

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 55

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 № 55. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019. 180 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 озераведения 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. Джейянг (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*
Шилин 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.; **Рябченко 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 эконом. 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

№ 55

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 55. St. Petersburg: RSHU Publishers, 2019. 180 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

<i>Ершова А.А., Малинин В.Н., Михеев В.Л., Мушкет И.И., Палкин И.И.</i> Об основных итогах конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации»	9
---	---

Метеорология

<i>Восканян К.Л., Крюкова С.В., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.</i> Оценка метеорологической надежности экологических станций	13
<i>Коваль А.В.</i> Расчет остаточной меридиональной циркуляции по данным модели средней и верхней атмосферы	25
<i>Коржиков А.Я., Александров В.Я.</i> Аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодном полугодии и перспектива их изменений в ближайшее пятилетие	33
<i>Чурюлин Е.В., Жданова Е.Ю.</i> Пространственная и временная изменчивость характеристик снежного покрова на территории Московского региона в последние десятилетия (2000—2018 гг.)	43
<i>Шумакова Е.М.</i> Геодинамика как одна из возможных причин повышения температуры воздуха в зимний период в бассейне Волги	59

Гидрология

<i>Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р.</i> Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек	74
<i>Лобанов В.А., Горошкова Н.И.</i> Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения	86
<i>Пилипенко А.В.</i> Эмпирические зависимости между параметрами теплообмена поверхности Ладожского озера и приводного слоя воздуха для периода открытой воды	99

Океанология

<i>Нестеров Е.С.</i> Оперативные прогностические технологии для гидрометеорологического обеспечения деятельности на неарктических морях России	108
<i>Фролов А.В.</i> Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря	120

Экология

<i>Курбанов Б.Т.</i> Некоторые проблемы оценки качества поверхностных вод на территории Узбекистана	129
--	-----

Геоинформатика

<i>Попов Н.Н., Абрамов В.М., Абрамов В.А., Ткаченко Г.Н., Трунин С.В.</i> Разработка цифровой платформы для дистанционного обучения по дисциплинам университета	137
---	-----

Социально-гуманитарные науки

<i>Фёдорова Н.Ю.</i> Подготовка аспирантов к научному докладу на английском языке: лингвистический и стратегический аспекты	144
<i>Ярмухамедова Ф.М.</i> Об источниках метафоризации в английской метеорологической лексике	150

Обзоры

<i>Боков В.Н.</i> Возможности метеорологии в управлении сейсмическими рисками	160
---	-----

Хроника

Памяти Веры Георгиевны Гутниченко (1952—2019).....	175
Сведения об авторах	177

CONTENTS

<i>Ershova A.A., Malinin V.N., Mikheev V.L., Mushket I.I., Palkin I.I.</i> Main results of the conference “Modern Problems of Hydrometeorology and Sustainable Development of the Russian Federation”	9
---	---

Meteorology

<i>Voskanyan K.L., Kryukova S.V., Kuznetsov A.D., Serouhova O.S., Simakina T.E.</i> To the question of the estimation of ecological stations metrological reliability . . .	13
<i>Koval A.V.</i> Calculation of the residual mean meridional circulation according to the middle and upper atmosphere model	25
<i>Korzhiikov A.Ya., Alexandrov V.Ya.</i> Anomalies of air temperature in the south-western part of the Kara Sea in the cold half of the year and the prospects for them change in the next five years	33
<i>Churyulin E.V., Zhdanova E.Yu.</i> Spatial and temporal variability of snow cover characteristics in Moscow region in recent decades (2000 — 2018)	43
<i>Shumakova E.M.</i> Geodynamics as one of the reasons for the increas in winter air temperature in the Volga river basin	59

Hydrology

<i>Zelentsov V.A., Potriasaev S.A., Pimanov I.Yu., Ponomarenko M.R.</i> Automation of monitoring and integrated modeling of hydrological situation in river basins	74
<i>Lobanov V.A., Goroshkova N.I.</i> Characteristics of ice regime of the rivers of the Sakha Republic (Yakutia) and their climate changes	86
<i>Pilipenko A.V.</i> Empirical relations between heat exchange parameters of lake Ladoga surface with air boundary layer for the open water period	99

Oceanology

<i>Nesterov E.S.</i> Operational forecasting technologies for hydrometeorological support of activities in the non-Arctic seas of Russia.	108
<i>Frolov A.V.</i> Features of the mechanism of the long-term fluctuations in the Caspian Sea level	120

Ecology

<i>Kurbanov B.T.</i> Some problems of quality assessment of surface waters in the territory of Republic of Uzbekistan	129
---	-----

Geoinformatics

<i>Popov N.N., Abramov V.M., Abramov V.A., Tkachenko G.N., Trunin S.V.</i> Developing a digital platform for distance learning university disciplines	137
---	-----

Social science and humanities

<i>Fedorova N.Y.</i> Development of postgraduate students' ability to make scientific presentations in the english language	144
<i>Yarmukhamedova F.M.</i> Sources of metaphorization in english meteorological vocabulary.	150

Reviews

<i>Bokov V.N.</i> Meteorology capabilities in seismic risks management	160
Chronicle	175
List of authors	177

**ОБ ОСНОВНЫХ ИТОГАХ КОНФЕРЕНЦИИ
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»**

А.А. Ершова, В.Н. Малинин, В.Л. Михеев, И.И. Мушкет, И.И. Палкин

Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru

Представлены основные итоги Всероссийской конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации», которая была проведена в РГГМУ 14—15 марта 2019 г. Приводятся сведения об участниках конференции, научных направлениях конференции, числе представленных на десяти секциях докладов и другая информация.

Ключевые слова: Российский государственный гидрометеорологический университет, научно-практическая конференция, сведения об участниках.

**MAIN RESULTS OF THE CONFERENCE
“MODERN PROBLEMS OF HYDROMETEOROLOGY AND
SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN FEDERATION”**

A.A. Ershova, V.N. Malinin, V.L. Mikheev, I.I. Mushket, I.I. Palkin

The article presents the overview of the All-Russian Conference “Modern Problems of Hydrometeorology and Sustainable Development of the Russian Federation” held at the RSHU on March 14—15, 2019. It presents general information about the participants of the conference, scientific topics of thematic sessions and round-tables, information on the theses presented at 10 sections of the conference.

Keywords: Russian State Hydrometeorological University, scientific-practical conference, participants.

Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ) при поддержке Законодательного собрания Санкт-Петербурга (ЗАКС) провел 14—15 марта 2019 г. Всероссийскую научно-практическую конференцию «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации».

На заседаниях конференции были представлены доклады ученых, представляющих ведущие научные центры России и ближнего зарубежья. В общей сложности во всероссийской конференции приняли участие представители более тридцати регионов нашей страны — от Калининградской области до Дальнего Востока.

В ходе работы конференции были проведены пленарное заседание, два круглых стола, работали десять секций и школа молодых ученых. В работе конференции приняли участие около 500 человек, включая участников и гостей конференции, из которых 170 кандидатов наук, 73 доктора наук, 41 профессор, три академика РАН и четыре члена-корреспондента РАН. Среди участников конференции было довольно много молодых ученых, включая аспирантов, магистров и бакалавров.

Первый день конференции прошел в торжественной обстановке в здании Законодательного Собрания Санкт-Петербурга, в Мариинском дворце. С приветственными словами выступили А.Н. Чилингаров, специальный представитель

Президента Российской Федерации по международному сотрудничеству в Арктике и Антарктике; В.С. Макаров, председатель ЗакСа Санкт-Петербурга; Н.И. Пустотин, заместитель председателя ЗакСа Ленобласти; А.С. Максимов, председатель Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга; Г.Г. Широков, председатель Комитета Санкт-Петербурга по делам Арктики; И.А. Григорьев, председатель Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга; В.Л. Михеев, ректор РГГМУ; В.В. Удриш, начальник Гидрометеорологической службы ВС РФ; А.И. Бедрицкий, президент Российского гидрометеорологического общества.

На Пленарном заседании с научными докладами выступили:

- А.И. Бедрицкий: О формировании комплексного информационного обеспечения климатической деятельности;
- член-корреспондент РАН Н.Н. Филатов: Современные проблемы лимнологии и пути их решения;
- Р.А. Ромашов: Природа как объект культурно-правовой коммуникации и коррелятор правовой культуры;
- А.Г. Зацепин: Гидрофизический полигон ИО РАН на Черном море и его значение для решения фундаментальных и прикладных задач океанологии;
- В.И. Сычев: К десятилетию ООН, посвященному науке об океане в интересах устойчивого развития, и подготовка кадров в области морских наук;
- М.Б. Шилин: Экологическая безопасность портостроительства;
- С.П. Смышляев: Региональная система контроля и прогноза качества воздуха на основе электрохимических измерений и численного моделирования.

В рамках конференции после пленарного заседания были проведены два круглых стола: *Подготовка кадров в сфере гидрометеорологии: вызовы и перспективы*, на котором обсуждались актуальные проблемы в области гидрометеорологии



Рис. 1. Торжественное открытие конференции.



Рис. 2. Пленарное заседание конференции.

в целях устойчивого развития страны, и *Подготовка к Десятилетию Организации Объединенных Наций, посвященному науке об океане в интересах устойчивого развития, в области обучения и повышения уровня знаний о Мировом океане.*

Отметим также, что в здании Мариинского дворца была размещена выставка работ студентов и преподавателей кафедры Декоративно-прикладного искусства и кафедры Реставрации живописи Института Полярная академия РГГМУ, посвященная проблемам экологии, гидрометеорологии и развития Арктики. Эта выставка вызывала большой интерес среди участников конференции, которые дали ей высокую оценку.

Труды конференции были опубликованы в двух томах сборника тезисов «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». Общее число опубликованных тезисов составило 372.

Во второй день работа конференции проходила в учебных корпусах университета и была организована по десяти секциям:

- 1) актуальные проблемы погоды и климата (модераторы А.Д. Кузнецов, О.Г. Анискина);
- 2) гидрология от Арктики до экватора: теория и практика (модератор Д.И. Исаев);
- 3) современные проблемы океанологии (модератор В.Н. Малинин);
- 4) экосистемы в условиях глобальных изменений (модератор В.В. Дроздов);
- 5) информационные технологии мониторинга окружающей среды (модераторы В.Г. Бурлов, В.В. Грызунов);

6) техносферная безопасность и развитие территорий (модератор А.В. Андреев);

7) метеорология специального назначения: теория и практика — проблемы и пути решения (модератор И.Е. Кузнецов);

8) экономико-управленческие проблемы развития общества: перспективы и инновации (модератор И.О. Выдрина);

9) современные проблемы коммуникации в профессиональной сфере (модератор Н.Ю. Федорова);

10) проблемы правового регулирования в экосфере: современные вызовы, средства и технологии оптимизации (модератор Е.Н. Никифорова).

Наиболее популярной, как и следовало ожидать, оказалась первая, метеорологическая секция. На ней успели заслушать 29 устных докладов и обсудить 31 стендовый доклад (таблица).

На гидрологической секции были представлены 24 устных доклада и столько же стендовых. На океанологической секции также было заслушано 24 устных доклада. Больше всего устных докладов было заслушано на пятой секции (за счет уменьшения времени, предоставляемого докладчику). Наибольшее число слушателей докладов, как и следовало ожидать, было на первой секции (примерно 100 человек). Примерно вдвое меньше слушателей присутствовало на второй, третьей и четвертой секциях. Еще меньше слушателей было на заседаниях других секций.

Таблица

Распределение докладов по секциям конференции

Доклад	Секция									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Устный	29	24	24	25	33	24	24	22	19	13
Стендовый	31	24	7	17	—	—	8	—	—	—
Всего	60	48	31	42	33	24	32	22	19	13

Дополнительно к работе секций во второй день конференции проходила школа молодых ученых «Экогидромет — новые горизонты», приуроченная к 20-летию кафедры Прикладной и системной экологии РГГМУ. На ней было заслушано 15 докладов преимущественно молодых ученых. При этом часть докладов была посвящена исследованиям на о. Валаам, где находится Учебно-научная станция РГГМУ.

Очень приятно, что наряду с маститыми учеными авторами (или соавторами) многих докладов стали молодые ученые (69 человек), аспиранты (16 человек) и студенты (62 человека). Это означает, что растет научная смена маститым ученым.

В целом конференция прошла с большим успехом. Многие ее участники высказывали пожелание, чтобы она стала традиционной.

В настоящем номере журнала Ученые записки РГГМУ приводятся в основном статьи участников конференции. Однако, поскольку не все представили статьи в надлежащие сроки, предполагается, что в следующем номере журнала также будет опубликован ряд статей участников конференции.

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

*К.Л. Восканян, С.В. Крюкова, А.Д. Кузнецов,
О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина*

Российский государственный гидрометеорологический университет,
tatiana.simakina@gmail.com

Получены результаты исследования метрологической надежности сетевых автоматических экологических станций Санкт-Петербурга, приведены оценки основных показателей метрологической надежности датчиков загрязняющих веществ: окиси углерода, оксида и диоксида азота. Вычислена вероятность готовности каждой станции к работе в произвольный момент времени, проведено районирование территории Санкт-Петербурга по коэффициенту готовности экологических станций. Выполнены численные эксперименты по оценке влияния пропусков во временном ряду концентрации оксида азота на его статистические параметры.

Ключевые слова: метрологическая надежность, интенсивность отказов, коэффициент готовности, экологические станции, датчики загрязняющих веществ.

TO THE QUESTION OF THE ESTIMATION OF ECOLOGICAL STATIONS METROLOGICAL RELIABILITY

*K.L. Voskanyan, S.V. Kryukova, A.D. Kuznetsov,
O.S. Serouhova, T.E. Simakina*

Russian State Hydrometeorological University

The results of a study of the metrological reliability of network automatic ecological stations in St. Petersburg were obtained; estimates were given of the main indicators of the pollutants sensors metrological reliability: carbon monoxide, oxide and nitrogen dioxide. The probability of readiness of each station to work at any time is calculated, zoning of the territory of St. Petersburg by the coefficient of readiness of environmental stations is carried out. Numerical experiments were carried out to assess the effect of gaps in the time series of nitric oxide concentration on its statistical parameters.

Keywords: metrological reliability, failure rate, availability factor, environmental stations, pollutant sensors.

Введение

Оценка экологической ситуации в промышленно развитом регионе, выявление аномалий и определение причин их возникновения, прогноз состояния воздушного бассейна опираются на данные наблюдений станций, входящих в сеть экологического мониторинга (рис. 1). От решений, которые принимаются на основе предоставляемых наблюдений, различных генерализаций экологической информации и аналитических обобщений по экологическому состоянию города

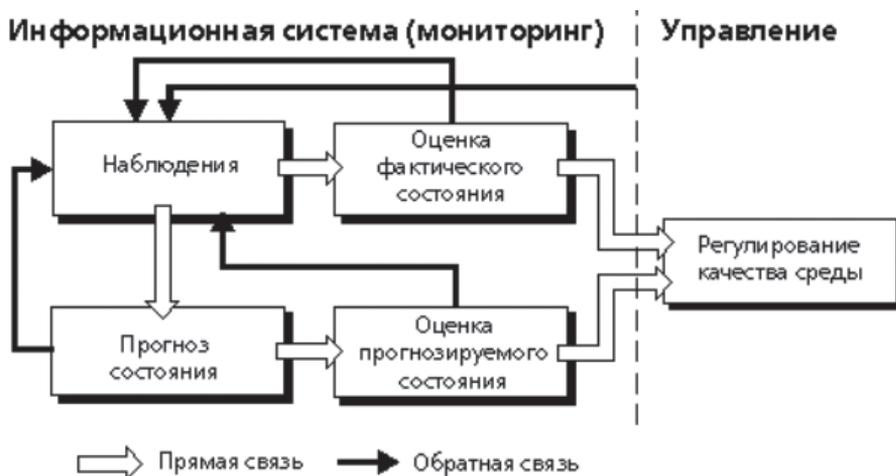


Рис. 1. Блок-схема системы экологического мониторинга среды [7].

