время являются масштабная интеграция научного знания, инновационная деятельность, развитие естественно-научного направления. Следовательно, выпускники РГГМУ должны обладать соответствующими компетенциями. Отдавая должное роли фундаментальной науки, которую она играет в научной деятельности, и фундаментальным разделам курсов преподаваемых дисциплин, одновременно следует признать и актуальность гармонического единства фундаментальной и прикладной составляющих научно-образовательной деятельности.

В идеале подготовленный к реальной жизни выпускник вуза должен обладать комплексом умений в областях научно-исследовательской, инновационной

и организационной деятельности, способностью доводить полученные им в вузе знания и умения до создания с их использованием конкурентоспособной, востребованной на рынке продукции. Это возможно, когда в коллективе вуза, реализующем подготовку специалистов, поддерживается баланс между теорией и практикой, когда научные исследования с участием студентов и аспирантов (наряду с получением фундаментальных результатов) доводятся до внедрения в народное хозяйство и реализации на рынке.

Работа по подготовке квалифицированных и конкурентоспособных на международном уровне специалистов — со стороны государства, высших учебных заведений, работодателей и обучаемых — актуальна, поскольку уровень развития образования, науки и техники, степень практического использования научных достижений являются гарантом государственной независимости. Обучающиеся должны четко осознавать, что статус «конкурентоспособного специалиста» требует многолетнего и тяжелого труда, постоянного саморазвития и самообразования в выбранной области деятельности; отказа от простодушной веры в то, что некая счастливая случайность поднимет их вверх по социальной лестнице сразу на несколько ступенек; осознания меры ответственности перед собой и страной.

Научная деятельность в РГГМУ *изначально* носит прикладной характер: полученное новое знание естественным образом становится предметом преподавания. В практику университета вошли не только профессиональные научные конференции, повышающие научный и методический потенциал преподавателей, но и ежегодные научные студенческие конференции, специализированные научные конференции со студенческими секциями и школами для молодых ученых.

Компоненты программ подготовки для инновационной деятельности должны находить отражение в соответствующих учебных планах. В этой связи можно говорить о практико-ориентированных технологиях обучения. Они реализуются на основе связей вузов и предприятий (организаций) различного профиля посредством приглашения их представителей для ведения дисциплин учебного рабочего плана, проведения производственных и преддипломных практик непосредственно на производстве или в научных учреждениях, организации целевой подготовки, создания интегрированных структур в виде базовых кафедр и т.д.

Выпускаемые вузом специалисты в течение всего периода обучения, начиная с момента их поступления, призваны ориентироваться на послевузовскую деятельность по обеспечению нашей стране конкурентоспособных позиций в мировой экономике.

Инновационный характер современного рынка, связанный с обменом знаниями, тенденции перехода к информационному обществу выдвигают новые требования к оценке и контролю деятельности ведущих национальных и мировых университетов. Данные процессы весьма актуальны и для России, так как именно конкурентоспособная система высшего образования формирует мировоззрение и готовит кадры для реализации стратегических целей, стоящих перед страной.

В России за последние пять лет активизировалась нормотворческая деятельность по вопросам совершенствования контроля за деятельностью экономических субъектов, в том числе в сфере высшего образования, что свидетельствует об

актуальности проблематики совершенствования системы контроля за деятельностью университетов в условиях общества знаний.

В рамках внешнего контроля деятельности университетов предложено выделять три самостоятельных компонента:

- 1) государственный контроль,
- 2) профессиональный контроль,
- 3) общественный контроль.

### **Роль государственного и внутреннего контроля как инструментов эффективного управления образовательным процессом в вузе**

Государственный контроль деятельности университетов осуществляют органы государственной власти: Федеральная служба по надзору в сфере образования и науки (далее Рособнадзор) и Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (в части мониторинга системы образования). Контроль со стороны указанных органов государственной власти охватывает все аспекты деятельности университетов: отдельные образовательные программы, результаты и условия осуществления деятельности университетами.

В соответствии с законодательством Российской Федерации к специфическим формам государственного контроля за деятельностью вузов относят:

- а) государственную аккредитацию образовательных программ,
- б) федеральный государственный контроль качества образования,
- в) федеральный государственный надзор в сфере образования,
- г) мониторинг в системе образования.

Государственную аккредитацию (аккредитационную экспертизу) образовательных программ осуществляют эксперты и экспертные организации, аккредитованные Рособнадзором с целью подтверждения соответствия образовательной деятельности основным образовательным программам, заявленным вузом, а также требованиям федеральных государственных образовательных стандартов и (или) требованиям собственных образовательных стандартов ведущих вузов России [1].

Федеральный государственный контроль качества образования осуществляется сотрудниками Рособнадзора с целью оценки соответствия содержания и качества подготовки обучающихся по имеющим государственную аккредитацию образовательным программам федеральным государственным образовательным стандартам посредством организации и проведения проверок качества образования.

Федеральный государственный надзор в сфере образования осуществляется сотрудниками Рособнадзора с целью предупреждения, выявления и пресечения нарушений вузами требований закона и нормативных правовых актов Российской Федерации в ходе осуществления ими образовательной деятельности. Указанный контроль осуществляется по правилам, общим для проверки всех экономических субъектов с учетом специфики проверки образовательной деятельности, установленной Федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации».

Помимо указанных выше видов государственного контроля, Министерством науки и высшего образования Российской Федерации совместно с Рособрандзором ежегодно на основании данных федерального статистического наблюдения за результатами и условиями осуществления вузами образовательной деятельности осуществляется *мониторинг системы образования*. По результатам мониторинга определяются сведения о развитии высшего образования. Указанные сведения формируются на базе специальных показателей мониторинга системы образования.

Общественный контроль для нашей страны является новым, развивающимся видом контроля деятельности университетов. Он проводится различными российскими и международными общественными организациями и в отличие от государственного контроля не охватывает такой объект, как целевые (уставные) результаты деятельности университетов.

В соответствии с законодательством Российской Федерации конкретными формами общественного контроля деятельности университетов являются:

- общественная аккредитация (сертификация) образовательных программ,
- независимая оценка качества образования.

Общественная аккредитация (сертификация) образовательных программ для университетов является добровольной. Она может проводиться российскими, иностранными и международными общественными организациями. Предметом контроля при общественной аккредитации образовательных программ является признание (установление соответствия) уровня деятельности образовательной организации, которая отвечает критериям и требованиям российских, зарубежных и международных организаций.

Независимая оценка качества образования может быть двух видов:

- независимая оценка качества подготовки обучающихся,
- независимая оценка качества условий осуществления образовательной деятельности.

Таким образом, сфера образования в Российской Федерации — это единственная отрасль, где независимая оценка может проводиться в двух видах. Одним из них является оценка качества условий осуществления образовательной деятельности в соответствии с теми процедурами, которые используются в отношении других учреждений социальной сферы (а именно, культуры, здравоохранения, социального обслуживания). В этом случае сервисная составляющая услуги (условия ее предоставления) анализируется напрямую.

Второй вид независимой оценки, направленный на изучение качества подготовки студентов, не используется в других отраслях. По существу, мониторинг осуществляется в отношении профессиональной составляющей услуги — уровня освоения образовательной программы или ее части обучающимися [2].

Профессиональный контроль также является относительно новым видом контроля деятельности университетов в России. Он проводится представителями бизнеса, работодателей и профессиональных объединений.

В соответствии с законодательством Российской Федерации конкретными формами профессионального контроля деятельности университетов являются:

- профессионально-общественная аккредитация образовательных программ,
- рейтингование вузов.

Профессионально-общественная аккредитация образовательных программ осуществляется работодателями, их объединениями, а также их уполномоченными организациями. Она проводится с целью признания качества и уровня подготовки выпускников, освоивших образовательные программы в той или иной образовательной организации, отвечающие требованиям профессиональных стандартов, требованиям рынка труда к специалистам, рабочим и служащим соответствующего профиля.

На основании результатов профессиональной и общественной аккредитации могут быть сформированы *рейтинги образовательных программ* с указанием реализующих их организаций. Результаты независимой оценки качества образования могут быть представлены в различных формах, в том числе в виде *рейтингов университетов*, формируемых и публикуемых специализированными рейтинговыми агентствами на основе общедоступной информации, а также информации, получаемой от университетов. Рейтинги университетов формируются на базе специальных показателей.

По мнению авторов, следует уделять особое внимание внутреннему контролю деятельности университета, который проводится самой образовательной организацией.

В соответствии с законодательством Российской Федерации конкретными формами внутреннего контроля деятельности университетов являются:

- самообследование вуза,
- внутренний контроль деятельности университета как экономического субъекта,
- внутренняя оценка качества образования с применением элементов независимой оценки.

В процессе *самообследования*, осуществляются оценка образовательной деятельности, системы управления организацией, содержания и качества подготовки обучающихся, организации образовательного процесса, востребованности выпускников, качества кадровых ресурсов, образовательного, библиотечно-информационного обеспечения, материально-технической базы, функционирования внутренней системы оценки качества образования, а также анализ показателей деятельности университета.

Ключевыми элементами *внутреннего контроля* деятельности университета как экономического субъекта являются: контрольная среда, оценка рисков, процедуры внутреннего контроля, информация и коммуникация, оценка внутреннего контроля.

Основными целями проведения *внутренней оценки качества образования* в образовательной организации являются:

- формирование максимально объективной оценки качества подготовки обучающихся, согласно результатам уровня освоения образовательных программ;
- совершенствование структуры и обновление содержания образовательных программ, реализуемых в университете;

— совершенствование ресурсного обеспечения образовательного процесса в университете;

— повышение компетентности и уровня квалификации профессорско-преподавательского состава университета.

Данный вид внутреннего контроля (наряду с внедрением процедур *внутренней оценки эффективности реализации и освоения образовательных программ*) для университетов России является приоритетным в их стратегическом развитии [6].

### **Внутренний аудит как ключевой механизм внутренней независимой оценки качества образования в РГГМУ**

С апреля 2018 г. предусмотрено проведение мониторинга внедрения в деятельность университетов механизмов внутренней независимой оценки качества образования.

При принятии решения о выборе модели оценки вуз должен полагаться на поставленную цель и критерии оценки. Процедура оценивания предполагает возможность как внешнего контроля, так и самооценки учебного заведения.

В число ключевых способов самооценки, который гарантирует объективный анализ и экспертизу различных направлений деятельности университета, входит внутренний аудит [3].

В процессе изучения факторов, влияющих на эффективность системы менеджмента качества (СМК), внутренний аудит был отнесен к группе организационных факторов, стимулирующих эффективное управление качеством как базовых, так и вспомогательных процессов в университете.

Внутренний аудит является одним из инструментов управления для мониторинга и проверки эффективности внедрения и функционирования СМК. Применяя систему менеджмента, руководство университета имеет возможность постоянно отслеживать информацию о ее функционировании и эффективности. Результаты внутреннего аудита предоставляют информацию для анализа руководством университета, что позволяет разрабатывать корректирующие действия и выявлять возможности для совершенствования как отдельных процессов, так и системы в целом.

Налицо следующие преимущества указанного типа проверки перед традиционными.

1. Руководитель университета выступает инициатором контроля и, следовательно, будучи заинтересован в объективных результатах, не склонен выделять подразделения или должностных лиц, чья деятельность может быть выведена из проверки.

2. Как один из инструментов для улучшения аудит призван не выявлять неадекватных работников и наказывать их за некачественную работу, а определять несоответствия и причины их возникновения. Формируется атмосфера взаимного сотрудничества между проверяющими и проверяемыми лицами. Обе стороны мотивированы на решение выявленных проблем.