в целом, ежедневно зависят здоровье и жизнь людей. Этот факт демонстрирует высокую роль надежности экологических станций в устойчивом развитии экономики и общества [1—3].

Датчики концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) эксплуатируются в условиях открытой атмосферы, зачастую в зонах повышенного загрязнения воздуха, поэтому испытывают негативное влияние на внутреннюю структуру, а иногда и на химический состав, что приводит к изменению их рабочих свойств, развитию необратимых процессов износа, старения, накоплению усталостных явлений и отказам [4]. Отказы вызывают пропуски во временных рядах значений концентрации ЗВ. Игнорирование пропусков искажает статистические параметры ряда — среднее, дисперсию, вариацию и др., повышает ошибку интерполяции измеренных данных сети станций и, следовательно, понижает точность оценки уровня загрязнения воздушного бассейна города в целом [5, 6, 8].

Целью настоящей работы является исследование метрологической надежности экологических автоматических датчиков, которыми оборудованы современные сети экологического мониторинга. На основе знания о метрологической надежности можно планировать мероприятия, направленные на повышение эффективности использования предоставляемой экологической информации.

Исходные данные

Исходным материалом для исследования послужили показания трех автоматических газоанализаторов — окиси углерода, оксида и диоксида азота. Датчики ЗВ размещены на двадцати станциях, входящих в состав сети экологического мониторинга Санкт-Петербурга. Местоположение станций представлено на рис. 2. Длительность временных рядов концентрации окиси углерода, оксида и диоксида азота составляла полгода (182 дня), что соответствовало 13 104 значениям, измененным с интервалом 20 минут.

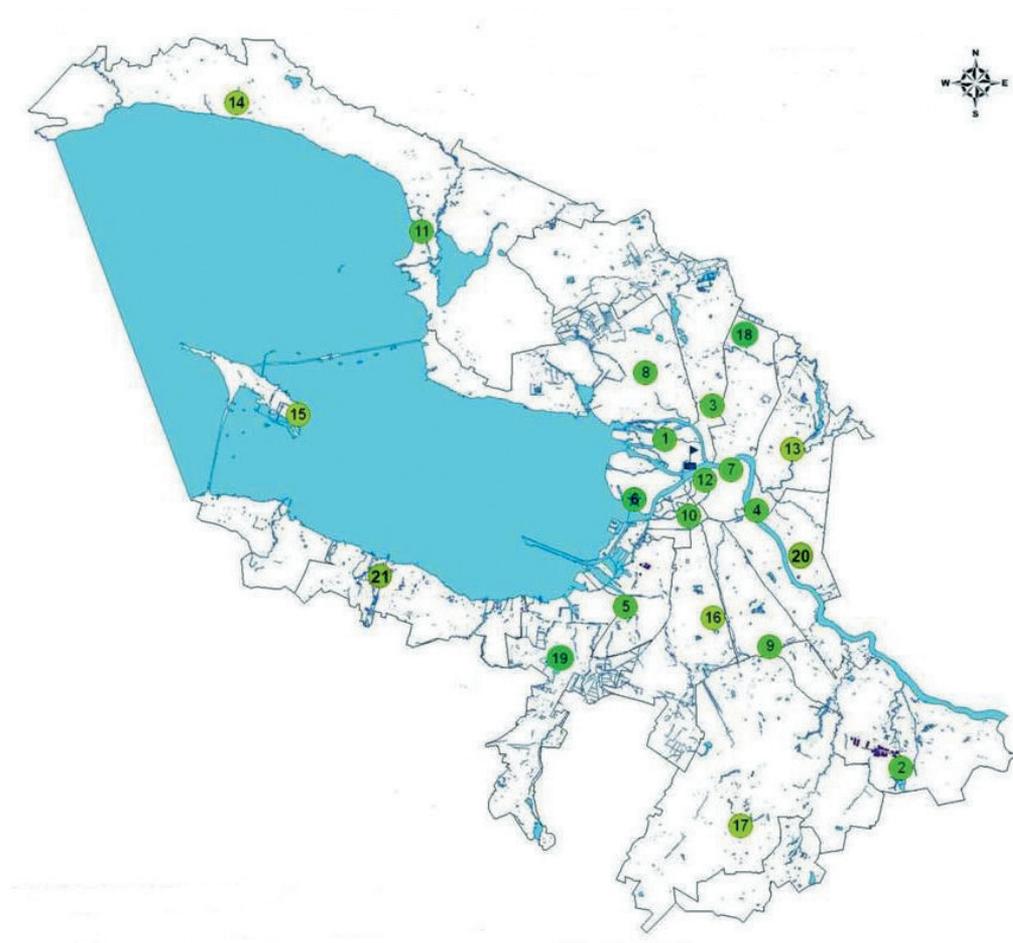


Рис. 2. Сеть экологических станций Санкт-Петербурга.

Метрологическая надежность средств измерений

Отказ экологических и метеорологических датчиков, возникающий в процессе их эксплуатации, является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности средства измерения. В настоящей работе исследовались внезапные отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением показаний. Такие отказы можно обнаружить в ходе эксплуатации прибора без проведения поверки, т.е. по характеру проявления они являются явными. Их особенность заключается в постоянстве во времени интенсивности отказов, что дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. Для характеристики безотказности приборов были вычислены следующие параметры:

интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{L}{N \cdot \Delta t}, \quad (1)$$

где L — число отказов за промежуток времени Δt , N — число однотипных датчиков;

вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\} = e^{-\lambda t}; \quad (2)$$

вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - P(t); \quad (3)$$

средняя наработка на отказ

$$T_{CP} = - \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda}; \quad (4)$$

коэффициент готовности

$$K_G = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + T_B}, \quad (5)$$

где T_B — время восстановления датчика, которое вычислялось как отношение времени простоя датчика к числу его отказов.

Надежность экологических датчиков

Для исследования пропусков во временных рядах концентрации ЗВ, которые интерпретировались как отказы аппаратуры, создан макрос, выполняющий следующие функции:

- поиск разрывов в рядах,
- фиксация времени появления отказов,
- вычисление числа отказов каждого датчика на каждой станции,
- вычисление периодов простоя.

Примеры результатов работы макроса представлены на рис. 3. Диаграммы на данном рисунке отражают надежность экологических датчиков на двух станциях. Период безотказной работы на станции № 2 в Колпино составил 79 % общего времени, на станции № 19 на пр. Жукова — лишь 55 %. Чаще всего на станции № 2 отказывал датчик диоксида азота (9 % общего времени работы), реже — датчик оксида азота (5 %). На станции № 19 датчики NO, NO₂ и CO не работали 18, 16 и 11 % времени соответственно.

Результаты исследования отказов по всем станциям представлены диаграммой на рис. 4. В целом по городу период безотказной работы датчиков ЗВ составил 71,3 % общего времени работы. Меньшее время простоя оказалось у датчика CO (7,7 %), дольше всего не работал датчик NO (11,4 %), промежуточное положение у датчика NO₂ (9,5 %).



Рис. 3. Диаграммы, отражающие периоды безотказной работы и отказов датчиков ЗВ.

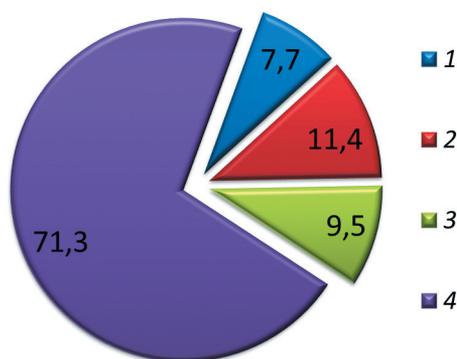


Рис. 4. Периоды безотказной работы и отказов датчиков ЗВ по всем станциям.

1 — отказ датчика CO, 2 — отказ датчика NO, 3 — отказ датчика NO₂, 4 — работа без отказов.

На основе результатов работы макроса вычислены показатели метрологической надежности (табл. 1): средняя наработка на отказ, время восстановления, интенсивность отказов и коэффициент готовности.

Таблица 1

Результаты оценки надежности датчиков ЗВ по 20 станциям

Показатель надежности	Датчик		
	CO	NO	NO ₂
Время работы датчиков, ч	241909	232087	237074
Время простоя датчиков, ч	5042,8	7498,3	6251,5
Наработка на отказ, ч	65,10	42,54	109,15
Интенсивность отказов, ч ⁻¹	0,015	0,024	0,009
Время восстановления, ч	5,4	5,5	11,5
Интенсивность восстановления, ч ⁻¹	0,184	0,182	0,087
Коэффициент готовности	0,923	0,886	0,905

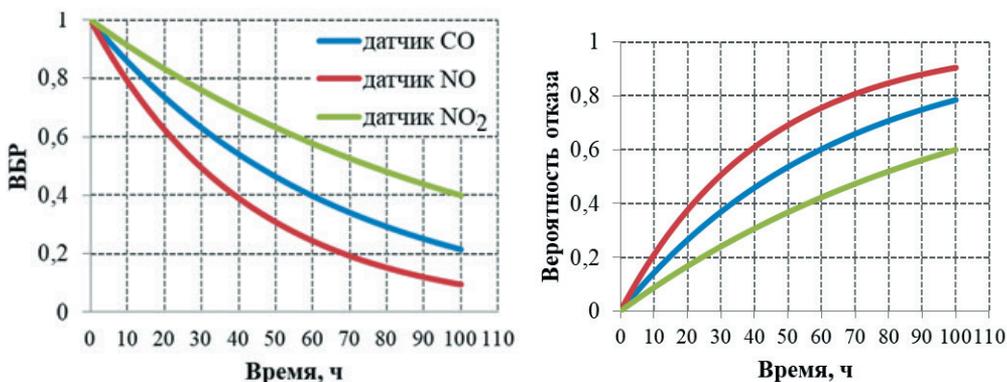


Рис. 5. Вероятность безотказной работы (слева) и вероятность отказа (справа) трех датчиков ЗВ.

Наиболее надежным за рассматриваемый срок оказался датчик NO_2 — его интенсивность отказов составила $0,009 \text{ ч}^{-1}$. Почти в два раза выше была интенсивность отказов датчика CO ($0,015 \text{ ч}^{-1}$) и в три раза выше — датчика NO ($0,024 \text{ ч}^{-1}$). Таким образом, датчик окиси углерода практически каждые 65 часов работы на одной из станций дает сбой, датчик оксида азота — каждые 42,5 часа, датчик диоксида азота — каждые 109 часов.

Представленные в таблице значения позволяют прогнозировать вероятность безотказной работы (ВБР) датчиков. В предположении, что распределение времени между отказами подчиняется экспоненциальному закону, графики ВБР каждого датчика и вероятности его отказа будут иметь вид, показанный на рис. 5. Из рисунка видно, что быстрее всего снижается надежность у датчика NO .

Из данных, приведенных на рисунке, можно сделать вывод, что при отсутствии ремонта и замены из шестидесяти датчиков трех видов через 100 часов работы отказали бы двенадцать датчиков NO_2 , шестнадцать датчиков CO и восемнадцать датчиков NO .

Если сравнивать датчики по интенсивности восстановления, то датчик NO_2 оказался на последнем месте ($0,087 \text{ ч}^{-1}$). У двух других датчиков этот параметр в два раза выше (более $0,18 \text{ ч}^{-1}$).

Коэффициент готовности включает в себя информацию об отказах, а также о продолжительности ремонта или замены, поэтому является комплексной, наиболее эффективной характеристикой надежности. Согласно полученным значениям, вероятность того, что датчики CO , NO_2 и NO окажутся в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, составляет 92, около 91 и 89 % соответственно.

Результаты работы экологических станций

В ходе работы исследовались не только надежность технических средств разных типов, но и надежность станций в целом, а также влияние расположения станции на надежность. Показатели безотказности станций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки надежности станций

Номер станции	Адрес станции	Число отказов	Время простоя, ч	Средняя наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч	Коэффициент готовности
1	ул. Проф. Попова, д. 48	165	2761	768,17	57,43	0,93
2	г. Колпино, ул. Красная, д. 1А	37	814	3125,88	66,12	0,98
3	ул. Карбышева, д. 7	38	687	3504,62	62,58	0,98
4	Малоохтинский пр., д. 98	99	8086	1027,13	274,03	0,79
5	пр. Маршала Жукова, д. 30, корп. 3	210	5557	781,90	104,01	0,88
6	В.О., ул. Весельная, д. 6	86	3600	1272,98	128,97	0,91
7	ул. Шпалерная, д. 56	309	798	382,13	7,57	0,98
8	ул. Королева, д. 36, корп. 8	249	5466	858,35	151,34	0,85
9	Малая Балканская ул., д. 54	138	6520	1041,82	206,18	0,83
10	Московский пр., д. 19	290	5834	892,37	124,35	0,88
11	г. Сестрорецк, ул. М. Горького, д. 2	54	3823	2334,66	244,47	0,91
12	ул. Пестеля, д. 1	65	1735	2393,98	109,63	0,96
13	шоссе Революции, д. 84	219	3839	2175,58	100,21	0,96
14	г. Зеленогорск, пляж «Золотой», д. 1	190	3614	572,37	56,58	0,91
15	Кронштадт, ул. Ильмянинова, д. 4	139	4057	834,53	94,14	0,90
16	ул. Проф. Попова, д. 48	144	6214	1392,18	236,72	0,85
17	г. Колпино, ул. Красная, д. 1А	33	196	5800,31	11,03	1,00
18	-ул. Севастьянова, д. 11	49	4220	2592,82	294,91	0,90
19	г. Пушкин, Тиньков пер., д. 4	228	5911	487,22	85,30	0,85
20	ул. Ольги Форш, д.6	92	1438	2234,43	61,16	0,97

Число отказов и время простоя каждой станции представлены на рис. 6. Станции заметно различаются по этим показателям. Так, например, на станции № 14 в Зеленогорске было мало отказов (4 % общего числа), однако они приводили к большому времени простоя. Обратная картина наблюдалась на станции № 7 на Шпалерной улице: самые частые отказы соответствовали самому короткому времени простоя. Станция № 8 на ул. Королева отличается многочисленными сбоями и длительными периодами простоя.

На рис. 6 представлен комплексный коэффициент готовности (K_r), учитывающий повторяемость отказов и время восстановления всех приборов на станции (кривая 1). Из рисунка видно, что самой надежной является станция № 17 в Пушкине ($K_r = 0,99$), самой ненадежной — станция № 4 в РГГМУ на Малоохтинском пр. ($K_r = 0,78$). Такое расхождение можно объяснить расположением станции РГГМУ в условиях городской и промышленной застройки, близостью

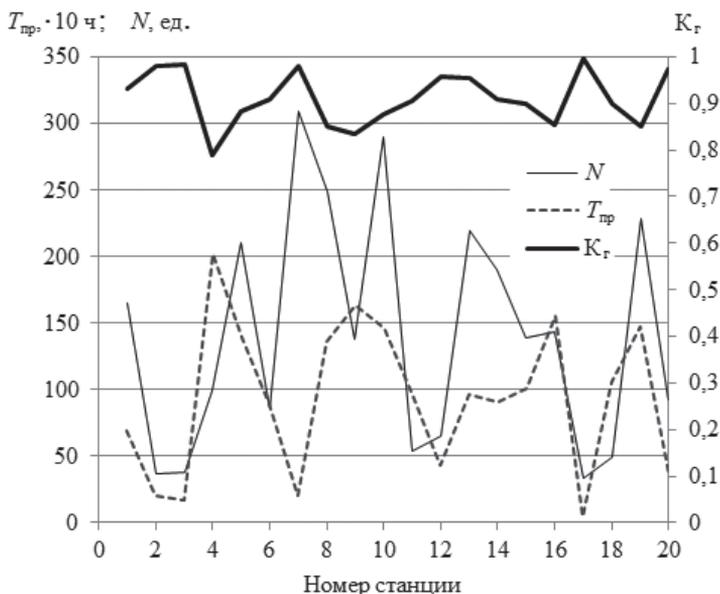


Рис. 6. Число отказов N , время простоя $T_{пр}$ и коэффициент готовности K_g станций.

транспортной магистрали с интенсивным движением, негативно влияющих на измерительные устройства. В отличие от нее станция в Пушкине находится за пределами городской черты.

Для исследования особенностей пространственного распределения коэффициента готовности проведена его интерполяция на территорию Санкт-Петербурга (рис. 7). Область с пониженной надежностью работы станций ожидаемо находится в центре территории. Она содержит три близкие по площади зоны с коэффициентом готовности меньше 0,87: северо-западную, юго-западную и юго-восточную. Внутри последней штриховкой выделены два самых ненадежных очага, в которые входят станции с коэффициентом готовности $K_g = 0,85$. Исключение составляет овальная область на севере, отображаемая на рисунке зеленым цветом. Она образуется показаниями станций № 1, 2, 3, 12 и 13, где $K_g > 0,95$.

С удалением от центра города надежность станций повышается, что особенно заметно на восточной границе города. Такое направление повышения надежности может быть обусловлено тем, что воздушные массы, с которыми связаны неблагоприятные погодные условия, поступают в Санкт-Петербург, прежде всего, с западного и юго-западного направлений.

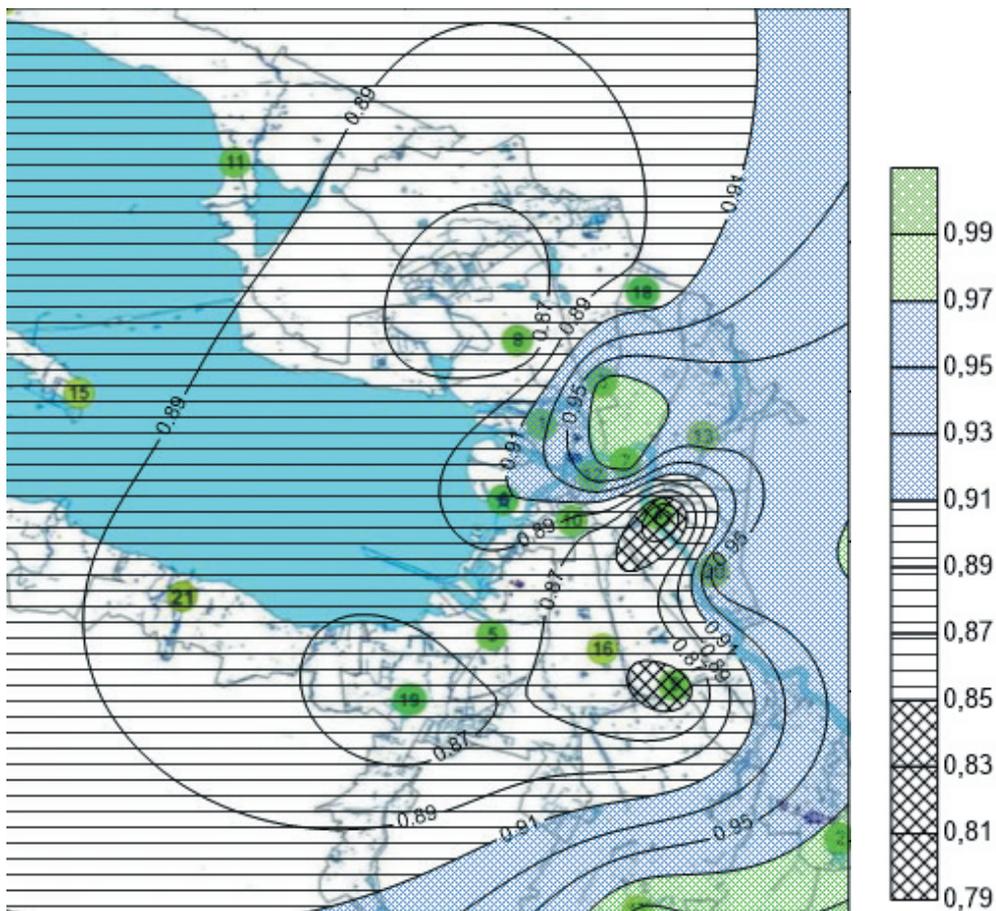


Рис. 7. Распределение коэффициента готовности (K_r) экологических станций Санкт-Петербурга.

Влияние пропусков во временном ряду на статистические параметры этого ряда

Оценка влияния пропусков во временном ряду на статистические параметры этого ряда выполнялась по результатам проведенного численного эксперимента. Был взят временной ряд концентрации оксида азота, измеренной на станции № 17 Санкт-Петербурга с января по июль. Длина ряда составила 13 010 значений, измеренных с дискретностью 20 мин. Были определены статистические параметры исходного ряда — среднее, медиана, мода, СКО и др. (табл. 3). Далее путем удаления из ряда значений имитировались отказы прибора. Было удалено последовательно от 30 до 2000 (от 0,2 до 15 %) сроков с переменным шагом 30—500. На каждом этапе вычислялась статистика ряда. Результаты моделирования отказов представлены в табл. 3.

Статистика временного ряда
концентрации оксида азота в Санкт-Петербурге

Статистика	Исход- ный ряд	Число пропусков							
		30 (0,2%)	60 (0,5%)	90 (0,7%)	180 (1,4%)	300 (2%)	800 (6%)	1500 (12%)	2000 (15%)
Среднее, мкг/м ³	7,104	7,096	7,088	7,073	7,063	7,098	7,077	6,919	6,407
Медиана, мкг/м ³	2,809	2,809	2,809	2,807	2,809	2,817	2,797	2,782	2,782
Мода, мкг/м ³	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427
Стандартное отклонение, мкг/м ³	14,83	14,82	14,81	14,75	14,73	14,78	14,92	14,84	11,66
Дисперсия, (мкг/м ³) ²	220,0	219,6	219,3	217,7	216,9	218,6	222,5	220,3	135,9
Сумма, мкг/м ³	93034	92712	92391	91984	91225	90821	87024	80227	71087

Из таблицы следует, что с увеличением числа пропусков в ряду изменяются все статистические параметры за исключением моды. Средняя концентрация изменяется в разряде десятых уже при наличии 0,2 % пропущенных данных, СКО — при 0,7 % пропусков, медиана — при 6 %.

Влияние пропусков на погрешность определения среднего и СКО отражено на рис. 8. По оси ординат отложена относительная погрешность



Рис. 8. Изменение погрешности определения статистики временного ряда — среднего и СКО — при увеличении числа пропусков во временном ряду концентрации оксида азота, измеренной на станции № 17 Санкт-Петербурга.

определения среднего значения концентрации оксида азота, вычисленная по формуле

$$\delta C_{\text{NO}} = \frac{\bar{C}_{\text{NO}} - C_{\text{NO}}}{\bar{C}_{\text{NO}}} \cdot 100 \%,$$

где \bar{C}_{NO} , C_{NO} — средняя концентрация оксида азота исходного временного ряда без пропусков и ряда с пропусками соответственно.

При числе пропущенных сроков от 1 до 2 % ошибка определения СКО превышает 0,5 %. С увеличением числа пропусков от 7 % и выше возрастает погрешность определения среднего, которая составляет более 2,5 % при 12 % пропущенных сроков наблюдений. Таким образом, отказы датчика оксида азота, приводящие к пропускам во временном ряду концентрации NO, приводят к возникновению ошибок при определении статистических параметров и, следовательно, понижают точность оценок уровня распределения исследуемой величины по изучаемой территории.

Заключение

В результате исследования метрологической надежности автоматических датчиков ЗВ, входящих в состав оборудования экологических станций Санкт-Петербурга, сделаны следующие выводы.

1. За рассматриваемый период работы трех датчиков длительностью 182 дня общее число пропусков в данных датчика окиси углерода составило 929, оксида азота — 1364, диоксида азота — 543.

2. Период времени безотказной работы, т.е. когда ни один датчик не отказал, составил 71,3 % общего времени работы.

3. Наиболее эффективным показателем метрологической надежности является коэффициент готовности, учитывающий информацию как об отказах, так и о ремонте или замене. Коэффициент готовности может быть интерпретирован как прогноз времени работоспособности технических средств. Тогда время работы датчика CO составит 92 % исследуемого периода, датчика NO₂ — около 91 %, NO — 89 %.

4. Коэффициент готовности экологических станций в целом составляет 0,78—0,99. Самыми ненадежными по данному показателю оказались станции, расположенные в западных и центральных районах города. По-видимому, на работу этих станций оказывает влияние большая повторяемость неблагоприятных погодных условий, обусловленная западным и юго-западным переносом. В восточном направлении надежность станций возрастает.

5. Доказано влияние пропусков во временном ряду концентрации оксида азота на статистические параметры этого ряда. При пропуске 12 % измерений погрешность определения среднего превышает 2,5 %.

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., Корицунов А.А., Шаймарданов М.З.* Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на экономику России. Обнинск, 2001. 36 с.
3. *Кобышева Н.В., Васильев М.П.* Уязвимость социальной сферы регионов России к опасным гидрометеорологическим явлениям // Труды ГГО. 2015. Вып. 578. С. 59—74.
4. *Кожевников Б.Л.* Методика формальной оценки климатических нагрузок на метеорологические приборы // Труды ГГО. 1990. Вып. 529. С. 149—162.
5. *Крюкова С.В., Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е.* Оптимизация сети экологического контроля в г. Санкт-Петербурге / В сб.: Гетерогенные системы и процессы в природных и техногенных средах. Атмосферная экология. Материалы международной научно-практической конференции. Часть 3. СПб: Стратегия будущего, 2018. С.37—47.
6. *Крюкова С.В., Симакина Т.Е.* Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 1. С. 144—151.
7. *Кутузов О.И., Татарникова Т.М.* Экологический мониторинг как объект автоматизации управления // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 21. С. 165—171.
8. *Симакина Т.Е., Крюкова С.В.* Пространственный анализ концентраций загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С.184—194.

УДК551.513:[551.510.533+551.510.536]:001.891.57 doi:10.33933/2074-2762-2019-55-25-32

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

А.В. Коваль

Санкт-Петербургский государственный университет, a.v.koval@spbu.ru

Проведено численное моделирование общей циркуляции атмосферы с использованием модели средней и верхней атмосферы (МСВА) для января. Рассмотрены формулы для расчета остаточной меридиональной циркуляции на основе полей ветра и температуры воздуха, полученных из МСВА. Полученные распределения эйлеровой средней и остаточной меридиональной циркуляции согласуются с результатами расчетов, проводившихся ранее как на базе наблюдений, так и в результате модельных экспериментов. Волновой вклад в меридиональную циркуляцию в средней атмосфере может превышать 100 % от соответствующих компонент средней меридиональной скорости и оказывать влияние на меридиональный перенос газовых составляющих атмосферы.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, численное моделирование, остаточная циркуляция.

CALCULATION OF THE RESIDUAL MEAN MERIDIONAL CIRCULATION ACCORDING TO THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE MODEL

A.V. Koval

St. Petersburg State University

The general circulation of the middle and upper atmosphere is simulated using the middle and upper atmosphere model (MUAM) for January. Formulas for calculating the residual mean meridional circulation on the basis of wind and temperature fields obtained from MUAM are observed. The obtained distributions of the eulerian meridional mean and residual circulation are consistent with the calculations carried out earlier both on the basis of observations and model experiments. The wave contribution to the meridional circulation in the middle atmosphere can exceed 100% of the corresponding components of the mean meridional velocity, which can have a significant impact on the meridional transport of the gas components of the atmosphere.

Keywords: atmospheric circulation, numerical simulation, residual circulation.

Введение

Циркуляционный перенос газовых примесей между средней атмосферой и тропосферой оказывает влияние на общее распределение озона и других атмосферных газовых составляющих. Предполагается, что общая циркуляция атмосферы является основным механизмом глобального переноса газовых примесей (см., например, [11]). К настоящему времени хорошо известно, что при использовании подхода в рамках обычной эйлеровой средней меридиональной циркуляции, т. е. при зональном осреднении меридионального и вертикального циркуляционных потоков, при условии стационарности и горизонтальной однородности рассматриваемых полей, в уравнениях динамики происходит компенсация волновых источников импульса и тепла адвективными потоками импульса и тепла. Это

свойство, известное как теорема Чарни — Дразина о невзаимодействии возмущений со средним потоком [9], не позволяет выделить и диагностировать волновое воздействие на средний поток. Компенсация волновых и средних течений при эйлеровском подходе происходит и в уравнении неразрывности для долгоживущих газовых составляющих, и, таким образом, применение эйлеровой средней меридиональной циркуляции неэффективно для вычисления их переноса [8].

С целью преодоления указанного недостатка используется альтернативный подход к анализу зонально осредненной циркуляции, который обеспечивает более эффективную диагностику волнового воздействия на средний поток, а также возможность расчета процессов переноса газовых примесей в меридиональной плоскости. Этот подход представляет собой формулировку преобразованной эйлеровой средней циркуляции (Transformed Eulerian Mean, ТЕМ), впервые введенную в исследовании [6]. Он основан на том, что поскольку некоторый рассматриваемый объем воздуха поднимется до большей высоты равновесного состояния только в том случае, если его потенциальная температура возрастает при неадиабатическом нагреве, то остаточная меридиональная циркуляция, связанная с неадиабатическими процессами, напрямую связана со средним потоком меридиональной массы. Рассчитанная при помощи такого подхода остаточная циркуляция позволяет оценить ту часть среднего потока, вклад которой в адиабатическое изменение температуры воздуха не компенсируется дивергенцией индуцированного волной потока тепла [20].

В данном исследовании при помощи модели циркуляции средней и верхней атмосферы (МСВА) производится моделирование атмосферных параметров для января. На основе полученных полей ветра и температуры воздуха рассчитываются вертикальная и меридиональная компоненты средней остаточной меридиональной циркуляции. Исследование эйлеровой средней и остаточной меридиональной циркуляции позволяет оценить как общий циркуляционный перенос атмосферных газов, так и вклад в этот перенос волновых процессов в средней и верхней атмосфере.