3. Аудитор не диктует правила поведения в проблемных ситуациях, но, изучая состояние дел, рекомендует руководителям процессов совместно определять пути решения наиболее сложных ситуаций, максимально адаптированных для данной структурной единицы.

4. Поскольку внутренние аудиторы являются непосредственными работниками образовательного учреждения, то в результате внутренних аудитов проводится сравнительный анализ — передача лучшего опыта одних кафедр другим, что способно оказать положительное влияние на функционирование всей системы качества в университете. [1]

Разумеется, существуют силы и факторы, которые могут противодействовать внедрению аудиторского контроля в практику управления. Эти факторы включают в первую очередь стереотипы в мышлении работников сферы образования, которые воспринимают аудиторов только как инспекторов. Кроме того, многие деканы и заведующие кафедрами в своей повседневной работе не всегда видят проблемы, возникающие в их подразделениях, и подчеркивают неуместность оценки своей деятельности кем-то.

Следующей потенциальной проблемой является назначение аудиторов. Это должны быть сотрудники, которые хорошо знакомы с нормативными документами, регламентирующими деятельность учебных заведений, теорию управления, педагогику и педагогическую психологию, пользующиеся авторитетом в коллективе. Компетентность аудиторов должна постоянно повышаться с помощью проведения методологических семинаров, а также рецепции опыта других высших учебных заведений [5].

Однако эта возможность реализуется в очень ограниченном объеме, так как сторонние университеты не всегда готовы приглашать стажеров и зачастую не хотят делиться конфиденциальной информацией, которая включает содержание образовательных программ и опыт их реализации.

В РГГМУ деканы и руководители отделов проверяют работу подведомственных им подразделений по привычным процессам — учебному, воспитательному, научному, но иногда испытывают серьезные трудности при проведении проверок процесса управления инфраструктурой и производственной средой, а также документооборота.

Эта проблема усугубляется отсутствием научно-методической литературы по аудиту в образовательных заведениях. Научные исследования отдельных учебных не дают полной картины и готовых алгоритмов для подготовки программы внутреннего аудита, определения показателей и критериев эффективности и результативности процесса, составления анкет, документации. Каждый университет развивает собственный опыт [2].

Программа аудита заведомо исключает возможность проверки аудиторами собственной работы, так как, например, заведующий кафедрой не может проверять деятельность своих сотрудников. При необходимости для получения дополнительной информации о степени удовлетворенности результатами процесса аудиторами может потребоваться информация относительно других процессов и подразделений вуза.

## Выводы

При подготовке плана аудита аудиторская группа должна рассмотреть возможность установления доказательств для получения ответов на следующие ключевые вопросы:

— соответствует ли текущая документация СМК университета установленным требованиям;

— имеет ли персонал проверенных структурных подразделений у себя в распоряжении необходимую документацию системы менеджмента качества, на которую они должны ориентироваться; знает ли персонал ее требования и использует ли их при выполнении своих функций;

— соответствует ли практическая деятельность персонала в проверяемой области требованиям документации СМК университета.

Последующий анализ отчетов по аудиту за последние несколько лет может наглядно показать, насколько изменилось число выявленных несоответствий и насколько точно реализованы планы корректирующих действий по отношению к предыдущим несоответствиям.

В заключение необходимо отметить, что плановые систематические внутренние аудиты системы менеджмента качества в университете способствуют своевременному принятию рациональных управленческих решений, направленных на устранение и предотвращение нарушений, что способствует повышению качества образовательных услуг, предоставляемых вузом, и вследствие этого удовлетворению как внутренних, так и внешних потребителей.

## Список литературы

1. *Артемова И. В.* Профессионально-общественная аккредитация в образовании // Советник в сфере образования. 2016. URL: <http://xn——7sbbaj7auwnffhk.xn—p1ai/article/28435> (дата обращения: 05.03.2019).
2. *Бульга Р. П., Ветрова И. Ф., Королев О. Г., Мельник М. В.* Совершенствование оценки эффективности деятельности подведомственных Правительству Российской Федерации образовательных и научных учреждений. М.: Изд. дом «Научная библиотека», 2014. 192 с.
3. *Бульга Р. П.* Классификация и стандартизация финансового контроля и аудита в Российской Федерации // Учет. Анализ. Аудит. 2017. С. 5—19.
4. *Бурцева К. Ю.* Сравнительный анализ аспектов деятельности университетов на международном уровне // Аудит и финансовый анализ. 2018. 2. С.349—350.
5. *Зайцева Г.* Независимая оценка качества образования: разбираемся в деталях / Аналитический портал «Отрасли права». 2015. URL: <http://xn——7sbbaj7auwnffhk.xn—p1ai/article/11160> (дата обращения: 05.03.2019).
6. О внесении изменений в Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» в части совершенствования целевого обучения: законопроект 352780-7. URL: <http://sozd.parlament.gov.ru/bill/352780-7> (дата обращения: 05.03.2019).
7. *Усанов Д. А., Романова Н. В.* Учет инновационной составляющей при оценке значимости научных работ, их авторов и научных организаций в условиях рыночной экономики // Инноватика и экспертиза. 2018. Вып. 2 (23). С. 62—66.

## ПЛАГИАТ В НАУЧНЫХ КОММУНИКАЦИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ЭПОХИ

*М.Г. Лазар*

Российский государственный гидрометеорологический университет, [mihai\\_lazar@mail.ru](mailto:mihai_lazar@mail.ru)

Исследуются плагиат и его формы как одно из нравственных нарушений научных коммуникаций, причины его роста в современном мире. Плагиат, автоплагиат и компиляция — неизбежное следствие погони за количеством публикаций. Они имеют свои причины и последствия, которые раскрыты в статье. В условиях вынужденной штамповки учеными как можно большего числа статей плагиат стал для части авторов неизбежным средством их создания, поэтому в статье дан анализ истории его возникновения, уточнены его определение и последствия, представлены способы снижения его объема и борьбы с ним.

*Ключевые слова:* общество постмодерна, постакадемическая наука, научная коммуникация, плагиат, компиляция, автоплагиат, причины этических нарушений, последствия плагиата.

## PLAGIARISM IN SCIENTIFIC COMMUNICATIONS OF THE POST-MODERN ERA

*M.G. Lazar*

Russian State Hydrometeorological University

The article explores plagiarism and its forms as one of the moral violations in scientific communications. The reasons for its growth in the modern world are discussed. In the conditions of post-academic science, when the number of publications in international databases has become the main criterion for assessing the productivity of scientists, scientific and educational institutions, there is a pursuit of their quantity at the expense of their quality. Plagiarism, auto plagiarism and compilation are the inevitable consequence of this pursuit of the number of publications, they have their causes and consequences, which are disclosed in the article. In the conditions of forced stamping by scientists as many articles as possible, plagiarism has become an inevitable means of their creation for some authors, therefore, the article analyzes the history of its occurrence, clarifies its definition and consequences, presents ways to reduce its volume and combat it.

*Keywords:* postmodern society, post-academic science, scientific communication, plagiarism, compilation, auto plagiarism, causes of ethical violations, consequences of plagiarism.

### Введение

Для социологов, придерживающихся деятельностного подхода, наука представляет собой форму совместной деятельности специально подготовленных людей, исследователей, направленную на выработку, хранение и распространение нового научного знания о природе, обществе и человеке, в которой коммуникации занимают особое место. Более того, «в основе большинства современных моделей науки (Б. Барнс, Б. Латур, Р. Коллинз, М. Мински) лежит постулат о том, что само знание также есть продукт социальных отношений, т. е. знание коммуникативно по своей природе... Основным каналом научной коммуникации считается научная литература, ... а научная статья является инструментом циркуляции знания,

своего рода контейнером для хранения и перемещения информации об окружающем мире [10, с. 68—69]. В условиях современной постакадемической науки, когда число публикаций в международных базах данных стало главным критерием оценки продуктивности ученых, научных и образовательных учреждений, исследование проблемы плагиата в научных коммуникациях приобретает особую актуальность. При этом научная статья на американский манер признается главной формой коммуникаций, а другие виды научных публикаций — монографии, тезисы докладов в сборниках, материалы научных конференций, составляющих значительную часть содержания современной научной коммуникации, — не учитываются.

Как важнейший элемент культуры наука зависит напрямую от уровня информационного обеспечения и взаимодействия участников создания новых знаний, от их нравственной культуры. Наука кумулятивная, т. е. она развивается, лишь опираясь на достижения предшественников и современников в данной научной дисциплине. «*Научные коммуникации охватывают совокупность форм и видов профессионального общения ученых, осуществляемых с помощью как стандартизированных регулярных письменных публикаций, так и широкого спектра устных или электронных средств общения*» [4, с. 85].

Коммуникации осуществляются в разных формах, но главным образом в виде письменных или электронных публикаций — статей в специализированных журналах, докладов, сообщений, выполняющих многообразные функции в науке. Однако в первую очередь публикации, статьи, научные доклады сообщают дисциплинарному научному сообществу о появлении нового продукта, поскольку научные журналы, в принципе, должны опубликовать только те статьи, которые прошли независимую научную экспертизу в виде внешних рецензий. Научная публикация требует профессионализма и ответственности, так как она — основа научного престижа, признания и «веса» ученого в научном сообществе. Поэтому плагиат и другие отмеченные ниже его формы заведомо являются нарушениями норм профессиональной этики ученого, этики научных коммуникаций.

Запрет на повтор-плагиат существовал и до информационного общества, однако появление Интернета и современных информационных технологий ощутило расширило возможности для плагиата и привлекло внимание к данному нарушению. Это сведение значимости всего многообразия существующих сегодня в мировой науке форм научных коммуникаций лишь к одному их виду — к статьям, абсолютизация их количества как главный показатель успешности ученого неизбежно усилили такие нарушения, как **плагиат, компиляция и автоплагиат**, хотя, конечно, это не единственная причина роста числа этих нарушений научного этоса. Особо следует рассматривать последнее явление, которое за рубежом называют автоплагиатом, а в России — множественными (повторными) публикациями. Он отличается от собственно плагиата тем, что здесь автор повторяет результаты (тексты) своих собственных прежних работ под разными названиями и с чуть измененным текстом, посылая их в разные журналы, предпочтительно в те, которые публикуют за деньги и без проверки на плагиат.

Задачей настоящей статьи является анализ причин увеличения объема плагиата, четкое определение его форм и последствий для современной науки, анализ возможных способов снижения его объема в научных публикациях.

### Плагиат, его сущность и формы

Стратегия улучшения показателей российских университетов в мировых рейтингах, как было указано автором в недавней статье [3, с.134–144], привела к погоне за количеством статей, опубликованных в англоязычных журналах, отраженных в базах данных Web of Science и Scopus, к искусственному росту числа публикаций за деньги, к коммерциализации процесса опубликования, созданию «мусорных» журналов, и тем самым к снижению качества научных публикаций. Свою роль в этом процессе сыграет рост бюрократизации управления наукой и образованием. Стало очевидным, что нельзя сводить вклад России в мировую науку, только учитывая долю отечественных статей в мировом массиве научных публикаций. Кроме того, в литературе на эту тему справедливо подчеркивается крен в сторону преувеличения роли американских ученых в мировой науке, хотя в современной передовой американской науке работает значительное число ученых — выходцев из СССР. Так, по мнению А.В. Юревича и И.П. Цапенко, «из нашей страны за рубеж эмигрировали целые научные школы, в США проживает более 16 тыс. докторов наук — выходцев из СССР, более 3000 выходцев из советской науки трудятся в Силиконовой долине и т.п.» [11, с.17].

На этом фоне общей ситуации в российской науке и высшем образовании представляется необходимым подробный анализ феномена плагиата, этой формы нарушения норм профессиональной морали и научной деонтологии, которому значительно способствовала компьютеризация процесса научного исследования. В науке во все времена действовала норма опоры на вклад предшественников по данной проблеме.