Методы и подходы

Модель общей циркуляции МСВА. Для моделирования общей циркуляции атмосферы в данном исследовании используется нелинейная механистическая численная модель атмосферы МСВА, разрабатываемая в Российском государственном гидрометеорологическом университете [19], которая является модификацией модели COMMA_LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere — Leipzig Institute for Meteorology [12]). В модели решается стандартная система гидродинамических уравнений в сферической системе координат [2]. Горизонтальная сетка модели имеет 36×64 узла по широте и долготе соответственно. Вертикальная сетка имеет 48 узлов и представляет собой log-изобарическую вертикальную координату в диапазоне высот от 0 до 135 км. Радиационный блок МСВА учитывает суточные и сезонные изменения нагрева атмосферы в ультрафиолетовой и видимой

областях спектра (125—700 нм), а также выхолаживание в полосах инфракрасного излучения (8; 9,6; 14 и 15 мкм).

В нижней термосфере учитываются дополнительные динамические источники тепла, обусловленные диссипацией волн, а также ионное торможение, молекулярная и турбулентная вязкость и теплопроводность. В модель включена параметризация тепловых и динамических эффектов неорографических гравитационных волн и горных волн [3]. Стационарные планетарные волны в МСВА генерируются путем задания температуры и геопотенциальной высоты на нижней границе [18]. Модель может также воспроизводить нормальные атмосферные моды с периодом 2—20 суток [4]. Подробную информацию о процессах, учитываемых в МСВА, а также о стадиях инициализации модели, можно найти в [1, 13, 19].

Остаточная меридиональная циркуляция. Остаточная циркуляция в данной работе понимается в контексте преобразованной эйлеровой средней циркуляции [6]. Меридиональную и вертикальную компоненты остаточной средней циркуляции можно получить по формулам [6, 8]

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \rho^{-1} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\overline{v'\theta'}}{\partial\bar{\theta}/\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\cos \varphi \overline{v'\theta'}}{\partial\bar{\theta}/\partial z} \right), \quad (2)$$

где черта сверху обозначает зонально осредненные величины, штрихи — отклонения величин от зональноосредненных значений; v и w — меридиональный и вертикальный ветер; ρ — плотность атмосферы; z — вертикальная координата; θ — потенциальная температура; φ — широта; a — радиус Земли.

С помощью простых преобразований, учитывая, что потенциальная температура описывается формулой $\theta = T \exp\left(\frac{Rz}{C_p H}\right)$, где $R = 287 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ — газовая

постоянная воздуха, $H = 7 \text{ км}$ — высота однородной атмосферы, C_p — теплоемкость при постоянном давлении, а квадрат частоты Брента — Вейселя определяется

формулой $N^2 = \frac{g}{\bar{T}} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \frac{g}{C_p} \right)$, можно получить уравнения для (\bar{v}^*, \bar{w}^*)

в терминах возмущения обычной температуры [16].

Определим отклонения от средних зональных компонент скорости ветра как $v' = v - \bar{v}$; $w' = w - \bar{w}$ и проведем ряд преобразований для получения используемых нами уравнений для расчета меридиональной и вертикальной компонент остаточной средней циркуляции на основе полей ветра и температуры, моделируемых в МСВА:

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \frac{1}{\partial\bar{\theta}/\partial z} \left(-\frac{\overline{v'\theta'}}{H} + \frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial z} - \frac{\overline{v'\theta'}}{\partial\bar{\theta}/\partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \left(-\sin \varphi \overline{v' \theta'} + \cos \varphi \left(\frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial \varphi} - \frac{\overline{v' \theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z \partial \varphi} \right) \right). \quad (4)$$

В отличие от обычной средней эйлеровой циркуляции остаточная вертикальная скорость для осредненных по времени условий пропорциональна скорости неадиабатического нагрева. Она приблизительно представляет собой неадиабатическую циркуляцию в меридиональной плоскости [20], то есть циркуляцию, при которой происходит неадиабатический нагрев поднимающегося объема воздуха и неадиабатическое охлаждение опускающегося и при этом их потенциальная температура приспособливается к локальной среде. Таким образом, осредненная по времени остаточная меридиональная циркуляция аппроксимирует среднее движение воздушных масс и, следовательно, в отличие от обычной средней эйлеровой циркуляции представляет собой аппроксимацию среднего адвективного перемещения газовых составляющих.

Результаты расчетов

Для расчета остаточной меридиональной циркуляции в данном исследовании использовались поля атмосферных параметров, полученные в результате численного моделирования атмосферной циркуляции с помощью модели МСВА для января.

На рис. 1 представлены схематические линии тока в меридиональной плоскости (слева) и векторы, отражающие среднюю остаточную меридиональную циркуляцию на высоте 0—60 км, рассчитанную по формулам (3) и (4) (справа). На рис. 1 *a* представлены распределения, рассчитанные по модели МСВА, а на рис. 1 *b* — по данным ретроспективного анализа метеорологической информации MERRA-2 [14] за 2010 г. Данные осреднены по долготе и за январь. На рисунках слева хорошо различимы две основные ячейки остаточной циркуляции с восходящим потоком в низких и средних широтах Южного полушария и нисходящими потоками в высоких широтах обоих полушарий. В отличие от средней «эйлеровой» меридиональной циркуляции, которая состоит из трех пар ячеек (тропические ячейки Хэдли, управляемые неадиабатическим нагревом, вихревые среднеширотные ячейки Феррела и генерируемые температурными градиентами полярные ячейки), остаточная циркуляция состоит из двух ячеек Хэдли, распространяющихся от экваториальных широт к полярным [8]. При этом в зимний период, в нашем случае в Северном полушарии, ячейка циркуляции значительно крупнее, чем в Южном полушарии, а скорость остаточного меридионального и вертикального ветра выше, что показано на рис. 1 справа.

Сравнение рис. 1 *a* и *b* показывает, что наблюдается соответствие структуры и величины меридиональной циркуляции по модельным данным и наблюдаемым ассимилированным данным. Распределения линий тока для января, аналогичные приведенным на рис. 1 слева, были получены в работе [7], в которой остаточная средняя меридиональная циркуляция рассчитывалась на основе данных модели общей циркуляции СМАМ (Canadian Middle Atmosphere Model). Помимо

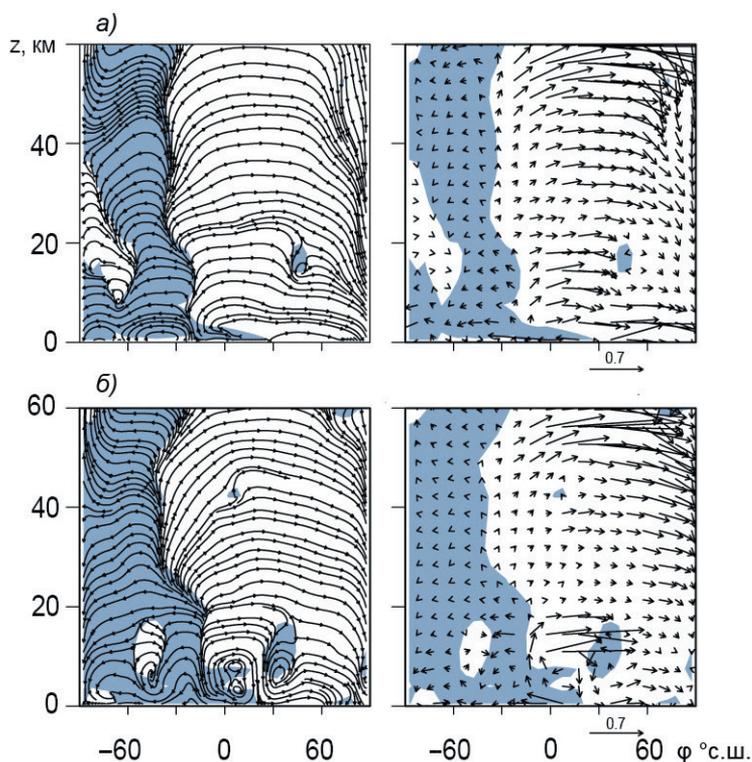


Рис. 1. Широтно-высотные распределения остаточной меридиональной циркуляции на базе расчетов МСВА (а) и по данным реанализа MERRA-2 (б) для января: среднезональные схематические линии тока (слева) и векторы (справа, горизонтальная компонента ветра в м/с, вертикальная в см/с). Серо-голубым тоном обозначен отрицательный (направленный на юг) остаточный меридиональный ветер.

модельных данных, для анализа остаточной меридиональной циркуляции использовались данные наблюдений с помощью микроволнового контура (MLS) на борту спутника исследования верхней атмосферы (UARS). В работе [10] представлены распределения вертикальной и меридиональной компонент остаточной циркуляции, которые согласуются с рассчитанными автором данными. Хорошее соответствие с данными, представленными на рис. 1, также было получено в исследовании Gille с соавторами [15], где представлены поля остаточной меридиональной циркуляции для зимних месяцев в Северном полушарии, рассчитанные на базе спутниковых данных LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere на спутнике Nimbus-7).

На рис. 2 представлены меридиональная (см. рис. 2 а) и вертикальная (см. рис. 2 б) компоненты среднезональной эйлеровой циркуляции (слева), остаточной средней циркуляции (в центре), рассчитанные по формулам (3) и (4), и волновой

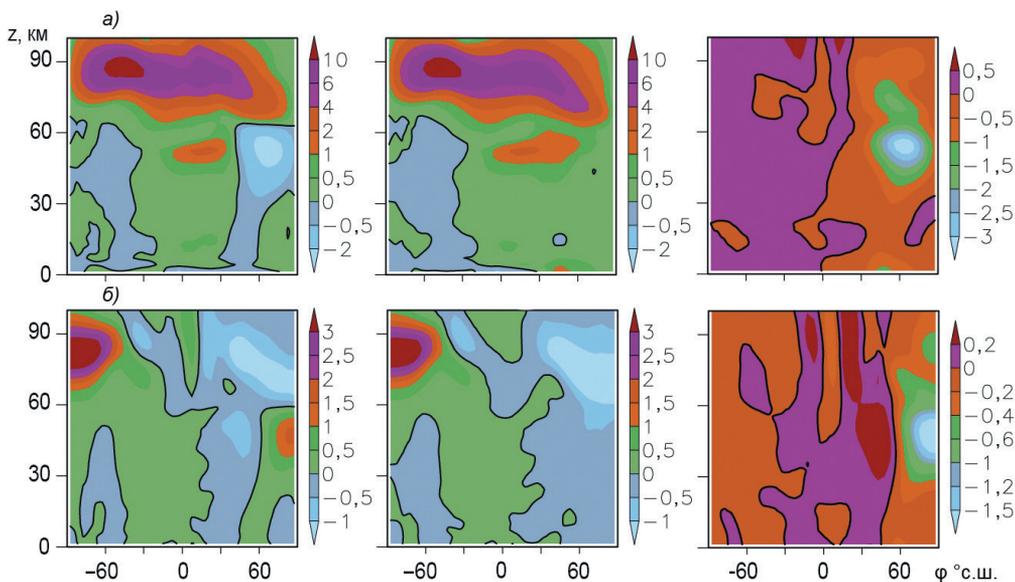


Рис. 2. Меридиональная, м/с (а) и вертикальная, см/с (б) компоненты среднезональной эйлеровой циркуляции (слева), остаточной циркуляции (в центре) и волновой составляющей меридиональной циркуляции (справа) для января.

Черные контуры соответствуют нулевым значениям.

составляющей меридиональной циркуляции (справа), полученные на основе данных МСВА для января. На рисунках слева можно увидеть, что на высоте менее 60 км меридиональная и вертикальная компоненты среднего ветра образуют три пары ячеек циркуляции в низких, средних и высоких широтах обоих полушарий (см выше). На рисунках в центре видны только две ячейки остаточной меридиональной циркуляции: меньшая в Южном полушарии и большая в экваториальных широтах и в Северном полушарии. Такая структура характерна для января (см., например, [8]). Максимальная скорость меридиональной циркуляции наблюдаются на высоте 70—90 км.

Рассчитанные в МСВА компоненты средней меридиональной циркуляции, представленные на рис. 2 слева, сравнивались с распределениями меридионального и вертикального ветра, полученными по базам данных реанализа метеорологической информации JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis, [17]), и MERRA-2 [14]. Было обнаружено сходство модельных и наблюдаемых данных.

На рис. 2 справа видно, что волновая составляющая меридиональной циркуляции является максимальной в Северном, «зимнем» полушарии, и это согласуется с существующей теорией [6, 8]. На высотах средней атмосферы она может превышать 100 % соответствующих компонент средней меридиональной циркуляции, внося существенный вклад в меридиональный перенос газовых примесей.

Заключение

В настоящем исследовании проведено численное моделирование общей циркуляции средней атмосферы с использованием модели МСВА для января. Получены данные о средней меридиональной циркуляции в слое от поверхности до высоты 100 км. Представлены формулы для расчета средней остаточной меридиональной циркуляции по данным МСВА, рассчитаны остаточная циркуляция и волновые компоненты меридиональной циркуляции.

Показано, что полученные распределения средней и остаточной меридиональной циркуляции согласуются с данными наблюдений и с результатами предыдущих расчетов, проводившихся как на основе обработки данных наблюдений, так и в результате проведения модельных экспериментов.

Волновой вклад в меридиональную циркуляцию является максимальным в Северном полушарии. При этом в средней атмосфере этот вклад может превышать 100 % соответствующих компонент средней меридиональной скорости и оказывать существенное влияние на меридиональный перенос газовых примесей в атмосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-77-00022).

Список литературы

1. Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Численное моделирование реакции общей циркуляции средней атмосферы на пространственные неоднородности орографических волн // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 401—408.
2. Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Якоби К. Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 1. С. 9—18.
3. Коваль А. В., Гаврилов Н. М. Параметризация воздействия орографических волн на общую циркуляцию средней и верхней атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2011. Вып. 20. С. 85—89.
4. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 52. Вып. 2. С. 357—372.
5. Andrews D. G., and McIntyre M. E., Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen–Palm relation and the mean zonal acceleration // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. P. 2031—2048.
6. Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle Atmosphere Dynamics // Academic Press, Orlando, FL. 1987. 489 p.
7. Birner T., Bönisch H. Residual circulation trajectories and transit times into the extratropical lowermost stratosphere // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 817—827. doi 10.5194/acp-11-817-2011.
8. Butchart N. The Brewer-Dobson circulation // Rev. Geophys. V. 52. P. 157—184. doi:10.1002/2013RG000448.
9. Eliassen A., Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves // Geophys. Norv. 1961. V. 22. P. 1—23.
10. Eluszkewicz J., Crisp D., Zurek R., Elison L. et al. Residual circulation in the Stratosphere and lower Mesosphere as diagnosed from Microwave Limb Sounder Data // J. Atm. Sci. 1996. V. 53. I. 2. P. 217—240.
11. Fishman J., Crutzen P. J. The origin of ozone in the troposphere // Nature. 1978. V. 274. P. 855—857.
12. Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // Advances in Space Research. 2003. V. 32. P. 863—868.

13. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* Simulating planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different mountain wave scenarios // *Advances in Space Research*. 2018. V. 61, I. 7. P. 1819—1836. doi 10.1016/j.asr.2017.08.022
14. *Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R.* et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Climate*. 2017. V. 30 (14). P. 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1
15. *Gille J. C., Lyjak L. V., Smith A.* The Global Residual Mean Circulation in the Middle Atmosphere for the Northern Winter Period // *J. Atm. Sci.* 1987. V. 44, I. 10. P. 1437—1452.
16. *Holton J. R.* An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. Elsevier Academic Press. 2004. 535 p.
17. *Kobayashi S., Ota Y., Harada H.* The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2015. V. 93. P. 5—48. doi:10.2151/jmsj.2015-00
18. *Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* Comparisons of planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different QBO phases // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 171. P. 201—209. doi: 10.1016/j.jastp.2017.04.013
19. *Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Froehlich K., Jacobi Ch.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 2083—2101. doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014
20. *Shepherd T. G.* Transport in the middle atmosphere // *J. Meteor. Soc. Japan*. 2007. 85B. P. 165—191.

**АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ
В ХОЛОДНОМ ПОЛУГОДИИ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В БЛИЖАЙШЕЕ ПЯТИЛЕТИЕ**

А.Я. Коржиков¹, В.Я. Александров²

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

² Российский государственный гидрометеорологический университет, meteovik1@mail.ru

Представлены результаты исследования динамики изменения средних за холодные сезоны аномалий температуры воздуха в Западной Арктике в 1990—2018 гг. Показано, как проявляется тенденция глобального потепления в юго-западной части Карского моря. Определены основные синоптические процессы, которые формируют аномалии температуры воздуха разного знака в Карском море. Приводятся результаты расчета средних для холодных сезонов аномалий температуры воздуха до 2023 г. включительно. Показана тенденция к уменьшению значений положительных аномалий температуры воздуха на юго-западе Карского моря в холодных сезонах в ближайшее пятилетие.

Ключевые слова: аномалии температуры воздуха, Арктика, Карское море, элементарный синоптический процесс.

**ANOMALIES OF AIR TEMPERATURE
IN THE SOUTH-WESTERN PART OF THE KARA SEA
IN THE COLD HALF OF THE YEAR AND THE PROSPECTS
FOR THEM CHANGE IN THE NEXT FIVE YEARS**

A. Ya. Korzhikov¹, V. Ya. Alexandrov²

¹ Arctic and Antarctic Research Institute

² Russian State Hydrometeorological University

Air temperature anomalies observed during the cold period of the year play a significant role in the formation of the ice cover of the Arctic seas. Negative anomalies lead to the appearance of ice, exceeding the thickness of normal value and, conversely, during positive temperature anomalies the thickness of the ice usually does not reach the long-term average. The paper deals with the average seasonal anomalies of air temperature in the South -Western part of the Kara sea for the period from 1990 to 2018 for the cold half of the year (October — February). Air temperature anomalies in the South-Western part of the Kara Sea were considered against the background of temperature anomalies over the entire Western Arctic, surface pressure fields and high-altitude topography (H500).

Keywords: anomalies of air temperature, Arctic, Kara Sea, elementary synoptic process.

Введение

Навигация на западном участке трассы Северного морского пути осуществляется в круглогодичном режиме. Максимальные нагрузки морской флот испытывает в холодный период года, когда в результате преобладания отрицательной температуры воздуха акватория Карского моря, часть акватории Баренцева моря

и сибирские реки покрываются льдом. Исследование современных термических условий в холодном сезоне с целью дальнейшего их прогнозирования для этого периода года в Западной Арктике приобретает особую актуальность.

К настоящему времени опубликовано много исследований, посвященных потеплению в Арктике. Исследования, направленные на разработку методик сезонных прогнозов, идут по пути математического моделирования временных рядов [7].

Прогнозы температуры воздуха в Арктике с заблаговременностью до года составляются в ААНИИ. Используется макроциркуляционный метод прогнозирования, основанный на учете закономерностей макромасштабных преобразований атмосферной циркуляции над Северным полушарием [4]. Прогнозируются фоновые характеристики температуры воздуха. Основное внимание уделяется знаку аномалий температуры.

В настоящей работе сделана попытка исследовать динамику изменения аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодный период года с целью получения статистических связей для прогнозирования их на несколько сезонов вперед.

В качестве исходного материала использован архив средних значений аномалий температуры воздуха, полей приземного давления и геопотенциала H500, рассчитанных для холодного сезона (октябрь — февраль) по Западной Арктике. Для этих целей использована база данных реанализа NCEP/NCAR. Аномалии температуры воздуха вычислялись от средних значений ряда за 1981—2010 гг.

Кроме того, для каждого холодного сезона подсчитано среднее число типовых групп атмосферных процессов. Данные по группам атмосферных процессов взяты из каталога, который постоянно в оперативном режиме пополняется в лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ.

Анализ аномалий температуры воздуха в холодный период года в Западной Арктике

В Западной Арктике выделим четыре района, аномалии температуры воздуха в которых относятся к предмету нашего исследования: Баренцево море (район 1), Карское море (район 2), Обь-Енисейский север (район 3) и западная часть приполюсной области (район 4) (рис. 1).

Распределение аномалий температуры воздуха по районам Западной Арктики в холодный период года за исследуемый ряд лет приводится в табл. 1.

На рис. 2 представлена повторяемость положительных аномалий температуры воздуха в различных районах Западной Арктики в холодные сезоны года с 1990 по 2018 г.

Из рис. 2, построенного на основе данных, приведенных в табл. 1, видно, что с 1990 по 1998 г. в холодный период года в Западной Арктике наблюдались преимущественно отрицательные аномалии температуры воздуха. Начиная с сезона 1999-2000 г. над всей Западной Арктикой преобладали положительные аномалии температуры воздуха, причем в западной части приполюсной области их

повторяемость составляла 100 %. Проявилась общая тенденция глобального потепления. Разделение исследуемого периода на два по знаку преобладающих аномалий температуры воздуха во многом связано с нормами, по которым вычислялись аномалии температуры (период вычисления нормы близок к периоду нашего исследования, а при наличии положительного тренда сначала идут отрицательные аномалии, которые потом переходят в положительные).

На рис. 3 показана межгодовая изменчивость средних сезонных аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодный период года. Средние значения аномалий получены по данным полярных станций на острове Вайгач, острове Белый и на мысе Желания (см. рис. 1).

Таблица 1

Распределение знака аномалий температуры воздуха по районам Западной Арктики в октябре — марте 1990—2018 гг.

Холодный период	Район			
	1	2	3	4
1990-91	+	-	-	-
1991-92	-	-	-	-
1992-93	-	-	-	-
1993-94	-	-	-	-
1994-95	+	+	+	-
1995-96	-	-	+	-
1996-97	-	-	-	+
1997-98	-	-	-	+
1998-99	-	-	-	+
1999-00	+	+	+	+
2000-01	+	+	-	+
2001-02	+	+	+	+
2002-03	-	-	-	+
2003-04	-	-	-	+
2004-05	+	+	+	+
2005-06	+	+	+	+
2006-07	+	+	+	+
2007-08	+	+	+	+
2008-09	+	+	+	+
2009-10	+	+	-	+
2010-11	+	+	+	+
2011-12	+	+	+	+
2012-13	+	+	+	+
2013-14	+	+	+	+
2014-15	+	+	-	+
2015-16	+	+	+	+
2016-17	+	+	+	+
2017-18	+	+	-	+

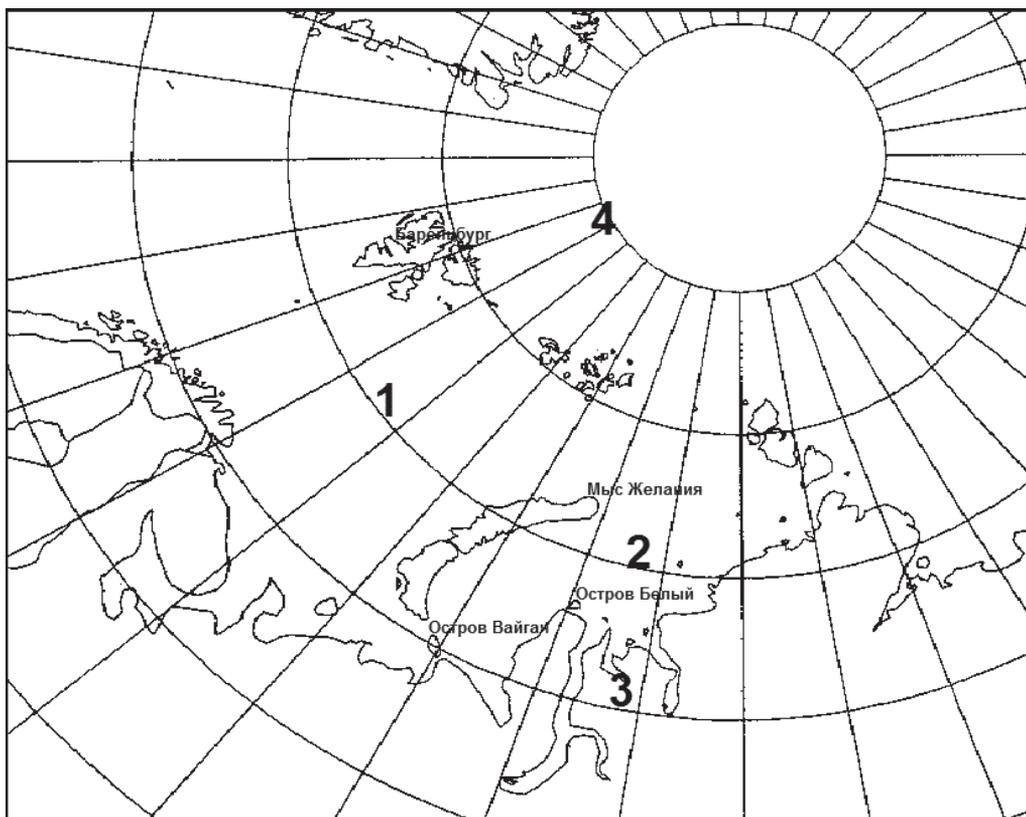


Рис 1. Карта Западной Арктики.

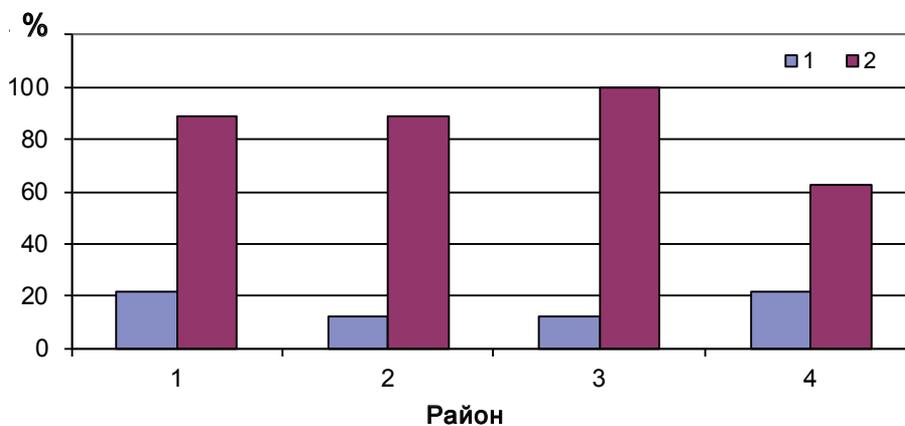


Рис. 2. Повторяемость положительных аномалий температуры воздуха в районах Западной Арктики в холодные сезоны в 1990—1998 гг. (1) и 1999—2018 гг. (2). Аномалии вычислены от средних значений температуры воздуха за период 1981—2010 гг.

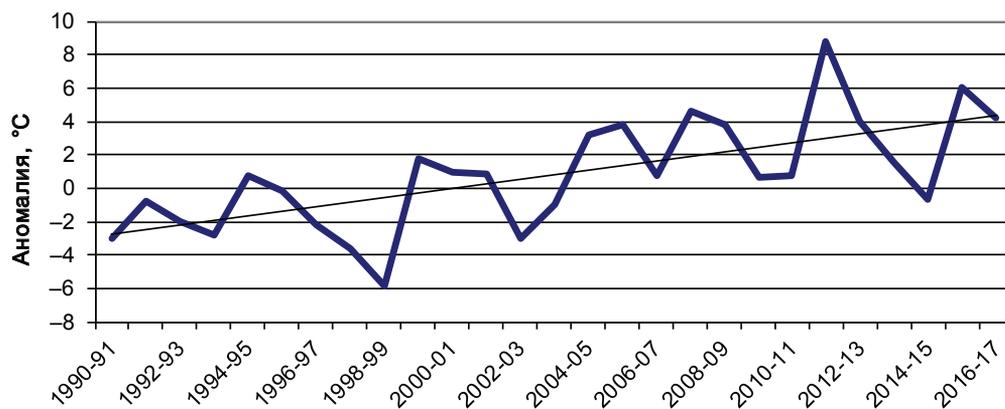


Рис. 3. Межгодовая изменчивость средних сезонных аномалий температуры воздуха (°C) в юго-западной части Карского моря в холодный период года (октябрь — февраль) за период с 1990 по 2018 г.

Из рис. 3 следует, что аномалия температуры воздуха на юго-западе Карского моря имеет *положительный* линейный тренд. Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,52$.

Кроме того, из рисунка видно, что начиная с сезона 1999-2000 г. в этом районе преобладают положительные аномалии температуры воздуха, что характерно для всей Западной Арктики в целом.

Аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря имеют положительную связь с аномалиями температуры в Обской губе. Корреляция с аномалиями на полярной станции Тамбей составляет 0,93. Связь с аномалиями на полярной станции Баренцбург несколько хуже (0,61), что обусловлено влиянием синоптических процессов над Канадским Арктическим архипелагом, Гренландским морем. Ошибка коэффициента корреляции δ_r для первого случая составляет 0,02, для второго 0,12. Для выборки ($n = 28$) полученные коэффициенты подтверждают существующую связь.

Эти корреляционные связи вполне объяснимы. Юго-запад Карского моря в холодный период года находится на оси климатической ложбины, направленной от атлантической депрессии в Арктику.

Анализ сезонных карт приземного давления позволил сделать вывод о том, что крупные положительные аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря возникают при формировании мощной ложбины атлантической депрессии, направленной в сторону приполюсной области, архипелага Северная Земля. Например, в сезон 2011-12 г., когда аномалия температуры в юго-западной части Карского моря достигала $+8,4$ °C (см. рис. 3), климатическая ложбина от Северо-Восточной Атлантики была направлена на Землю Франца-Иосифа и приполюсную область, что обусловило адвекцию теплых воздушных масс в Западную Арктику.

Наоборот, при формировании крупных отрицательных аномалий температуры воздуха ось ложбины атлантической депрессии менее развита и смещается к побережью Баренцева моря, на юг Новой Земли. Возможен также вариант локализации холодной воздушной массы в виде замкнутого циклонического вихря непосредственно над Баренцевым и Карским морями. Во всех этих случаях в исследуемый район поступают холодные воздушные массы из Арктического бассейна. Например, в сезон 2002-03 г., когда средняя аномалия температуры воздуха составляла $-2,4$ °С, над Баренцевым и Карским морями у поверхности Земли наблюдалась замкнутая циклоническая циркуляция, а на уровне 500 гПа над Карским морем находился центр высотного циклонического вихря.