В условиях вынужденной штамповки как можно большего количества статей плагиат стал неизбежным средством их создания, и поэтому требуются анализ истории его возникновения, уточнение его определения, разработка способов снижения его объема и борьбы с ним.

Рассмотрим подробнее историю плагиата в искусстве и науке.

Первоначальный смысл слова «плагиат» восходит к латинскому «*plagium*» — переводится как похищение и продажа в рабство свободного человека. По мнению Э.Г. Баландиной, в XVII веке впервые данное понятие использовалось в смысле литературного воровства, «как умышенное присвоение авторства чужой работы или ее фрагмента» [1, с.67]. Собственно говоря, именно в этом смысле понятие «плагиат» наиболее точно выражает суть явления и в настоящее время. Плагиат — это воровство, это использование чужого научного результата без ссылки на работу его автора. По справедливому мнению цитированного выше автора, расширенное определение плагиата приводит к размыванию границ этого понятия. «В этом случае к плагиату можно причислить, кроме прямого заимствования, кражу идей, слов и словосочетаний, представление в качестве оригинального ранее

известного и т.п., ... абсолютное большинство литературных произведений, научных теорий и концепций, не говоря уже о произведениях искусства» [там же]. Плагиат возник вместе с письменностью и существует с незапамятных времен, однако очевидно, что появление печатного станка, печатной формы существования научных книг, статей, произведений художественной литературы ускорило распространение плагиата и увеличило его возможность.

С появлением Интернета и массовым распространением компьютеров воровство тоже стало массовым. Это вынудило власти во всех странах принимать более активные меры по борьбе с плагиатом, вначале, естественно, в странах с более продвинутыми технологиями — США, Япония, Германия. В России кампания борьбы с плагиатом стала вестись более активно лишь в первое десятилетие XXI века, особенно с связи с реформой высшего образования в русле Болонской декларации.

В 2007 г. программа «Антиплагиат» была принята ВАК для проверки плагиата в диссертациях и применения в вузах России. Забыли только широко ознакомить научную общественность с принятым в ней определением плагиата, что создавало много курьезных ситуаций, связанных с допустимой долей «заимствованного» текста в квалификационных (дипломных) работах и диссертациях разного уровня и, в частности, в научных статьях.

В наше время, как и в прошлом, отношение к плагиату в науке и литературе, в художественном творчестве различается. Если в науке плагиат легче обнаружить, он осуждается и преследуется, то в искусстве отношение к нему снисходительнее, поскольку здесь плагиат труднее обнаружить и доказать. Поэтому необходимо дать точное, более узкое определение этого понятия в науке. Плагиат — это использование фрагмента (фрагментов) текста другого автора без ссылки на его работу, это использование любых других форм информации из чужой работы, нового названия явления или закономерности.

Неискушенному, начинающему ученому (да и зрелым ученым тоже) будет полезно перечисление случаев, когда *необходимо обязательно указать в квадратных скобках не только название использованной работы (статьи, книги, электронного источника) и ее автора, а также и страницу. К ним относятся:*

- использование фрагмента текста публикации, *взятого в кавычки;*
- использование в своей работе чужого рисунка, таблицы, схемы, фотографии, статистических данных.

Отсутствие номера страницы при указании только названия работы в перечисленных выше случаях использования чужого результата для программы антиплагиата являются плагиатом. При использовании интернет-ресурсов обязательно следует указать не только название первоисточника, *но и в квадратных скобках дату обращения к данному источнику.* Многие студенты в своих курсовых, дипломных работах или магистерских диссертациях не считают необходимым это делать, указывая лишь название работы или сайта, видимо, по аналогии со школьным сочинением, в котором достаточно было назвать общий источник. К сожалению, часто это нарушение встречается даже в кандидатских диссертациях. Здесь возникает еще один интересный вопрос: почему при проверке по

программе «Антиплагиат» от Обнадзора в прошлые годы некоторых магистерских диссертаций доля оригинального текста улучшалась при удалении списка литературы?

Представляется целесообразным опубликовать и широко пропагандировать те части программы «Антиплагиат», которые касаются форм плагиата. Почему-то как в прошлом, так и в наши дни секретомания не ликвидирована. Вспоминается ситуация 70—80-х годов прошлого столетия, когда перечисление в одной из книг автора нарушений профессионально-этических норм при составлении библиографий, при соавторстве, цитировании и пр. интерпретировалось редактором издательства и горлитом (органом цензуры) как... подсказка того, как их нарушить.

К нарушениям профессионально-этических норм научного исследования относится и *компиляция*. Она внешне наукообразна, соблюдаются правила цитирования, программа «Антиплагиат» не обнаруживает в этом случае нарушений — вот только в работах такого рода нет ничего нового. Это подборка идей и фрагментов из разных работ по определенной теме, корректно оформленная, но не содержащая реально ничего нового по данной проблеме. Компильция может быть лишь полезным обзором по определенной теме. Поэтому некоторые журналы социально-гуманитарного направления и публикуют подобного рода работы именно под этим названием.

Третьей формой нарушений моральных норм в науке является *практика множественных (повторных) публикаций* одного и того же материала под разными названиями или с небольшими изменениями, именуемая за рубежом «*автоплагиатом*». Это нарушение отличается от плагиата тем, что здесь автор в своей «новой публикации» повторяет тексты своих собственных прежних работ. Такие авторы печатаются чаще всего в «мусорных» журналах, которые за деньги без рецензирования и проверки на плагиат публикуют все, что им присылают. Излишне писать о том, что эти «публикации» не имеют никакой научной ценности ни для кого, кроме как для их авторов, которые в условиях низкого финансирования науки и высшего образования пытаются выжить и надеются, защитив диссертацию, обеспечить себе приемлемую должность в НИИ или вузе. Этот контингент пишущих, как правило, не отличается особыми творческими способностями, поэтому пишут такие авторы свои работы, нарушая правовые и этические нормы — их статьи обычно содержат и плагиат, и ложные данные, и фальсификацию результатов исследований. В итоге значительная часть производимых в стране в последнее десятилетие «научных статей» и «диссертаций», особенно в области социально-гуманитарных наук, оказывается имитацией науки. Об этом явлении написано множество статей рядом авторов [3, 5, 6, 9].

### Последствия плагиата и способы ему противостоять

Публикация результатов исследования является центральным событием не только для самого ученого, но и, можно смело утверждать, для науки в целом. А вот последствия и интенсивность борьбы с плагиатом — разные на разных уровнях организации науки и общества.

*На уровне научной дисциплины* можно говорить о дисциплинарной матрице. Как утверждает Э.Г. Баландина, на этом уровне «ученому приходится решать противоречие между запретом на повтор плагиат и требованием связи с предшествующим массивом научного знания. Проблема решается сравнительно легко: это показано в «Социологии науки» М.Г. Петрова. ... Остается установить количественное соотношение авторского и цитируемого материала. Д.С. Прайсом была предложена квота цитирования, по крайней мере для естественных наук: работу следует признать имеющей научную ценность, если в одном печатном листе работы содержится 10—20 ссылок. Большее число ссылок заставляет заподозрить простую компиляцию или работу обзорного характера, меньшее может свидетельствовать о разрыве с научной традицией (Прайс, 1971, с. 49—155). Цифра 10—20 ссылок основана на изучении 154 авторитетных американских и европейских научных журналов» [1, с. 67—68]. Действительно, в последние годы появилась «мода» на перечисление в списке использованных источников значительного их числа, причем часть из них приводится, на взгляд автора настоящей статьи, лишь для создания впечатления эрудиции и аргументированности — от их отсутствия работа бы не пострадала.

Поскольку каждая научная дисциплина имеет свою дисциплинарную матрицу как элемент научной парадигмы — понятие, введенное Т. Куном в известной работе «Структура научных революций» (1968 г.), то для уровня дисциплинарной матрицы наличие плагиата не является существенной проблемой, ибо невозможно одно и то же открытие в науке совершить многократно, его авторство фиксируется патентом или публикацией. В крайнем случае, открытие, совершенное более или менее одновременно разными авторами, приводит к спору о приоритете либо к двойному названию открытого нового явления или новой научной закономерности. Есть еще вариант — не публиковать, но если не ознакомить научное сообщество с результатами своего исследования, то полученный результат не становится ценностью данной научной дисциплины, а потом и всей науки. В науке существует только то, что опубликовано.

*На уровне социальной матрицы*, т. е. культуры и менталитета определенной страны, в условиях индустриального или информационного общества, заинтересованности властей и общества в науке, т.е. при наличии социального заказа на определенный тип новых знаний, проблема плагиата становится более важной, так как затрагивает авторитет самой науки, научных школ и властей страны. Плагиат на этом уровне трактуется как воровство и мошенничество, а борьба с ним переводится в плоскость морали и права, что влечет за собой нравственную и правовую ответственность нарушителя.

В связи с этим вспоминается шумиха в румынских СМИ в 2013—2014 г., связанная с обвинением в наличии плагиата в докторской диссертации тогдашнего премьер-министра Румынии В. Понта, кандидата в президенты страны. Это стимулировало власть и научную общественность к разработке и принятию деонтологического кодекса исследователей по примеру стран Евросоюза [12]. Спор о наличии плагиата в диссертации остепененного политика был использован для его политической дискредитации, и указанный премьер-министр в итоге проиграл

президентские выборы в 2014 г. (хотя это была и не единственная причина его поражения).

Именно на социальном уровне ведется довольно успешно борьба с плагиатом. Что касается правового аспекта, то доказать факт присвоения нематериальной собственности юридически довольно сложно, поскольку в науке автор не имеет на нее исключительных прав, статья и знание как продукт научной деятельности становится общественной собственностью сразу после появления публикации (см. нормы этики науки КУДОС, разработанные американским социологом Р. Мертоном). Отсюда следует важный вывод: единственно реальным препятствием для распространения плагиата в науке остается чувство чести и порядочность самих ученых, ибо общество не может оставаться равнодушным к нарушениям норм этики ученого. Это предполагает соответствующую подготовку будущих ученых в духе корпоративной этики.

Однако факт плагиата в условиях большой (постакадемической) науки не только снижает авторитет науки и ее творцов, но приводит к финансовым и кадровым потерям, требующим противодействия. Эти меры противодействия плагиату формируются уже *на третьем, административном уровне* рассмотрения науки, связанном с управлением наукой и высшим образованием, в котором работает подавляющее число остепененных ученых России. На этом уровне, внешнем для науки и образования, плагиат является также нежелательным явлением, затрудняющим управление наукой, определение ее финансирования, но в то же время его обнаружение дает возможность увольнять, сокращать, лишать ученых степеней виновных, одним словом, осуществлять власть в науке. «Предполагается, что для выполнения подобных функций работники административных структур обладают необходимыми знаниями и квалификацией, что на практике бывает далеко не всегда... На самом деле сумма действий научной администрации приводит часто не к улучшению, а к ухудшению условий воспроизводства науки..., поэтому управление наукой представляет собой лучший или худший, но компромисс между дисциплинарной самоорганизацией науки и задачами внешнего управления» [1, с. 70].

Административная (бюрократическая) власть основана на принципе иерархии, она обеспечивает распределение людей в пространстве учреждения, с обязательным присутствием ученого «на рабочем месте». Еще в середине прошлого столетия французский социолог М. Крозье констатировал, что бюрократическая система управления малопригодна для творческих профессий, она больше препятствует делу, чем стимулирует деятельность. При бюрократической системе управления наукой и высшим образованием ученый становится *объектом* управления, объектом властных полномочий управленцев, включающих право администратора на установление определенных формальных норм трудовой дисциплины: числа научных публикаций, отчетности за определенное время работы, ответственности за выполнение индивидуальных планов, присутствие на рабочем месте определенное количество часов и пр.