Таким образом, знак и величина формирующихся аномалий температуры воздуха над акваторией юго-западной части Карского моря и над Западной Арктикой в целом существенно зависят от направления и интенсивности адвекции воздушных масс. Адвекцию воздушных масс во многом определяет поле приземного давления. Исследователи в России [3] и за рубежом [8] на основе анализа архивного аэросиноптического материала за много лет пришли к выводу о том, что над Арктическим бассейном наблюдается шесть основных групп синоптических процессов длительностью примерно семь дней, которые включают от одного до трех элементарных синоптических процесса (ЭСП) [3]. Впервые группы определены в ААНИИ и опубликованы в Атласе Арктики [1].

Анализ синоптических процессов в холодный период года

Исследование связи аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря с повторяемостью ЭСП групп барических полей показало, что максимальная корреляционная связь наблюдается с барическими полями ЭСП группы В ($r = 0,50$; $\delta_r = 0,14$), для которой характерно развитие циклонической деятельности над Западной Арктикой и вследствие этого формирование положительных аномалий температуры над этим регионом полярного бассейна [1, 3, 5].

Вторая по величине корреляционная связь наблюдается с ЭСП группы Б и имеет отрицательный знак ($r = -0,31$; $\delta_r = 0,17$). Синоптические процессы группы Б характеризуются развитием над Арктическим бассейном антициклона, который блокирует перемещение теплых атлантических воздушных масс на юго-запад Карского моря [3, 5].

На рис. 4 представлена повторяемость процессов групп Б и В в холодные сезоны 1990—2018 гг.

В уже упомянутом максимально теплом зимнем сезоне 2011-12 г. наблюдалось 22 элементарных синоптических процесса группы В, что и привело к адвекции большого количества теплого воздуха с Атлантики в Западную Арктику. При этом процессы группы Б, для которых характерно формирование обширного антициклона в Арктическом бассейне, отмечены только в двух ЭСП (рис. 4).

Связь между повторяемостью процессов групп Б и В в холодный период года небольшая ($r = -0,09$). Это обстоятельство позволяет использовать их в качестве независимых предикторов в регрессионной модели расчета аномалий температуры воздуха на юго-западе Карского моря.

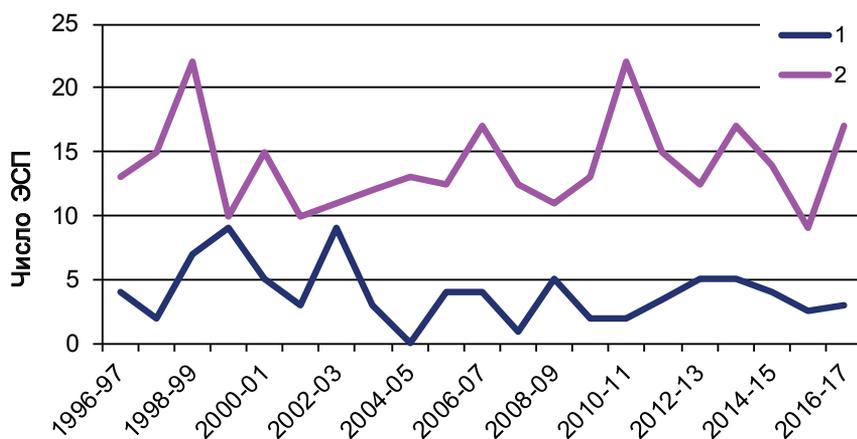


Рис. 4. Межгодовая изменчивость повторяемости процессов групп Б (1) и В (2) в холодный сезон года (октябрь — февраль) 1990—2018 гг.

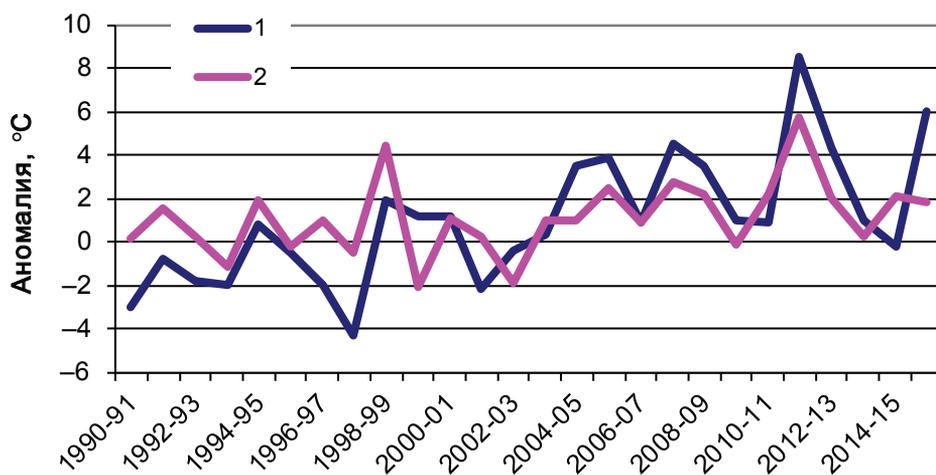


Рис. 5. Межгодовая изменчивость фактических значений аномалий температуры воздуха (1) и аномалий, рассчитанных по линейной регрессионной модели с независимыми параметрами Б и В (2).

На рис. 5 сопоставляются фактические значения аномалий температуры воздуха в юго-западной части Карского моря с аномалиями, рассчитанными по линейной регрессионной модели, где в качестве независимых переменных используются данные о повторяемости ЭСП групп синоптических процессов Б и В.

Уравнение множественной линейной регрессии для этих групп имеет следующий вид:

$$Y = 0,4x_1 - 0,4x_2 - 2,7, \tag{1}$$

где Y — средняя за октябрь — февраль аномалия температуры воздуха на юго-западе Карского моря ($\Delta T_{\text{БВ}}$); x_1 и x_2 — повторяемость синоптических процессов соответственно групп В и Б в октябре — феврале. Множественный коэффициент корреляции для этого уравнения $r = 0,56$, стандартная ошибка вычисления составляет 2,7. Доля совпадений фактических и расчетных значений ΔT по знаку составляет 0,68.

Таким образом, прогностические данные о повторяемости ЭСП групп Б и В можно использовать для оценки предстоящих изменений ΔT на юго-западе Карского моря в холодный период года.

Прогностические значения ΔT можно определить, используя модель, основанную на вычислении авторегрессии и скользящего среднего динамического ряда. Данный подход разработан Дж. Боксом и Г. Дженкинсом [3].

Авторами проведен расчет ΔT на пять шагов вперед — на пять холодных сезонов с 2018 по 2023 г. (рис. 6).

Результаты расчетов ΔT , представленные на рис. 6, показывают, что в ближайшее пятилетие в юго-западной части Карского моря в холодные сезоны будут сохраняться положительные аномалии температуры воздуха. Однако тренд их изменений сменится на отрицательный, что может привести в ближайшее пятилетие к постепенному усложнению ледовых условий в холодный период года не только в юго-западной части Карского моря, но и в Западной Арктике в целом.

На эту тенденцию указывают также изменения повторяемости синоптических процессов группы В (рис. 7). После максимально теплого зимнего сезона

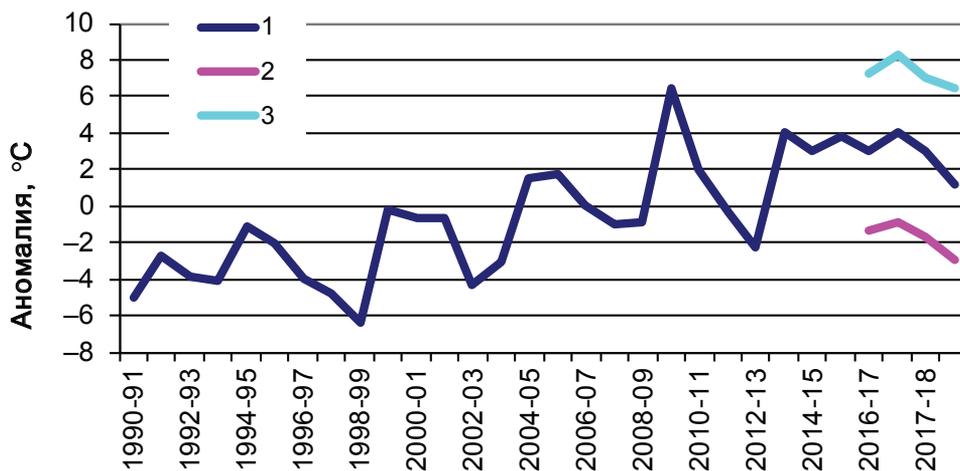


Рис. 6. Фактические и прогностические значения средних сезонных (октябрь — февраль) аномалий температуры воздуха ΔT в юго-западной части Карского моря на период до 2023 г.

1 — фактические (до 2018 г.) и прогностические (после 2018 г.) значения ΔT ;
2 и 3 — соответственно нижняя и верхняя границы 95 %-ного доверительного интервала.

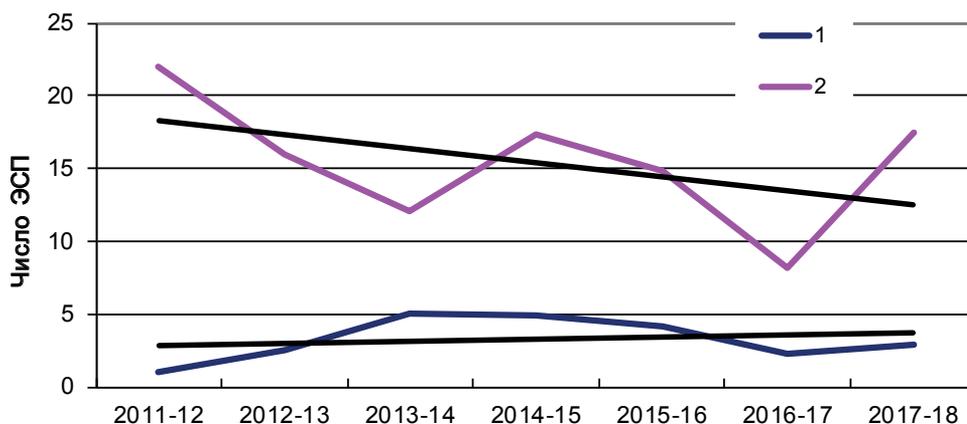


Рис. 7. Тенденции в изменении повторяемости синоптических процессов групп Б (1) и В (2) в холодные сезоны 2011—2018 гг.

2011-12 г., когда повторяемость группы В достигла 22 ЭСП за сезон, в последующий период возник отрицательный линейный тренд, который может стать предвестником уменьшения повторяемости ЭСП этой группы и, следовательно, сокращения адвекции теплых воздушных масс в Западную Арктику.

Заключение

Совместный анализ аномалий температуры воздуха и синоптических процессов в холодный период года в Западной Арктике позволил получить следующие результаты.

1. В исследуемом ряду лет (1990—2018 гг.) проявилась тенденция смены в холодные сезоны года преобладающих отрицательных аномалий температуры воздуха в Западной Арктике на положительные, что обусловлено общей тенденцией глобального потепления и отчасти средними значениями температуры воздуха (1981—2010 гг.), которые применялись для расчета аномалий.

В юго-западной части Карского моря в период с 1990 по 2018 г. выявлен положительный тренд в динамике формирования средних за холодные сезоны аномалий температуры воздуха. Показано, что аномалии температуры воздуха в этом районе достаточно тесно связаны с аномалиями температуры воздуха в других районах Западной Арктики.

2. Положительный тренд в динамике аномалий температуры воздуха в холодный период года в юго-западной части Карского моря связан с увеличением повторяемости элементарных синоптических процессов группы В, для которой характерно развитие циклонической деятельности над Баренцевым морем и Западной Арктикой в целом. При этом происходит адвекция теплых масс воздуха из приатлантического сектора Северного полушария в полярные широты. Отмечен также отрицательный тренд повторяемости процессов группы Б, для которой характерно формирование над Арктическим бассейном полярного антициклона,

блокирующего перенос теплых воздушных масс с Атлантики на акваторию Карского моря.

Показана возможность расчета средней сезонной аномалии температуры воздуха в юго-западной части Карского моря в холодный период года по синхронным данным о повторяемости синоптических процессов групп Б и В.

3. Результаты расчета величины ΔT на юго-западе Карского моря по модели, основанной на вычислении авторегрессии и скользящего среднего динамического ряда для пяти прогностических сезонов в холодный период года, показали, что положительные аномалии температуры воздуха будут сохраняться. Однако тренд их изменений сменится на отрицательный, что может привести в ближайшее пятилетие к постепенному усложнению ледовой обстановки не только в юго-западной части Карского моря, но и в Западной Арктике в целом.

На это также указывает тенденция к сокращению повторяемости синоптических процессов группы В и вследствие этого ослаблению адвекции теплых воздушных масс в Западную Арктику.

Список литературы

1. Атлас Арктики. М.: изд-во Главного управления геодезии и картографии при СМ СССР, 1985. 204 с.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1994. 408 с.
3. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 488 с.
4. Дыдина Л.А. Особенности развития синоптических процессов в Арктике и их использование в прогнозах на средние сроки. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 224 с.
5. Ильющенко И.А., Коржиков А.Я., Александров В.Я. Характеристики полей приземного давления и аномалий температуры воздуха в Арктике в период глобального потепления // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 40. С. 142—149.
6. Шестаков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменений климата // Арктика и Север. 2016. № 24. С. 39—67.
7. Belleflamme A., Fettweis X., Erpicum M. Recent summer Arctic atmospheric circulation anomalies in historical perspective // Cryosphere. 2015, 9. P. 53—64.

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА
НА ТЕРРИТОРИИ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА
В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ (2000—2018 гг.)**

Е.В. Чурюлин^{1, 2}, Е.Ю. Жданова¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
evgenyichur@gmail.com

² Гидрометцентр России

Пространственная изменчивость и временные изменения параметров снежного покрова на территории Москвы и Московской области рассматриваются на основе стандартных метеорологических измерений. Плотность снега и водный эквивалент снежного покрова за период 2000 — 2018 гг. были получены с использованием одномерной многослойной модели *SnoWE* для территории Московского региона. Сравнения со снегомерными маршрутными съемками показали, что восстановленный водный эквивалент снежного покрова недооценен, а плотность снега завышена. Альbedo поверхности при наличии снежного покрова в Москве изменялось от 52 до 67 %, коэффициент вариации альbedo поверхности составил 7 % за период с 2001 по 2017 г. Спутниковые данные *MODIS* по альbedo снежного покрова (коллекция *MOD10A1*) сопоставимы с результатами наземных точечных измерений для Москвы в случае однородного покрытия спутникового пикселя снегом.

Ключевые слова: синоптические наблюдения, модель снежного покрова *SnoWE*, запас воды в снеге, плотность снега, альbedo снега, многолетние измерения.

**SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY
OF SNOW COVER CHARACTERISTICS
IN MOSCOW REGION IN RECENT DECADES (2000 — 2018)**

E. V. Churyulin^{1, 2}, E. Yu. Zhdanova¹

¹ Lomonosov Moscow State University

² Hydrometcenter of Russia

Spatial variability and temporal changes in snow cover characteristics over the territory of Moscow and the Moscow region are considered based on standard meteorological measurements. Snow density and snow water equivalent for the period 2000—2018 were retrieved by using one-dimensional multilayer *SnoWE* model for the territory of Moscow region. Comparisons with snow route measurements have shown that retrieved snow water equivalent is underestimated and snow density is overestimated. The inter-annual variations of surface albedo in presence of snow cover in Moscow range from 52 to 67 %, coefficient of variation is 7 % for the period 2001 — 2017. *MODIS* satellite data of snow cover albedo (*MOD10A1* collection) are comparable with ground-based point measurements for Moscow in the case of homogeneous coverage with snow of satellite pixel.