Автор уже писал о наметившейся погоне за числом публикаций в последнем десятилетии, которая не способствует научному прогрессу [3]. Отметим,

однако, что повтор, репродукция, заимствования, т. е. привычка к плагиату и переписыванию текстов, является свойством общества постмодерна, в котором мы сейчас живем. Означает ли все это, что не надо бороться с плагиатом? Конечно, нет. Однако нельзя подходить к этому упрощенно, как предлагают некоторые авторы. Например, в интересной статье В.И. Левина после перечисления ряда практически осуществимых мероприятий, таких как: «1) проведение регулярных просветительских лекций для студентов, аспирантов, молодых преподавателей и научных работников по теме «История, суть и нормы научно-исследовательской работы»; 2) организация в вузах и НИИ постоянной службы контроля публикационной деятельности научных и педагогических работников с целью оперативного обнаружения уже имеющегося (а по возможности и опережающего выявления готовящегося) плагиата; 3) неукоснительное публичное наказание лиц, пойманных на плагиате», добавляется: «Всё очень просто — не требуется никаких затрат и никакого вмешательства государства, Диссернета и т.д. Нам остается только сформировать нормальную, действенную научную общественность» [6, с.143].

В том-то и дело, что *«все это не очень просто»*, ведь каждое отрицательное явление в науке, обществе имеет реальные и конкретные причины. Для их понимания рекомендую ознакомиться с работами известного ученого О.В. Михайлова, в частности с его двумя статьями: «Парадоксы цитирования в современной научной литературе» и «Административная система в науке и жизни России» [8, 9]. Кроме того, необходима публикация в открытой научной печати, с широкой предварительной рекламой программы «Антиплагиат», ее методических требований к научным публикациям, что, несомненно, будет способствовать уменьшению использования этого «способа подготовки» научных публикаций.

### Выводы

Проведенный анализ данного вида нарушения профессиональной морали позволяет прийти к выводу о том, что причины его существования многолики и разнородны, так как наука, являясь частью постоянно и быстро меняющегося общества постмодерна, воспроизводит многие черты его состояния.

К признанным причинам увеличения количества плагиата в научных коммуникациях (не только в России) можно отнести:

— появление технических средств, способствующих росту соблазна плагиата, формированию экранного мышления — массовое владение персональными компьютерами, ноутбуками, айфонами, смартфонами;

— отсутствие в курсах информатики разделов, знакомящих пользователей с этическими и правовыми нормами пользования компьютерами и Интернетом;

— отсутствие в системе среднего и высшего образования предметов, связанных с этикой, отсутствие преподавания самой этики или курса истории этических учений в большинстве школ и вузов России;

— низкий уровень нравственной культуры в научной среде, допускающей, в принципе, преднамеренный плагиат; это результат падения общего уровня нрав-

ственности в российском обществе в связи с переходом к новому типу общества, где деньги — главная ценность;

— погоня за количеством опубликованных статей как показателем «эффективности» отдельного ученого и научно-образовательных учреждений и усиление роли управленческо-бюрократического начала в науке, высшем образовании и обществе в целом [3];

— престижность наличия ученых степеней у людей, не занятых непосредственно наукой, а управляющих на разном уровне разными видами научной и образовательной деятельности, в том числе министров, депутатов, работников вузов, чиновников от науки и образования;

— низкая оплата труда в науке и образовании по сравнению с другими видами общественного труда, особенно по сравнению с бизнесом, вследствие чего получение ученой степени становится целью и средством улучшения материального положения и статуса в науке и образовании.

С учетом этих причин задача заключается не в том, чтобы искоренить это отклонение от морали и права — это практически невозможно, а в том, чтобы существенно уменьшить масштабы этого явления в науке и высшем образовании, устранив или уменьшив воздействие перечисленных выше факторов. Ведь наиболее очевидное последствие плагиата — это засорение науки устаревшей информацией, статьями, имитирующими научную деятельность, что усложняет поиск (даже с помощью Интернета) действительно новой научной информации в своей области исследования. Плагиат обесценивает роль научных публикаций, затрудняет поиск и нахождение реально ценных публикаций, нарушает этические нормы научной деятельности и научной коммуникации, а также правовые нормы интеллектуальной собственности. Создавшаяся ситуация с плагиатом диктует необходимость более активной пропаганды норм научной этики в процессе подготовки студентов, магистров и аспирантов всех профилей в курсах «Социология науки» для студентов, «Философские проблемы науки» для магистрантов и «История и философия науки» для аспирантов.

### *Список литературы*

1. *Баландина Э.Г.* Проблема запрета на повтор-плагиат в современной науке // Социология науки и технологий. 2015. Т. 6, № 1. С. 65—73.
2. *Григорьев В.Е.* Социология науки. Учебник. М.: Прогресс, 2018. 384 с.
3. *Лазар М.Г.* Последствия увлечения количественными показателями результативности в науке и высшем образовании // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 54. С. 134—144.
4. *Лазар М.Г.* Социология и этика науки в России: прошлое и настоящее. ФРГ: Palmarium Academic Publishing, 2016. 460 с.
5. *Левин В.И.* Плагиат в российской науке // Alma mater (Вестник высшей школы). 2014. Вып. 6. С. 111—114.
6. *Левин В.И.* Плагиат, его сущность и борьба с ним // Высшее образование в России. 2018. Т. 27, № 1. С. 143—150.
7. *Ломовицкая В.М.* Из истории изучения научных коммуникаций // Социология науки и технологий. 2017. Т. 8, № 4. С. 37—44.
8. *Михайлов О.В.* Парадоксы цитирования в современной научной литературе // Социология науки и технологий. 2016. Т. 7, № 4. С. 106—115.

9. Михайлов О.В. Административная система в науке и жизни России // Проблемы деятельности ученого и научных коллективов. 2016. № 2 (32). С. 8—30.
10. Попова Н.Г. Научная статья как ядро социотехнической сети по производству знания // Социология науки и технологий. 2017. Т. 8, № 1. С. 68—84.
11. Юревич А.В., Цапенко И.П. Фетишизм статистики: количественная оценка вклада российской социогуманитарной науки в мировую // Социология науки и технологий. 2012. Т. 3, № 3. С. 7—23.
12. The European Code of Conduct for Research Integrity. Revised Edition. Elaborat de: ALLEA — All European Academies. 2017. Disponibil la: <https://www.allea.org/wp-content/uploads/2017/05/ALLEA-European-Code-of-Conduct-for-Research-Integrity-2017.pdf>. [Дата обращения 25.04.2019].

## ТРАНСПОРТИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕЧНОГО ПОТОКА

*М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев*

Институт озероведения РАН, m-shmakova@yandex.ru

Рассмотрены основные закономерности сопряжения гидравлических переменных состояния речного потока. Сформулировано понятие фазового гидравлического пространства, проиллюстрированное примерами. Получена новая формула транспортирующей способности потока и проведен сравнительный анализ результатов вычислений по некоторым формулам транспортирующей способности потока на данных наблюдений за твердым стоком на североамериканских реках.

*Ключевые слова:* транспортирующая способность потока, расход наносов, расход воды, речной поток, фазовое гидравлическое пространство.

## TRANSPORTING CAPACITY OF RIVER FLOW

*M.V. Shmakova, S.A. Kondratyev*

Institute of Limnology

The paper deals with the basic rules of coupling of hydraulic variables of the river flow. The concept of phase hydraulic space is formulated and illustrated by examples. A new formula for the transport capacity of the river flow was obtained and a comparative analysis of the results of calculations using several formulas of the transport capacity of the flow was carried out. The calculations use the results of observations of solid flow in the North American rivers

*Keywords:* transport capacity of river flow, sediment flow, water flow, river flow, phase hydraulic space.

### Введение

Транспортирующая способность потока — это максимальный расход наносов, который может перенести поток при фиксированном расходе воды. Транспортирующая способность потока определяет процесс переотложения наносов в русле — основной фактор русловых процессов. При расходе наносов меньшем, чем транспортирующая способность потока, происходит вовлечение в движение донных отложений, размыв дна. При расходе наносов, начинающем превышать транспортирующую способность потока, происходит оседание движущихся наносов, увеличение отметок дна. Если фактический расход наносов в речном потоке соответствует его транспортирующей способности, то между процессами взвешивания и осаждения наносов наблюдается динамическое равновесие.

Учет соответствия между стоком наносов и характером русловых процессов определяет точность и надежность прогнозов русловых деформаций. Это позволит предвидеть возможные изменения морфодинамических типов русел, параметров их живых сечений и скорости размыва берегов и дна [7].

Известно, что для оценки расхода взвешенных и влекомых наносов существует достаточно много формул. Все эти формулы представляют собой зависимости количества перемещаемого вещества от переменных состояния потока. Часто эти формулы получены для отдельных водотоков или обобщены для рек одного типа. Кроме того, наличие в формулах эмпирических коэффициентов, физический смысл которых нередко неясен, сужает область применения этих формул. Однако именно оптимизация значений эмпирических коэффициентов позволяет минимизировать отклонение между результатами вычислений по расчетной формуле и данными наблюдений для отдельного расчетного створа.

При выводе же формулы транспортирующей способности потока сложно ориентироваться на данные наблюдений на конкретной реке, так как не на всех водотоках и не для всех периодов водности достигается предельное насыщение потока наносами.

Одним из определяющих факторов вовлечения частицы наносов в поток является режим турбулентности речного потока: пульсации скорости оказывают на частицы взвешивающее и поддерживающее их в потоке действие. Однако известно, что наличие в потоке твердого вещества значительно уменьшает пульсации скорости, течение становится относительно упорядоченным. В то же время осветленный поток, располагая большой размывающей способностью русла, при прочих равных условиях имеет более турбулентный режим движения.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что степень насыщения потока наносами имеет нелинейную зависимость от средней скорости потока и зависит, помимо прочего, от режима движения потока.

Таким образом, при выводе формулы транспортирующей способности потока должны приниматься во внимание не только зависимость количества перемещаемого вещества от переменных состояния потока, но и факторы, определяющие предельное насыщение жидкости взвесями. К этим факторам можно отнести взвешивающую способность потока, критерии Фруда и Рейнольдса, а также наличие в потоке мелких фракций. Известно, что высокое содержание мельчайших частиц увеличивает вязкость воды и вследствие этого влияет на способность потока к транспорту более крупных фракций. Таким образом, предел насыщения потока наносами зависит как от гидравлики потока, так и от состава транспортируемых наносов [4].

Наибольшее внимание к выводу формул транспортирующей способности потока (или формулы расчета незаилающей скорости) пришлось на время интенсивной разработки систем деривационных каналов в период первой половины прошлого века. При этом основная часть таких формул была основана на данных полевых наблюдений или экспериментов на лотках. В это время в СССР были проведены обширные исследования взвесенесущего режима оросительных каналов и насыщенных наносами рек. Результаты этих исследований легли в основу посторения расчетных схем, рекомендованных соответствующими нормативами.

Целью настоящей работы является анализ основных закономерностей сопряжения гидравлических переменных состояния двухфазного речного потока и

вывод и апробация нового расчетного выражения для оценки транспортирующей способности потока.

### Формулы для оценки транспортирующей способности потока

Приведем несколько формул для количественной оценки транспортирующей способности потока  $G_{\max}$  (кг/с) по общему расходу наносов, по которым в дальнейшем будут проводиться расчеты.

*Формула Е.А. Замарина* для гидравлический крупности  $0,002 \text{ м/с} < \omega < 0,008 \text{ м/с}$  получена на основании данных полевых наблюдений на земляных каналах [3]:

$$G_{\max} = Q \cdot 0,022 \left[ \frac{v}{\omega} \right]^2 \sqrt{hI}, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $v$  — средняя скорость потока ( $\text{м/с}$ );  $\omega$  — гидравлическая крупность частиц ( $\text{м/с}$ );  $h$  — средняя глубина потока ( $\text{м}$ );  $I$  — уклон.

*Формула В.Н. Гончарова* [2], рекомендуемая в СО 34.21.204-2005 [6] для расчета транспортирующей способности потока при условии  $u^*/\omega < 2,5$ , имеет вид

$$G_{\max} = \rho \cdot Q \frac{1 + \varphi}{800} \frac{d}{h} \frac{v}{v} \left( \frac{v^3}{v^3} - 1 \right) \left( \frac{v}{v} - 1 \right), \quad (2)$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}}{0,9\rho_{\text{в}}} \frac{gd}{\omega^2}},$$

$$v = 0,96 \sqrt{gd^{0,4} (d + 0,0014)^{0,6} \left( \frac{h}{d} \right)^{0,2}},$$

где  $u^*$  — динамическая скорость потока ( $\text{м/с}$ );  $\rho_{\text{гр}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  — плотность грунта и воды соответственно ( $\text{кг/м}^3$ );  $d$  — средний диаметр частиц ( $\text{м}$ );  $v_{\text{н}}$  — неразмывающая скорость потока ( $\text{м/с}$ ).

Область применения формулы В.Н. Гончарова обоснована опытами при условиях:  $10 \leq h/d \leq 1550$  ( $8,7 \leq h/d_{95} \leq 500$ );  $1 \leq v/v_{\text{н}} \leq 1,8$ .

*Формула Р.А. Бэгнольда* [10], построенная на выражении для работы, которую совершает речной поток, транспортируя взвешенные и влекаемые наносы, имеет вид

$$G_{\max} = Q \rho_{\text{гр}} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} \frac{C_f v^2}{gh} \left( \frac{0,13}{f - I} + \frac{0,01}{\omega/v - I} \right), \quad (3)$$

$$C_f = \left( \frac{k}{\ln(12h/\Delta)} \right)^2,$$

$$\Delta = \begin{cases} 3d_{90} & \text{при } \frac{\rho_b}{\rho_{гр} - \rho_b} \frac{u^{*2}}{gh} < 1, \\ 3 \frac{\rho_b}{\rho_{гр} - \rho_b} \frac{u^{*2}}{gh} d_{90} & \text{при } \frac{\rho_b}{\rho_{гр} - \rho_b} \frac{u^{*2}}{gh} \geq 1, \end{cases}$$

где  $f$  — коэффициент внутреннего трения;  $I$  — уклон русла;  $k$  — постоянная Кармана, равная 0,41;  $\Delta$  — эффективная высота выступов шероховатости;  $d_{90}$  и  $d_{95}$  — диаметр частиц 90 и 95 %-ной обеспеченности соответственно (мм).

Формула (3) описывает сумму транспортирующей способности потока для взвешенных и донных наносов.

В приведенных выше формулах динамическая скорость  $u^*$  (м/с) рассчитывается как отношение касательного напряжения  $\tau$  (кг/(м·с<sup>2</sup>)) на границе к плотности воды:

$$u^* = \sqrt{\tau / \rho_b}.$$

Касательные напряжения на дне в соответствии с квадратичным законом сопротивления записываются в виде

$$\tau = -\lambda |v| v,$$

$$\lambda = gn^2 h^{-1/3},$$

где  $\lambda$  — гидравлическое сопротивление на дне реки,  $n$  — коэффициент шероховатости русла.

### Вывод формулы транспортирующей способности потока

Очевидно, что один и тот же расход воды способен перенести количество наносов  $G = [0; G_{\max}]$ , где  $G_{\max}$  — максимально возможное количество наносов, переносимое данным расходом воды за единицу времени, или транспортирующая способность потока. При  $G = 0$  поток будет осветленным и его скорость будет минимальной, а глубина возрастет. При  $G = G_{\max}$  скорость потока возрастет, а глубина уменьшится [11]. При этом каждому крайнему случаю соответствует один и тот же расход воды ( $Q = \text{const}$ ). Очевидно, что заданный расход воды при постоянной ширине потока может быть получен различными сочетаниями глубины и скорости.

Отложив по одной оси скорость, а по другой глубину потока и нанеся на этот график точки, соответствующие одному значению расхода воды  $h_i v_i = Q/B = \text{const}$  при ширине потока  $B = \text{const}$ , получим функцию, представляющую **фазовое гидравлическое пространство потока** (пространство состояний системы). Каждому сочетанию глубины и скорости ( $h_i v_i = Q/B = \text{const}$ ) будет соответствовать расход наносов  $G_i$ . Значение расхода наносов для каждого сочетания определяется транспортирующим потенциалом потока. Таким образом, транспортирующий

потенциал потока представляет собой массу твердого вещества, переносимого за единицу времени через поперечное сечение потока при постоянном расходе воды, определяющую соотношение скорости и глубины потока. Транспортирующий потенциал потока меньше транспортирующей способности потока или равен ей (при постоянном расходе воды).

Крайние точки полученной функции определяются физикой процесса, и им соответствует состояние осветленного потока ( $h_{\max}, v_{\min}$ ) с одной стороны и транспортирующей способности потока ( $h_{\min}, v_{\max}$ ) с другой стороны.

Очевидно, что область осветленного потока будет характеризоваться максимальной неразмывающей скоростью, тогда как область максимальной взвесенесущей нагрузки на поток — минимальной заиляющей скоростью.

Фазовое гидравлическое пространство характеризуется морфометрией русла и характером подстилающей поверхности, а транспортирующий потенциал потока определяется в соответствии с количеством поступившего в поток твердого вещества. Вид функции, аппроксимирующей фазовое гидравлическое пространство, определяется формой поперечного сечения, а сама функция представляет собой соотношение скорости и глубины для постоянного расхода воды в расчетном створе. На рис. 1 приведен пример фазового гидравлического пространства для русла прямоугольной формы.

За основу при выводе формулы транспортирующей способности потока прием аналитическую формулу общего расхода наносов [8]

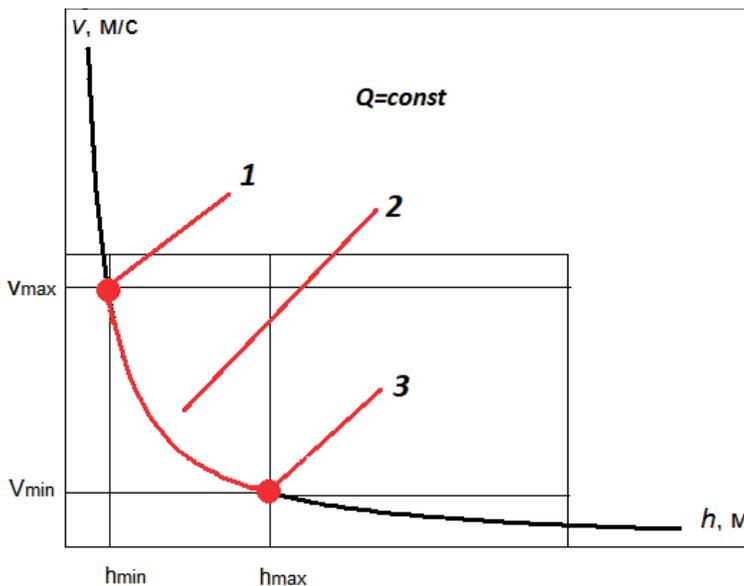


Рис. 1. Фазовое гидравлическое пространство потока в расчетном створе при  $Q = \text{const}$ .

1 — область максимальной взвесенесущей нагрузки на поток,  
2 — область физически возможных значений, 3 — область осветленного потока.

$$G = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} Q \left[ \frac{c}{hg} - (1-f)\rho_{\text{в}} I \right], \quad (4)$$

где  $c$  — сцепление частиц грунта при сдвиге (кг/(м·с<sup>2</sup>)).

Формула (4) является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества, которое построено на основании сил, действующих в системе водный поток — донные отложения — наносы [8].

Расход наносов  $G$  и глубина в формуле (4) взаимосвязаны между собой, то есть потоку при фиксированном расходе воды и уклоне соответствует именно та глубина, которая определяется текущей взвесенесущей нагрузкой потока. Таким образом, при увеличении расхода наносов скорость потока повысится, а глубина уменьшится. Это подтверждается и данными экспериментов, приведенными в [11].

Изложенное выше дает основание полагать транспортирующую способность потока  $G_{\text{max}}$  равной расходу наносов при максимальном значении скорости потока (и минимальной глубине) для заданного расхода воды:

$$G_{\text{max}} = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} Q \left[ \frac{c}{h_{\text{min}} g} - (1-f)\rho_{\text{в}} I \right], \quad (5)$$

где  $h_{\text{min}}$  — минимально возможная глубина при фиксированных расходе воды, уклоне и крупности донных отложений (м).

Минимально возможная глубина обусловлена морфометрией русла и расходом воды. Уменьшение  $h_{\text{min}}$  уже практически невозможно, так как в пределах значения этой глубины будет происходить интенсивное оседание взвешенного вещества на дно.

Таким образом, расчет транспортирующей способности потока предваряет оценка величин  $h_{\text{min}}$  или  $v_{\text{max}}$ .

Для оценки граничной, так называемой заиляющей скорости  $v_{\text{max}}$ , при которой либо смесь в потоке осаждается, либо меняется качественное состояние потока — поток становится вязким, можно использовать, например, выражение [5]

$$v_{\text{max}}^2 = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} \frac{1}{2} gh. \quad (6)$$

Согласно формуле (6) минимальная глубина потока будет равна

$$h_{\text{min}} = \sqrt[3]{2 \frac{\rho_{\text{с}} - \rho}{\rho} \frac{Q^2}{B^2 g}}. \quad (7)$$

Тогда выражение для транспортирующей способности потока (5) с учетом формулы (7) примет вид

$$G_{\text{max}} = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} Q \left[ \frac{c}{g \sqrt[3]{2 \frac{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{гр}}} \frac{Q^2}{B^2 g}}} - (1-f)\rho_{\text{в}} I \right]. \quad (8)$$

Таким образом, полученная аналитическая формула транспортирующей способности потока (8) основана на балансе сил, действующих в системе водный поток — донные отложения — наносы [8], формуле сопротивления грунта сдвигу [1] и формуле граничной скорости осаждения частиц в потоке воды [5].

Следует заметить, что полученная формула (8) имеет некоторые ограничения для расчетов. При значении параметра  $c = 0$  (как и получалось при оптимизации параметров формулы для некоторых водотоков) определяющей переменной состояния расхода наносов является расход воды.

### Объекты моделирования

Для расчетов по формулам транспортирующей способности потока использовались данные наблюдений на 15 гидрометрических створах, расположенных на американских реках штатов Аляска, Айдахо, Колорадо, Вашингтон и Висконсин. Наблюдения на этих водотоках проводились в 70—80-х годах прошлого столетия, и результаты исследований приводятся в отчете «Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams», опубликованном геологической службой министерства внутренних дел США [12] и находящемся в свободном доступе.

В отчете представлены данные о взвешенных и влекомых наносах, измеряемых почти одновременно. Кроме того, в отчете приводятся гидравлические переменные состояния и гранулометрический анализ донных отложений и наносов. Диапазон основных гидравлических характеристик рек, в пределах которых проводились расчеты, приведен в работе [9].

### Примеры фазового гидравлического пространства

На примере некоторых североамериканских рек, имеющих прямоугольную форму поперечного сечения расчетного створа, проиллюстрируем фазовое гидравлическое пространство. Прямоугольная форма поперечного сечения подтверждается линейным характером связи  $Q = f(h)$ .