Keywords: synoptic observations, snow cover model *SnoWE*, snow water equivalent, density of snow, snow albedo, long-term measurements.

Введение

Характеристики снежного покрова являются климатически значимыми параметрами. К основным характеристикам снежного покрова относятся запас воды в снежном покрове, который зависит от толщины снежного покрова и его плотности, а также альbedo. Альbedo снежной поверхности зависит от размера снежных зерен и содержащихся в снежном покрове примесей [13].

Часто для исследования пространственно-временной динамики развития снежного покрова используются данные стационарных метеорологических наблюдений или маршрутных снегомерных съемок. В работе [9] по данным маршрутных снегосъёмок показано, что в последние годы толщина снежного покрова на северо-востоке европейской части России стала на 40 % меньше по сравнению с периодом 1966—2000 гг. и в то же время наблюдается увеличение толщины снежного покрова в ряде регионов юга европейской части России. Выявлено, что положительный тренд толщины снежного покрова за 1986—1995 гг. составил 0,4 см/год для Европейской равнины [5]. Было определено, что тенденция увеличения снегозапасов на Восточно-Европейский равнине связана с увеличением снегозапасов в январе [3]. Возможные связи между изменениями атмосферной циркуляции и современной зимней аккумуляции снега рассмотрены в работе [10].

По данным за 50-летний период (до 2005 г.) для территории Москвы было выяснено, что даты образования и разрушения снежного покрова смещались в одном направлении, а число дней со снежным покровом и высота снежного покрова существенно не изменились [6]. Восстановить тонкую структуру снежного покрова возможно с помощью использования специального оборудования, в частности пенетromетра высокого разрешения [4]. Кроме наземных данных, для определения состояния снежного покрова, оценки водного эквивалента снега, альbedo поверхности, площади снежного покрова могут применяться данные спутникового зондирования Земли. Однако в случае восстановленного водного эквивалента снежного покрова наблюдаются существенные расхождения с наземными данными [7]. Кроме того, стоит отметить, что характеристики снежного покрова с высоким пространственным и временным разрешением можно получить с помощью численных моделей снежного покрова [11].

Основная задача настоящей работы заключается в определении пространственной изменчивости характеристик снежного покрова (высоты снежного покрова, запаса воды в снеге, отражательных свойств снежного покрова) и их временных изменений в масштабе отдельного региона (Москва и Московская область). Отличительной особенностью работы является использование полученных за последние два десятилетия данных стандартных метеорологических наблюдений, результатов численных расчетов, которые позволили восстановить ежедневный запас воды в снежном покрове, и данных спутниковых измерений.

Материалы и методы

В настоящей работе использованы данные о высоте снежного покрова, полученные по данным метеорологических станций, расположенных на территории

идет по второму сценарию. Второй сценарий расчета содержит три варианта развития снежного покрова на метеорологической станции в зависимости от его изменения: 1) высота снежного покрова увеличилась; 2) высота снежного покрова не изменилась; 3) высота снежного покрова уменьшилась. В случае увеличения высоты снежного покрова в модели реализованы два подхода к решению задачи расчета запаса воды в снежном покрове: 1) выпал сухой снег; 2) выпал мокрый снег, в том числе учитывается возможность выпадения снега с дождем. В случае уменьшения высоты снежного покрова также реализованы два подхода в зависимости от причины, которая вызвала уменьшение высоты снега: 1) высота снежного покрова уменьшилась за счет сдувания и уплотнения снежного покрова под действием ветра; 2) высота снежного покрова уменьшилась из-за того, что часть снежного покрова растаяла или выпали атмосферные осадки в виде дождя, вследствие чего произошло уплотнение нижележащих слоев снежного покрова под воздействием вышележащих слоев снега [12].

Работа модели снежного покрова SnoWE основывается на использовании стандартных метеорологических данных (приземная температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м, высота снежного покрова, осадки), поступающих в синоптическом коде SYNOP по каналам связи Всемирной метеорологической организации, информации полей первого приближения (поля водного эквивалента и плотности снега) из оперативной системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru на основе данных, поступающих из системы усвоения Немецкой службы погоды (DWD), информации о границах снежного покрова (спутниковые данные, NOAA, пространственное разрешение 4 км).

Расчет по модели SnoWE с 2015 г. выполняется в Гидрометцентре РФ в квази-оперативном режиме на сетках модели COSMO-Ru для трех регионов Российской Федерации с различным пространственным шагом (Центральный федеральный округ — 2,2 км (ЦФО, COSMO-Ru2), Восточно-Европейская равнина — 7 км (ЕТР, COSMO-Ru7), Россия — 13,2 км (ЕНА, COSMO-Ru13)).

В настоящей работе использовалась сетка ЦФО и режим работы модели SnoWE для станций. Кроме того, был разработан алгоритм и создан макет для фактической метеорологической информации, который позволяет преобразовать фактическую архивную информацию в пригодный для работы с моделью вид. Данное нововведение расширило возможности реализации расчетов модели SnoWE, сделав возможным использовать различные архивы синоптической информации, например информацию с базы данных ВНИИГМИ — МЦД, расположенной на веб-ресурсе <http://meteo.ru/>.

Для валидации восстановленных запасов воды в снеге по модели SnoWE были использованы результаты маршрутных снегомерных съемок.

Для характеристики пространственного распределения альbedo снега использовались данные MODIS коллекции MOD10A1 по данным спутника Terra [15] за период 2000—2017 гг. с пространственным разрешением 500 м, в том числе были использованы альbedo снежного покрова и нормализованный дифференцированный снежный индекс NDSI, который представляет собой отношение разности и суммы яркости в каналах 4 и 6 (555 и 1640 нм). При этом учитывается маска

облачности, поскольку облака, как и снег, хорошо отражают излучение в видимой части спектра и поглощают его в инфракрасной. Пороговое значение индекса *NDSI* принималось равным 0,4. Все пиксели, имеющие значение индекса больше порогового, рассматривались как заснеженные [8]. Пиксель считается полностью заснеженным, если индекс *NDSI* превышает 0,7 [14].

Результаты

1. Многолетние изменения высоты, альбедо и характерных фаз залегания снежного покрова на территории Москвы и Московской области

По данным о высоте снежного покрова, полученным на станциях Москвы и области за период 2000—2018 гг., оценены даты характерных фаз залегания снежного покрова (табл. 1). К основным датам, представляющим наибольший интерес, относятся дата выпадения снежного покрова, дата формирования устойчивого снежного покрова, дата накопления максимальных снегозапасов и дата полного стаивания снега.

Для выявления территориальной изменчивости снежного покрова в рассматриваемом регионе метеорологические станции были разделены на две группы:

Таблица 1

Даты наступления характерных фаз снежного покрова
на территории Москвы и Московской области за период с 2000 по 2018 г.,
усредненные для всех метеостанций региона

Сезон	Первый снег		Устойчивый снежный покров		Максимальные снегозапасы		Снежный покров растаял	
	Город	Область	Город	Область	Город	Область	Город	Область
2000/01	20.11.00	08.11.00	16.12.00	09.10.00	07.03.01	04.03.01	07.04.01	04.04.01
2001/02	15.11.01	15.11.01	16.11.01	16.11.01	07.01.02	07.01.02	05.03.02	17.03.02
2002/03	10.11.02	07.10.02	10.12.02	04.12.02	25.03.03	15.01.03	12.04.03	15.04.03
2003/04	25.10.03	21.10.03	07.12.03	04.12.03	10.02.04	27.02.04	27.03.04	27.03.04
2004/05	17.11.04	16.11.04	18.11.04	17.11.04	20.03.05	20.03.05	07.04.05	10.04.05
2005/06	20.10.05	26.10.05	01.12.05	01.12.05	14.03.06	14.03.06	10.04.06	10.04.06
2006/07	27.11.06	27.10.06	18.01.07	20.01.07	16.02.07	02.03.07	18.03.07	20.03.07
2007/08	15.10.07	15.10.07	14.11.07	13.11.07	03.02.08	20.02.08	20.03.08	27.03.08
2008/09	20.11.08	16.11.08	16.12.08	14.12.08	20.03.09	12.03.09	12.04.09	11.04.09
2009/10	28.10.09	27.10.09	07.12.09	07.12.09	26.02.10	17.02.10	05.04.10	03.04.10
2010/11	18.11.10	16.11.10	19.11.10	24.11.10	15.02.11	16.02.11	16.04.11	20.04.11
2011/12	08.11.11	08.11.11	16.12.11	16.12.11	14.03.12	14.03.12	16.04.12	16.04.12
2012/13	25.10.12	26.10.12	28.11.12	27.12.12	27.03.13	20.03.13	16.04.13	20.04.13
2013/14	25.11.13	25.11.13	26.11.13	26.11.13	12.12.13	28.11.13	05.04.14	05.04.14
2014/15	17.10.14	16.10.14	01.12.14	01.12.14	10.02.15	10.02.15	08.04.15	23.04.15
2015/16	15.11.15	09.10.15	27.12.15	27.12.15	02.03.16	02.03.16	02.04.16	05.04.16
2016/17	26.10.16	25.10.16	27.10.16	26.10.16	29.01.17	17.02.17	05.04.17	24.04.17
2017/18	15.11.17	23.10.17	04.01.18	01.01.18	07.03.18	04.03.18	06.04.18	06.04.18

1) городские метеостанции, 2) областные метеостанции. На основе проделанной работы установлено, что в области снежный покров в большинстве случаев выпадает раньше, чем в городе (в среднем на 11 дней). Устойчивый снежный покров в области также формируются раньше (в среднем на три дня). Тает снежный покров в области позже, чем в городе (в среднем на шесть дней). Данные выводы свидетельствуют о том, что в городе приземная температура воздуха выше, чем в области, и выпадающие в городе осадки имеют жидкую форму. Следует также отметить, что в большинстве случаев в городе даты накопления максимальных снеготопливных запасов наступают позже (в среднем на пять дней), чем в области, что может косвенно свидетельствовать о влиянии городской застройки на формирование снежного покрова.

За исследуемый период первый снег, по данным всех метеостанций, выпадал преимущественно во второй и третьей декадах октября. Следует также отметить, что за последние 18 лет в случае выпадения снега в октябре первый снег полностью стаивал в течение первой декады ноября. Кроме того, первый снег ни разу не выпадал в первой декаде ноября, поскольку температура воздуха в этот период времени была положительной и фиксировались только жидкие осадки. Во второй декаде ноября снег выпадал в 22 % случаев, в третьей — в 17 % случаев. Следует также отметить, что при выпадении первого снега во второй или третьей декадах ноября снежный покров больше не стаивал до весны в 57 % случаев.

Устойчивый снежный покров формировался во второй и третьей декадах ноября в 44 % случаев. Наиболее часто устойчивый снежный покров формировался в Москве и Московской области к первой декаде декабря (44 % случаев), редко ко второй (6 %). Следует отдельно отметить малоснежную зиму 2006/07 г. Первая часть зимы была теплой, и устойчиво отрицательная температура воздуха установилась только к 21 января 2007 г., вследствие чего устойчивый снежный покров сформировался только в третьей декаде января.

Наибольший интерес вызывают максимальный снеготопливный запас и дата его наступления. Установлено, что максимальные снеготопливные запасы формируются в Московском регионе в следующие временные интервалы: вторая декада февраля — 6 %, третья декада февраля — 22 %, первая декада марта — 22 %, вторая декада марта — 22 %, третья декада марта — 11 %. Из всех зимних сезонов выделяется малоснежный сезон 2013/14 г., когда максимальный снеготопливный запас сформировался в результате сильного снегопада в начале сезона и достиг своего максимума к 27 ноября 2013 г. После этой даты снежный покров постепенно стаивал и уплотнялся.

Снежный покров полностью тает в течение двух-трех недель с момента достижения максимальных снеготопливных запасов (исключение составила зима 2013/14 г.). Полное отсутствие снежного покрова в большинстве случаев зафиксировано ко второй декаде апреля (62 %). Установлено, что в городской черте снежный покров тает быстрее, чем в области, на 2—3 дня вследствие более высокой среднесуточной температуры воздуха.

Зимний сезон 2012/13 г. был самым снежным за весь период исследования (рис. 2 а). Первый снег в эту зиму выпал в последней декаде октября 2012 г. и полностью растаял в течение 10 дней. Высота снежного покрова достигла

максимального значения (21 см) на метеорологической станции Волоколамск к 2 ноября 2012 г.

После стаивания первого снега снежный покров отсутствовал вплоть до 25 ноября 2012 г., когда начался формироваться устойчивый снежный покров, высота которого достигла максимального значения (78 см) к 21 марта 2013 г. на станции Волоколамск. Следует отметить, что в этот зимний сезон снежный покров практически не таял в связи с отсутствием оттепелей и наблюдалось большое количество твердых осадков. При повышении температуры воздуха весь снег стаял в течение 20 дней. Следует отметить, что год с подобными значениями высоты снежного покрова наблюдался в зимний сезон 2000/01 г.

Зимний сезон 2013/14 г. был самым малоснежным за весь исследуемый период (рис. 2 б). Положительные значения среднесуточной температуры воздуха

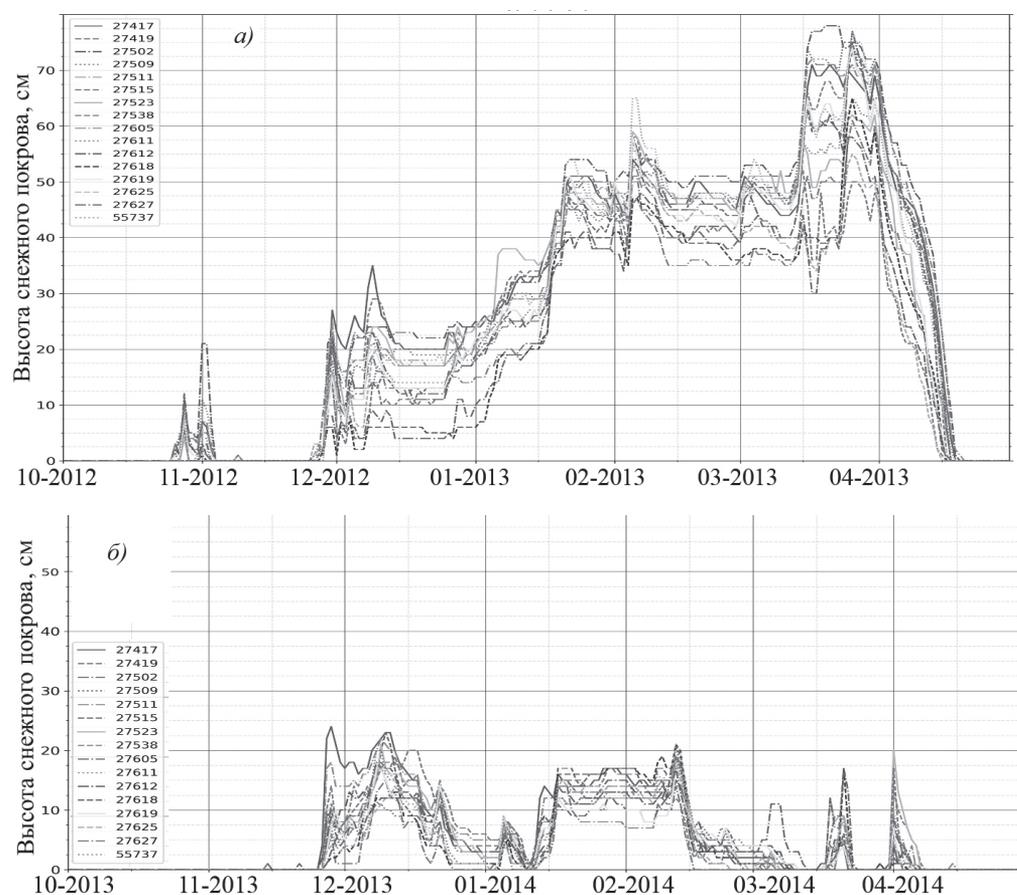


Рис. 2. Накопление снегозапасов за зимний сезон 2012/13 г. (а) и 2013/14 г. (б) по данным метеорологических станций на территории Москвы и Московской области.