На рис. 2 а приведены графики связи средней глубины потока и расхода воды. Красными линиями обозначены области с одинаковыми расходами воды и соответствующими этим расходам разными значениями глубины. В пределах каждой области расходы воды различаются не более чем на 3 %, что значительно выше точности измерения этой величины. Это дает основание полагать значение расхода воды в пределах выделенной области постоянным и рассматривать среднюю глубину (и скорость течения) потока в виде переменных относительно этого расхода воды.

На рис. 2 в представлено поле точек, соответствующее участкам, выделенным на рис. 2 а, с подписанными значениями общего расхода наносов (кг/с). В основном (в 80 % случаев), для всех рассматриваемых областей малым значениям глубины в пределах одного и того же расхода воды соответствует большее значение общего расхода наносов. Это является подтверждением представленной выше теории фазового гидравлического пространства.

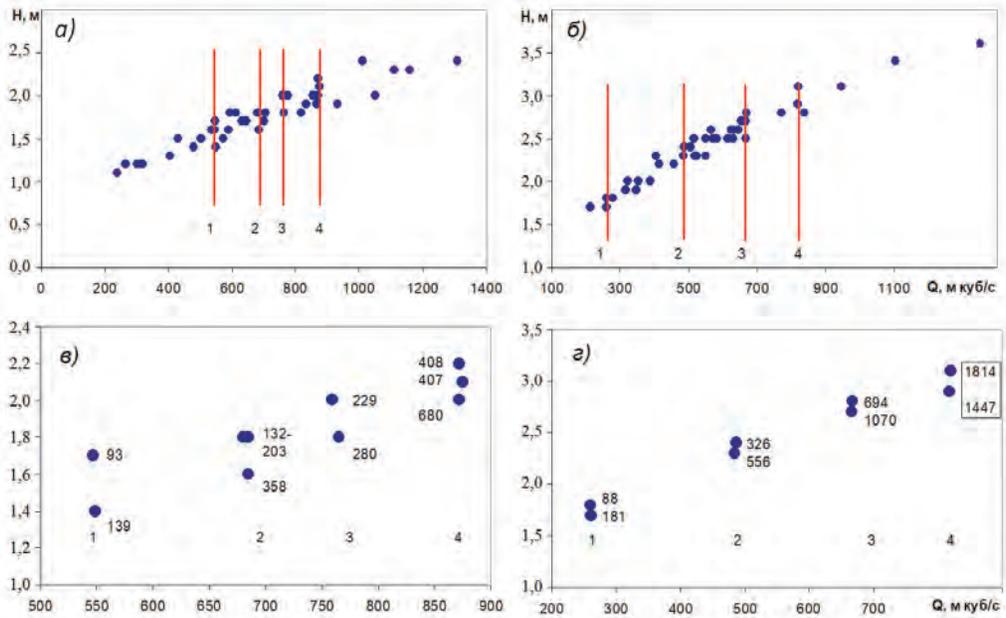


Рис. 2. Связь средней глубины потока и расхода воды (а и б) и поле точек (цифры — значения общего расхода наносов (кг/с)), соответствующее выделенным выше участкам (в и з).

а и в — Susitna River, б и з — Chulitua River.

### Расчеты. Качественная оценка

В основу дальнейших расчетов положены формулы транспортирующей способности потока (1) — (3) и (8). Основным критерием качества вычислений будет служить условие того, что наблюдаемые значения общего расхода наносов не будут превышать рассчитанные значения этой величины. Такая, несколько условная и, скорее, качественная оценка корректности работы формул объясняется тем, что для расчетных водотоков отсутствует информация о достижении взвесенесущей нагрузки потока максимально возможных значений. Иными словами, нет ясности, соответствует ли измеренный расход наносов  $G_{\text{наб}}$  транспортирующей способности потока  $G_{\text{max}}$ . Подобный качественный анализ допускается и, например, в СО 34.21.204-2005: «в этом случае верхняя огибающая характеризует транспортирующую способность потока» [6].

Эта качественная оценка дополняется еще одним требованием: рассчитанные значения должны в разумных пределах отклоняться от измеренных, то есть рассчитанные максимальные значения расхода наносов  $G_{\text{max рас}}$  должны соответствовать гидравлическим условиям водотока.

В общем виде изложенные условия соответствия можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} G_{\text{наб}} \leq G_{\text{max рас}} \leq k \cdot G_{\text{наб}}, \\ k \in \left[ 1, \frac{G_{\text{max}}}{G_{\text{наб}}} \right], \end{cases} \quad (9)$$

где  $k$  — безразмерный коэффициент, определяющий степень наполненности русла перемещаемыми наносами (по результатам наблюдений).

Для формулы (8) параметры трения приняты равными тем параметрам, которые были оптимизированы для периода большой и средней водности в расчетах по аналитической формуле расхода наносов [9]. Ввиду того что для некоторых водотоков в результате подбора параметр  $c = 0$ , в расчетах были задействованы данные измерений только для половины расчетных водотоков.

Для формулы Бэгнольда коэффициент внутреннего трения подбирался так, чтобы условия соответствия (9) соблюдались самым оптимальным образом.

Выполнение условий применимости формулы Гончарова имело место лишь для семи из пятнадцати водотоков, а для формулы Замарина — для тринадцати водотоков.

В табл. 1 приведены значения относительного числа случаев непревышения  $\delta$  (%) наблюдаемых значений расходов наносов рассчитанными, средние относительные отклонения  $\sigma_{\text{общ}}$ , % (между рассчитанными значениями транспортирующей способности потока и наблюдаемого общего расхода наносов) и  $\sigma_{\text{min}}$ , % (только между рассчитанными значениями транспортирующей способности потока, не превышающими наблюдаемые, и наблюдаемого общего расхода наносов). Последний показатель отражает степень отклонения в сторону явно ошибочного расчета, поскольку расчет  $G_{\text{max}}$  предполагает выполнение условия (9). Средние относительные отклонения вычислялись по формуле

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|G_{\text{рас}} - G_{\text{изм}}|}{\min(G_{\text{изм}}; G_{\text{рас}})} \cdot 100\%.$$

Таблица 1

Результаты расчетов по формулам транспортирующей способности потока

Формула	$\delta$ , %	$\sigma_{\text{общ}}$ , %	$\sigma_{\text{min}}$ , %
Замарина	45	555	671
Гончарова	38	819	882
Бэгнольда	24	849	434
(8)	33	87	66

Выбор минимального из рассчитанного и наблюдаемого значений расхода наносов в знаменателе дает возможность уйти от занижения среднего относительного отклонения в случае, когда рассчитанное значение близко к нулю. В этом случае среднее относительное отклонение, рассчитанное традиционным способом, стремится к 100 %, что занижает ошибку расчета.

На рис. 3 наглядно представлены результаты вычислений по четырем расчетным формулам. Степень качественного соответствия рассчитанных значений

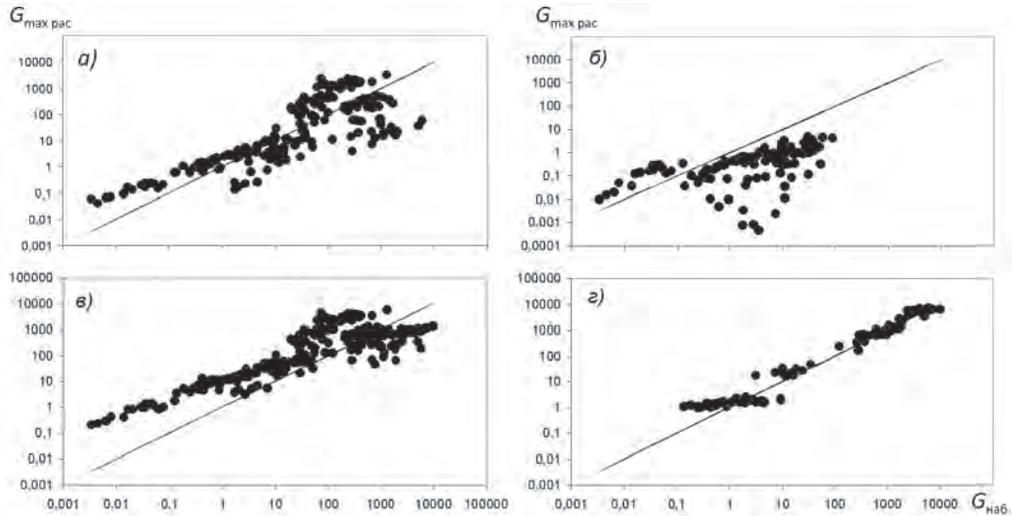


Рис. 3. Результаты вычислений  
транспортирующей способности потока по разным формулам.

*a* — формула Замарина, *б* — формула Гончарова, *в* — формула Бэгнольда, *з* — формула (8).

общего расхода наносов наблюдаемым значениям демонстрирует превышение рассчитанных точек над линиями биссектрис.

Результаты расчетов, приведенные выше, проиллюстрировали в обобщенном виде то, что в основном (55—76 %) рассчитанные значения расходов наносов превышают наблюдаемые значения. Однако наиболее соответствуют порядку величин наблюдаемых расходов наносов значения, рассчитанные по формуле (8): отклонение  $\sigma_{\text{общ}}$  составило 87 %. Для этой же формулы получены и наиболее адекватное значение показателя  $\sigma_{\text{min}}$ , равное 66 %.

### Количественная оценка

В основу расчетов для проведения количественной оценки качества расчетных формул легло сопоставление рассчитанных по приведенным выше формулам и наблюдаемых значений транспортирующей способности потока. Для расчетных водотоков при наблюдаемой средней глубине потока по формуле (6) были рассчитаны минимальные значения незаиляющей скорости потока  $v_{\text{max}}$ . Эти значения были сопоставлены с наблюдаемыми значениями скорости  $v$ , которым соответствует средняя глубина. При примерном равенстве скоростей  $v$  и  $v_{\text{max}}$  можно предполагать, что измеренный расход наносов соответствует транспортирующей способности потока  $G_{\text{max набл}}$ . Выявленные значения  $G_{\text{max набл}}$  сравнивались со значениями  $G_{\text{max}}$ , рассчитанными по формулам транспортирующей способности потока, приведенным выше.

В табл. 2 приведены данные для расчета и результаты вычислений для створа Fork Toutle River near Kid Valley. Для этого створа, единственного из всех расчетных створов, значения  $v$  и  $v_{\max}$  показали достаточную близость. Расхождение между этими величинами находится в пределах 1—15 %. Вычисления  $G_{\max}$  проводились по всем приведенным в работе формулам за исключением формулы Гончарова ввиду несоблюдения условий применимости этой формулы для расчетного водотока.

Как видно из табл. 2, наилучшее соответствие наблюдаемых и рассчитанных значений транспортирующей способности потока показала формула (8). Среднее относительно отклонение для этой формулы составило 29 %. Для формул Замарина и Бэгнольда рассчитанные значения  $G_{\max}$  оказались существенно ниже наблюдаемых.

Таблица 2

Данные для расчета и результаты вычислений транспортирующей способности потока для створа Fork Toutle River near Kid Valley

$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$v_{\max}$ , м/с	$v$ , м/с	$B$ , м	$h$ , м	$G_{\max \text{ набл}}$ , кг/с	$G_{\max}$ , кг/с		
						Замарин	Бэгнольд	(8)
185	2,9	2,8	56	1,1	5090	38,99	352	3367
110	2,6	2,4	56	0,9	1883	16,42	181	1953
123	2,6	2,6	56	0,85	2045	21,18	269	2417
147	2,6	2,4	59	0,85	1714	21,32	260	2607
153	2,8	2,4	59	0,98	1978	22,16	225	2348

## Выводы

Многие формулы для расчета транспортирующей способности потока и минимальной незаилающей скорости были получены опытным путем для каналов в условиях максимальной загроуженности потока наносами. Для естественных же водотоков выбор формулы для расчета транспортирующей способности потока и оптимизация параметров формулы крайне затруднены из-за отсутствия данных достоверных наблюдений за предельно возможным расходом наносов в потоке. Ввиду этого расчеты, приведенные в данной работе, носят несколько условный характер. Тем не менее полученные результаты как раз и демонстрируют незаконченность теоретических исследований в изучении транспортирующей способности естественных водотоков.

Понятие фазового гидравлического пространства, предложенное в работе, наглядно иллюстрирует соотношение основных переменных состояния потока — глубины, скорости потока и расхода наносов, что подтверждается данными наблюдений на расчетных водотоках.

## Список литературы

1. Бабков В.Ф., Быковский Н.И., Гербурт-Гейбович А.В., Тулаев А.Я. Грунтоведение и механика грунтов. М.: Дориздат, 1950. 334 с.

2. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат. 1962. 366 с.
3. Замарин Е.А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах. М.-Л.: Гострансиздат, 1951. 82 с.
4. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 393 с.
5. Ламаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение, 1988. 256 с.
6. СО 34.21.204-2005 «Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов». СПб: изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. 104 с.
7. Чалов Р.С. Сток наносов, транспортирующая способность потоков и их роль в формировании речных русел // География и природные ресурсы. 2011. № 3. С. 20—27.
8. Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб: изд-во ВВМ, 2018. 149 с.
9. Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Анализ и расчеты твердого стока (на примере североамериканских рек) // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С. 51—66.
10. Paul J. Visser. Application of sediment transport Formulae to sand-dike breach Erosion // Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering. Report № 94-3. Faculty of Civil Engineering. Delft University of Technology, 1995.
11. Vanoni V.A. Sediment transportation mechanics: suspension of sediment // J. Hydr. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. 1963. 89.
12. <http://pubs.usgs.gov/of/1989/0067/report.pdf>

## О СТАТЬЕ «ТРАНСПОРТИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕЧНОГО ПОТОКА»

*В.М. Католиков*

Государственный гидрологический институт, v.katolikov@mail.ru

Обсуждаются закономерности сопряжения гидравлических переменных состояния речного потока и полученная новая формула транспортирующей способности потока, представленные в статье М.В. Шмаковой, С.А. Кондратьева «Транспортирующая способность речного потока». Авторами вводятся новые понятия «фазовое гидравлическое пространство» и «транспортирующий потенциал потока». Однако использованная при этом авторами функция является чисто алгебраической и не соответствует объективным законам гидравлики, а использование ее в качестве гидравлического закона равномерного установившегося движения жидкости нарушает и даже отвергает элементарные гидравлические законы, приводя к парадоксальным выводам.

*Ключевые слова:* гидравлические характеристики потока, скорость потока, расход наносов, гидравлический режим.

## ABOUT ARTICLE “TRANSPORTING CAPACITY OF THE RIVER FLOW”

*V.M. Katolikov*

State Hydrological Institute

The regularities of conjugation of hydraulic variables of the state of the river flow and the obtained new formula for the transporting ability of the stream are presented in the article by M.V. Shmakova, S.A. Kondratiev "The transporting ability of the river flow" The authors introduce new concepts of "phase hydraulic space" and "transporting flow potential". But the function used by the authors is purely algebraic and does not correspond to the objective laws of hydraulics, and its use as a hydraulic law of uniform steady motion of a liquid violates, even rejects elementary hydraulic laws, and leads to paradoxical conclusions.

*Keywords:* hydraulic flow characteristics, flow rate, sediment flow rate, hydraulic mode.

По структуре статья М.В. Шмаковой и С.А. Кондратьева содержит следующие разделы: Введение; Формулы транспортирующей способности потока; Вывод формулы транспортирующей способности потока; Объекты моделирования; Примеры фазового гидравлического пространства; Расчеты. Качественная оценка; Количественная оценка; Выводы; Список литературы. Безусловно, подобная структура научной статьи допустима, но она очень отличается от общепринятой и рекомендуемой обычными редакциями научных журналов.

Ключевой идеей статьи является понятие «транспортирующая способность потока», однако уже в приведенном авторами определении данного понятия допущена весьма существенная и принципиальная с гидравлической точки зрения ошибка. Авторами статьи дается следующее определение: «Транспортирующая способность потока — это максимальный расход наносов, который может перенести поток при фиксированном расходе воды». В то же время в Гидрологическом словаре А.И. Чеботарева [1] это определение звучит следующим образом:

«Транспортирующая способность потока — это предельный расход наносов, который способен транспортировать поток при заданных гидравлических характеристиках потока: уклоне, скорости, глубине». И К.В. Гришанин во всех своих монографиях (см., например, [2]) указывает на то, что транспортирующая способность потока — это предельный расход наносов при заданных *гидравлических характеристиках потока (скорости и глубине)*, а не при заданном *расходе воды*.

Принципиальность этой подмены заключается в том, что в последующем авторы используют ее для введения еще одного ключевого понятия: «фазовое гидравлическое пространство», означающего различные сочетания скорости потока и его глубины при постоянном расходе воды и, если следовать авторской трактовке термина «транспортирующая способность», при постоянном предельном расходе наносов. Таким образом, с точки зрения авторов один и тот же предельный расход наносов возможен при различных сочетаниях глубины и скорости, в то время как классическая трактовка термина «транспортирующая способность потока» этого не допускает.

Другим ключевым и новым, вводимым авторами в данной статье, понятием является понятие «фазовое гидравлическое пространство». Используя гидротрическую формулу расчета удельного расхода воды  $q = v/h$ , авторы строят гиперболический график, соответствующий этой формуле при условии, что  $q = \text{const}$ , и в поле этого графика устанавливают границы фазового гидравлического пространства. При этом авторы принимают, что «при  $G = 0$  поток будет осветленным и его скорость будет минимальной, а глубина возрастет. При  $G = G_{\text{max}}$  скорость возрастет, а глубина потока уменьшится (где  $G$  — расход наносов)», что и определяет границы фазового пространства на рис. 1. Очевидно, что область осветленного потока будет характеризоваться максимальной неразмывающей скоростью, тогда как область максимальной взвесенесущей нагрузки на поток — минимальной заиляющей скоростью. При этом из рис. 1 следует парадоксальный вывод о том, что при гиперболическом *возрастании* скорости потока выше «минимальной заиляющей» начнется процесс осаждения наносов, т. е. процесс заиления русла.

Здесь же авторы вводят и новое понятие ««транспортирующий потенциал потока», который представляет собой массу твердого вещества, переносимого за единицу времени через поперечное сечение потока при постоянном расходе воды, определяющую соотношение скорости и глубины потока». Из этого определения следует второй парадоксальный вывод о том, что фактический расход наносов (его авторы зачем-то и называют новым термином «транспортирующий потенциал потока») в равномерном установившемся потоке определяет соотношение скорости и глубины потока в пределах «фазового гидравлического пространства». При этом «транспортирующий потенциал потока меньше или равен транспортирующей способности потока (при постоянном расходе воды)».

Из приведенных выше утверждений следует, что авторы относятся к графику на рис. 1 как к объективному закону соотношения скорости потока и его глубины в зависимости от расхода наносов. В этой связи необходимо сказать следующее.

Каждый автор имеет право на различные манипуляции с математическими выражениями, но только до тех пор, пока этим выражениям не начинают придавать смысл математической записи объективного закона природы, в данном случае закона равномерного установившегося движения жидкости. А авторы данной статьи именно так и поступают, поскольку с их точки зрения «фазовое гидравлическое пространство» — это пространство реальных объективных соотношений скорости потока и его глубины в зависимости от расхода наносов. Однако они при этом забывают, что классическое уравнение равномерного установившегося движения жидкости называется уравнением Шези и имеет следующий вид:

$$v = C\sqrt{hI}.$$

Если придать этому уравнению иной вид:

$$v^2 = (C^2 I)h,$$

то мы увидим, что в соответствии с законом равномерного установившегося движения жидкости соотношение между скоростью потока и глубиной является квадратичным и прямо пропорциональным и определяется не расходом наносов, а коэффициентом гидравлических сопротивлений, т. е. коэффициентом  $C$ , получившим в гидравлике название «коэффициент Шези». При этом графическим выражением этой зависимости является не гипербола, а парабола, а минимальному значению скорости совсем не обязательно соответствует максимальное значение глубины потока, а скорее, даже наоборот.

Из всего сказанного следует, что использованная авторами для введения понятия «фазовое гидравлическое пространство» функция  $q = vh$  является чисто алгебраической и не соответствующей объективным законам гидравлики, а использование ее в качестве гидравлического закона, описывающего равномерное установившееся движение жидкости, нарушающее и даже отвергающее элементарные гидравлические законы, приводит к парадоксальным выводам. В этой связи понятие «фазовое гидравлическое пространство», так же как и крайние точки полученной функции, не имеет физического (гидравлического) объективного смысла.

Ознакомление с методом выведения формулы транспортирующей способности потока тоже вызывает много вопросов.

Аналитической формулой общего расхода наносов, положенной авторами в основу вывода формулы транспортирующей способности потока, является формула (4):

$$G = \frac{\rho_{\text{гп}}}{\rho_{\text{гп}} - \rho_{\text{в}}} Q \left[ \frac{c}{hg} - (1-f)\rho_{\text{в}} I \right],$$

где  $c$  — сцепление частиц грунта при сдвиге (кг/(м·с<sup>2</sup>)).

Эта формула, которая, по мнению авторов, является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества и построена на основании сил, действующих в системе водный поток — донные отложения — наносы, неоднократно критиковалась в научных дискуссиях. Однако поскольку целью данной

статьи не является обоснование правомерности предложенной формулы, то мы оставляем этот вопрос за пределами настоящего рассмотрения — каждый автор вправе использовать выведенную им и опубликованную ранее формулу.

В данной статье авторы утверждают, что «расход наносов  $G$  и глубина в формуле (4) взаимосвязаны между собой, то есть потоку при фиксированном расходе воды и уклоне соответствует именно та глубина, которая определяется текущей взвешенной нагрузкой потока. Таким образом, при увеличении расхода наносов скорость потока увеличится, а глубина уменьшится».

Хотелось бы обратить внимание на то, что из формулы (4) совершенно не следует сделанный авторами вывод. В формуле (4) глубина является аргументом, а не функцией, т. е. независимой от функции переменной, а расход наносов — функцией, т. е. величиной, зависящей от аргумента (глубины потока). Авторы же в своем утверждении поменяли местами аргумент и функцию и сделали ошибочный, но далеко идущий вывод.

Кроме того, следует обратить внимание авторов на то, что в формуле (4), кроме глубины, есть еще один аргумент — расход воды, который можно представить в виде  $Q = bvh$ . Тогда при умножении всего математического комплекса, стоящего в скобках, на произведение  $bvh$  значение глубины, стоящее в знаменателе, сократится и обратно пропорциональная зависимость  $G$  от  $h$  станет прямо пропорциональной.

При такой записи формулы (4), предложенной авторами, даже поменяв местами функцию и аргумент, нельзя сделать вывод о том, что «при увеличении расхода наносов скорость потока увеличится, а глубина уменьшится». Тем не менее авторы делают этот вывод не на основании логических заключений, проистекающих из написанной ими же самими формулы, а исходя из своих мировоззренческих убеждений, заключающихся в том, что «...наличие в потоке твердого вещества значительно уменьшает пульсации скорости, течение становится относительно упорядоченным. Тогда как при прочих равных условиях осветленный поток, располагая большой размывающей способностью русла, имеет более турбулентный режим движения».

Иными словами, по утверждению авторов, количество переносимых потоком наносов, влияя на вязкость жидкости и кинематические характеристики потока, определяет тем самым транспортирующую способность потока и соотношение скорости потока и его глубины при постоянном расходе воды.

При этом авторы, безусловно, опираются на выводы Г.И. Баренблатта, приведенные в монографии К.В. Гришанина «Динамика русловых потоков» [2]: «Как показал Г.И. Баренблатт, работа взвешивания отнимает энергию от турбулентных пульсаций, т. е. снижает интенсивность турбулентного перемешивания. Следствием этого является неравномерность распределения осредненных скоростей на вертикали. Поток как бы ламинизируется». Однако при этом авторы не принимают во внимание следующие слова того же автора: «Формула (18.30) дает количественную оценку снижения уровня турбулентности во взвешенном потоке. Это снижение принимает наибольшее значение при взвешивании крупных частиц, а также при больших насыщениях потоков твердой примесью (какие практически

встречаются при гидротранспорте). Для потоков, где содержание взвешенных частиц мало и частицы имеют малую крупность, а таково подавляющее большинство равнинных речных потоков, присутствие твердых частиц не влияет заметным образом на турбулентные пульсации» [1, с. 241].

Иными словами, в данной статье речь идет о явлениях, имеющих отношение к гидравлическим режимам и механизму движения наносов в водном потоке при гидротранспорте и при движении потоков с гиперконцентрациями взвешенных наносов (сели, например), но никак не к речным потокам.

Именно поэтому для своих дальнейших логических выводов авторам пришлось использовать для итоговой формулы (8) — формулы расчета транспортирующей способности потока — формулу (6) из монографии Б.Ф. Ламаева [3].

Таким образом, полученная авторами аналитическая формула транспортирующей способности потока (формула (8)), основанная «на балансе сил, действующих в системе водный поток — донные отложения — наносы, формуле сопротивления грунта сдвигу и формуле граничной скорости осаждения частиц в потоке воды [5]», не соответствует гидравлическим законам движения жидкости и объективному механизму взаимодействия потока и подвижных наносов и не относится к речным потокам. Кроме высказанных выше замечаний по поводу принципиальных положений, лежащих в основе методологии авторов, вызывает некоторое недоумение выбор авторами расчетных формул для выполнения тестовых расчетов. Использованные авторами для тестовых сравнений формулы (Е.А. Замарина, В.Н. Гончарова, Р. Бэгнольда) были получены их авторами в 60-е годы прошлого столетия. К настоящему времени в мировой науке предложено много новых формул, основанных на новых научных результатах в данной области исследования.

Кроме того, авторы статьи используют в работе расчетную формулу Бэгнольда в трактовке [4], которая отличается от оригинальной зависимости, полученной в работе [5]. Трудно судить, насколько корректными являются преобразования исходной зависимости Бэгнольда, приведенные в отчете [4]. Однако авторам статьи в данном случае следовало бы иначе именовать используемую расчетную зависимость, так как она отличается от оригинальной. Кроме того, область возможного использования авторской расчетной зависимости Бэгнольда ограничивается диапазоном песчаной фракции грунта (от 0,1 до 1,0 мм). Но авторами статьи при тестировании расчетных формул по данным для американских рек не приводятся сведения о крупности донных отложений в избранных для тестирования реках, что ставит под сомнение корректность применения всех использованных при тестировании формул.

Особый интерес вызывает использование авторами новой методики проверки достоверности расчетов по формулам, в соответствии с которой доказательством достоверности расчета служит не степень соответствия расчетных значений фактически наблюдаемым, а преобладание отклонения фактически измеренных значений расходов донных наносов в одну сторону (фактически измеренные значения расхода донных наносов должны быть преимущественно меньше расчетных). Можно, конечно же, начать длинную дискуссию с авторами по поводу этой новой методики проверки достоверности расчетных формул, поскольку у авторов она

основана на новых, ими же введенных понятиях «транспортирующая способность потока» и ««транспортирующий потенциал потока», но эта дискуссия должна быть предметом другого отзыва, и она не столь принципиальна при решении вопроса о возможности публикации данной статьи в Ученых записках РГГМУ.

В итоге с нашей точки зрения указанные выше принципиальные ошибки, выражающиеся в игнорировании гидравлических законов и приводящие к ошибочным и парадоксальным выводам, свидетельствуют о том, что опубликовать представленную авторами статью можно только в качестве объекта для научной дискуссии.

### *Список литературы*

1. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
2. *Гришанина К.В.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
3. *Ламаев Б.Ф.* Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение, 1988. 256 с.
4. *Paul J. Visser.* Application of sediment transport Formulae to sand-dike breach Erosion // Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering. 1995. Report № 94-3. Faculty of Civil Engineering. Delft University of Technology.
5. *Bagnold R.A.* An Approach to the Sediment Transport Problems from General Physics // U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 422-I, 1966. P. 37.

**Сведения об авторах**

- Агаева Айгюн Агабала*, докторант Национального гидрометеорологического департамента министерства экологии и природных ресурсов, преподаватель кафедры авиационной метеорологии Национальной академии авиации, [aygun.agayeva@bk.ru](mailto:aygun.agayeva@bk.ru)
- Антонов Степан Владимирович*, ведущий инженер, Агентство атмосферных технологий, [attech@mail.ru](mailto:attech@mail.ru)
- Базарский Олег Владимирович*, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», [z\\_vaiu@mail.ru](mailto:z_vaiu@mail.ru)
- Бакланов Игорь Олегович*, д-р пед. наук, доцент, зав. кафедрой физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», [iobaklanjv@yandex.ru](mailto:iobaklanjv@yandex.ru)
- Бочарников Максим Викторович*, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, [maxim-msu-bg@mail.ru](mailto:maxim-msu-bg@mail.ru)
- Брейдер Наталья Андреевна*, канд. экон. наук, начальник учебно-методического управления, Российский государственный гидрометеорологический университет, [rshu@rshu.ru](mailto:rshu@rshu.ru)
- Булгаков Кирилл Юрьевич*, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
- Бычков Алексей Александрович*, главный специалист, Агентство атмосферных технологий, [bychkovaleks@gmail.com](mailto:bychkovaleks@gmail.com)
- Вайновский Павел Антонович*, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, ООО «Прогноз», [pv974@yandex.ru](mailto:pv974@yandex.ru)
- Войнов Геннадий Николаевич*, д-р геогр. наук, зав. лабораторией, Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение, [voinovgn@mail.ru](mailto:voinovgn@mail.ru)
- Воробьева Лилия Николаевна*, зав. отделом прикладных и системных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных, [vorobeva@meteo.ru](mailto:vorobeva@meteo.ru)
- Восканян Карина Левановна*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, [kvosia@mail.ru](mailto:kvosia@mail.ru)
- Гусейнов Назим Шакар*, д-р техн. наук, профессор, начальник Авиационного метеорологического центра Управления воздушного движения Азербайджана; зав. кафедрой авиационной метеорологии Национальной академии авиации, [dr.Nazim@azans.az](mailto:dr.Nazim@azans.az)
- Диденко Ксения Андреевна*, аспирантка физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, младший научный сотрудник,

- Российский государственный гидрометеорологический университет,  
didenko.xeniya@yandex.ru
- Ермакова Татьяна Сергеевна*, канд. физ.-мат. наук, кафедра метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет
- Католиков Виктор Михайлович*, канд. техн. наук, зав. отделом русловых процессов, Государственный гидрологический институт, channel-shi@mail.ru
- Клюев Павел Валерьевич*, студент, Тверской государственный университет, pasha.kliuev2015@yandex.ru
- Кондратьев Сергей Алексеевич*, д-р физ.-мат. наук, зам. директора Института озераведения Российской академии наук, kondratyev@limno.org.ru
- Корнеев Виктор Петрович*, канд. техн. наук, Агентство атмосферных технологий, attech@mail.ru
- Коришунов Александр Алексеевич*, канд. техн. наук, пенсионер.
- Кочетова Жанна Юрьевна*, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», zk\_vva@mail.ru
- Кровнин Андрей Сергеевич*, ведущий специалист, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), akrovnin@vniro.ru
- Лазар Михай Гаврилович*, д-р филос. наук, профессор, профессор кафедры социально-гуманитарных наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, mihai\_lazar@mail.ru
- Лазарев Илья Сергеевич*, помощник начальника отдела Центра организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», lazarev-ilya@list.ru
- Лебедев Сергей Анатольевич*, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Геофизический центр РАН, Майкопский государственный технологический университет, sergey\_a\_lebedev@mail.ru
- Малинин Валерий Николаевич*, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО — МОК и комплексного управления прибрежными зонами, Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru
- Мельников Сергей Петрович*, д-р биол. наук, начальник отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, melnikov@vniro.ru
- Мурый Георгий Петрович*, старший специалист, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, moury@vniro.ru
- Никитенко Алексей Иванович*, старший специалист, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, nikitenko@vniro.ru

- Погорельцев Александр Иванович*, д-р физ.-мат. наук, профессор, руководитель научной лаборатории Моделирование средней и верхней атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, [arogor@rshu.ru](mailto:arogor@rshu.ru)
- Радченкова Татьяна Вадимовна*, младший научный сотрудник, Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, [tarad@yandex.ru](mailto:tarad@yandex.ru)
- Рыбанова Анастасия Юрьевна*, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных, [aribanova@meteo.ru](mailto:aribanova@meteo.ru)
- Сергеев Борис Николаевич*, канд. физ.-мат. наук, главный специалист, Агентство атмосферных технологий, [bsergeev@ Rambler.ru](mailto:bsergeev@ Rambler.ru)
- Урютова Юлия Анатольевна*, юрисконсульт, отдел правового обеспечения финансово-хозяйственной и образовательной деятельности, Российский государственный гидрометеорологический университет, [rshu@rshu.ru](mailto:rshu@rshu.ru)
- Фокина Карина Владимировна*, магистрант, кафедра экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, [fokinakarina@yandex.com](mailto:fokinakarina@yandex.com)
- Фокичева Анна Алексеевна*, канд. геогр. наук, декан метеорологического факультета, Российский государственный гидрометеорологический университет, [vents-pils@yandex.ru](mailto:vents-pils@yandex.ru)
- Цициашвили Гурами Шалвович*, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, [guram@iam.dvo.ru](mailto:guram@iam.dvo.ru)
- Частухин Андрей Викторович*, главный специалист, Агентство атмосферных технологий, [a.chastuhin@mail.ru](mailto:a.chastuhin@mail.ru)
- Чурюлина Алина Григорьевна*, аспирант, кафедра биогеографии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, [agchurylina@gmail.com](mailto:agchurylina@gmail.com)
- Шатилина Татьяна Александровна*, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Тихоокеанский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, [tatyana.shatilina@tinro-center.ru](mailto:tatyana.shatilina@tinro-center.ru)
- Шмакова Мария Валентиновна*, канд. техн. наук, научный сотрудник Института озераведения Российской академии наук, [m-shmakova@yandex.ru](mailto:m-shmakova@yandex.ru)
- Щукин Георгий Георгиевич*, д-р физ.-мат. наук, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, [ggshchukin@mail.ru](mailto:ggshchukin@mail.ru)



НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ  
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
№ 56

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Начальник РИО А.В. Ляхтейнен*  
*Технический редактор М.В. Иванова*

---

Подписано в печать 30.09.2019. Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times New Roman.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0. Тираж 500 экз. Заказ № 820.  
РГТМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

---

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.  
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу  
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет

---