Названия станций, соответствующие приведенным номерам, см. табл. 2.

наблюдались вплоть до второй декады января 2014 г. С 17.01.2014 на 27 дней установилась солнечная, морозная погода, осадки в этот период отсутствовали. Затем вновь были зафиксированы положительные значения среднесуточной температуры воздуха. Также малоснежными были зимние сезоны 2006/07 и 2007/08 гг.

В среднем для Москвы и Московской области высота снежного покрова составляет 43 см. Установлено, что максимальная высота снежного покрова за последние девять зимних сезонов (2010—2018 гг.) увеличились в среднем на 3—4 см на всех метеорологических станциях за исключением Коломны, где она, наоборот, уменьшилась на 3,2 см. Снежный покров распределен по территории в Московской области более равномерно, чем в Москве: разность значений высоты снежного покрова для большинства метеорологических станций в области составляет 4 см. Следует отметить, что наибольшая высота снежного покрова зафиксирована на западе Московской области вблизи границы с Владимирской областью. Наименьшая высота снежного покрова зафиксирована в северной части Московской области. Разница между максимальным и минимальным значениями высоты снега на станциях составляет в среднем 8 см. В городской черте снег распределен неравномерно. Наибольшие значения высоты снежного покрова зафиксированы по данным метеорологической обсерватории МГУ (юго-запад Москвы) и станции ВДНХ (северо-восток Москвы). Наименьшее количество снега зафиксировано на западе Москвы. В среднем в Москве высота снежного покрова составляет 44 см, достигая в снежные годы 51 см (табл. 2).

Таблица 2

Максимальные и средние значения высоты снежного покрова (h) за зимние сезоны с 2000 по 2018 г. в Москве и Московской области

Номер станции	Название станции	Зимние сезоны			
		2000/01 — 2008/09 гг.		2009/10 — 2017/18 гг.	
		$h_{\text{макс}}, \text{ см}$	$h_{\text{сред}}, \text{ см}$	$h_{\text{макс}}, \text{ см}$	$h_{\text{сред}}, \text{ см}$
27502	Волоколамск	41,6	13,7	44,4	14,6
27509	Можайск	38,0	11,4	42,7	12,8
27417	Клин	44,1	13,1	44,6	13,9
27511	Ново-Иерусалим	40,3	11,8	41,7	13,0
27611	Наро-Фоминск	39,9	11,6	42,0	13,2
27538	Черусти	49,1	16,2	46,7	14,7
27523	Павловский Посад	45,1	14,0	45,3	14,4
27625	Коломна	45,6	13,7	42,4	12,4
557376	МО МГУ	47,6	13,2	49,9	15,3
27515	Немчиновка	28,5	7,8	47,8	13,9
27619	Тушино	37,0	10,6	46,0	13,8
27612	ВДНХ	47,2	13,7	50,3	14,6
27605	Балчуг	28,0	6,7	42,9	12,3
27419	Дмитров	38,3	11,6	41,3	12,9
27627	Кашира	45,0	11,1	40,2	11,8
27618	Серпухов	34,3	9,5	37,8	10,4

Статистическая оценка пространственной однородности средней высоты снежного покрова (применение t-теста для средних) показала, что на большинстве метеостанций Москвы и области средние значения высоты снежного покрова относительно реперной станции ВДНХ не равны, что связано с неоднородностью выпадения осадков, а также рельефом и застройкой местности. Равенство средних значений высоты снежного покрова было получено для станций ВДНХ, Волоколамск и Павловский Посад (уровень значимости больше 0,05). Наибольшие отличия значений средней высоты снежного покрова от значения на станции ВДНХ наблюдаются на юге и западе Московской области (станции Серпухов, Наро-Фоминск, Можайск, Ново-Иерусалим).

Среднегодовые значения высоты снежного покрова и альbedo поверхности по данным стандартных актинометрических измерений метеорологической обсерватории (МО) МГУ за период 2000—2017 гг. представлены на рис. 3. В последние годы небольшая высота снежного покрова связана в 2016—2017 гг. с положительными аномалиями температуры воздуха, а в 2014—2015 гг. как с положительными аномалиями температуры воздуха, так и с отрицательными аномалиями количества осадков. Межгодовые изменения альbedo поверхности при наличии снежного покрова в Москве (от 52 до 67 %, коэффициент вариации 7 %) в целом соответствуют изменениям высоты снежного покрова (см. рис. 3).

2. Восстановление запаса воды в снежном покрове за период 2000—2018 гг. и оценка полученных значений

Особое внимание было уделено исследованию изменений запаса воды в снежном покрове. Для выполнения поставленной цели использовались данные маршрутных снегомерных наблюдений в Московской области и расчеты с помощью модели SnoWE. Для выполнения текущего исследования использовалась возможность счета модели по станциям; в качестве исходных данных использовались станционные стандартные метеорологические данные. Основной трудностью, с которой пришлось столкнуться при выполнении расчетов за исторический период, является наличие в данных измерений ошибок и неточностей.

В результате были получены ряды восстановленных значений запаса воды в снежном покрове и его плотности для территории Москвы и Московской области за каждый день период с 1 сентября 2000 г. по 1 мая 2018 г. Максимальные значения запаса воды в снежном покрове были зафиксированы в зимний сезон 2012/13 г. (рис. 4), а минимальные — в зимний сезон 2013/14 г.

Для того чтобы оценить точность восстановления параметров снежного покрова, была привлечена информация, полученная на маршрутных снегомерных съемках. На территории Московской области маршрутные снегомерные наблюдения выполняются на 12 метеорологических станциях с дискретностью один раз в 5 или 10 дней. На рис. 5 представлено сравнение данных маршрутных снегомерных наблюдений и восстановленных значений снегозапасов за зимний сезон 2012/13 г. для метеорологической станции Волоколамск.

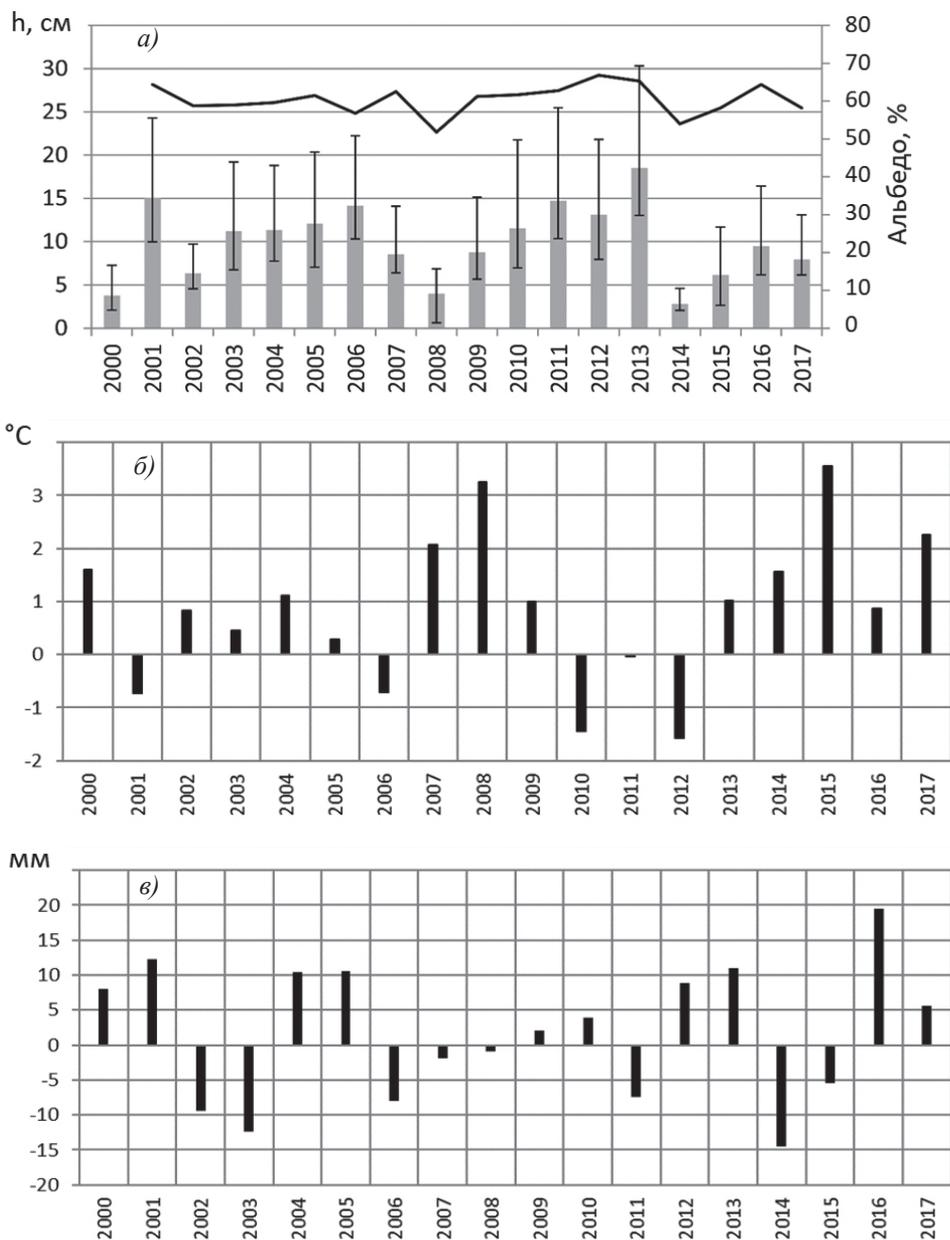


Рис. 3. Средняя высота снежного покрова по данным метеорологических станций Москвы и Московской области (вертикальными отрезками показаны минимальные и максимальные значения высоты снежного покрова) и альbedo поверхности по данным МО МГУ (при наличии снежного покрова) (а), а также аномалии температуры воздуха (б) и количества осадков (в) за холодный период (ноябрь — март) относительно климатической нормы 1981— 2010 гг. по данным МО МГУ.

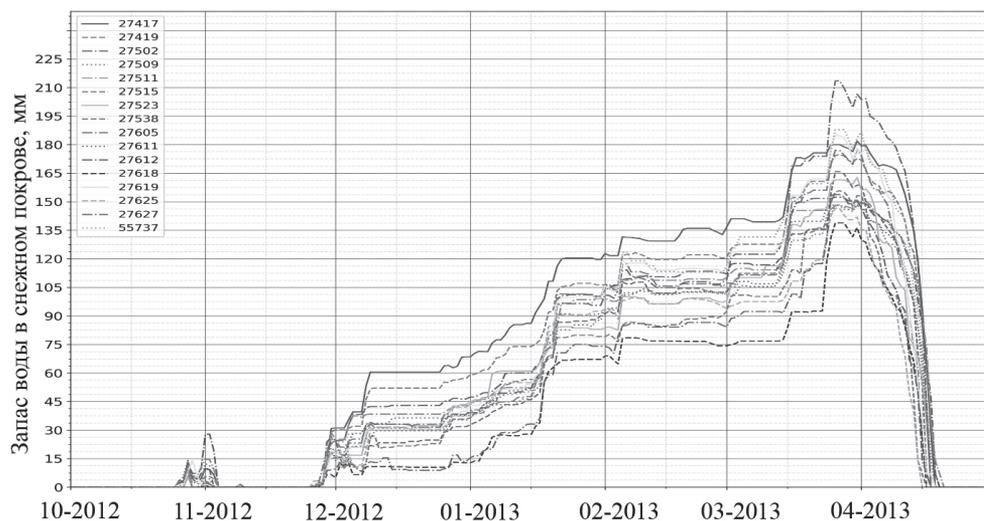


Рис. 4. Распределение запаса воды в снежном покрове на метеорологических станциях в Москве и Московской области за зимний сезон 2012/13 г. по данным модельных расчетов.

Названия станций, соответствующие приведенным номерам, см. табл. 2.

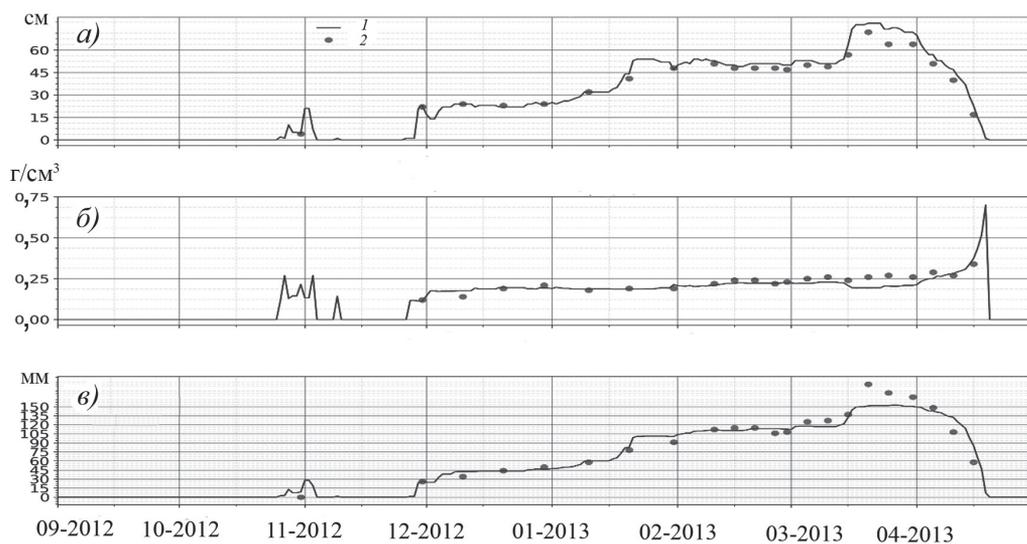


Рис. 5. Сравнение фактических и модельных значений характеристик снежного покрова на ст. Волоколамск.

а — высота снежного покрова (см), *б* — плотность снега ($\text{г}/\text{см}^3$), *в* — запас воды в снеге (мм).
 1 — расчетные значения, 2 — данные маршрутных снегомерных наблюдений.

Из рис. 5 видно, что модель снежного покрова *SnoWE* воспроизводит динамику развития снежного покрова и его характеристик на примере метеорологической станции Волоколамск. Данная метеорологическая станция была выбрана в качестве примера, поскольку за зиму 2012/13 г. на станции было выполнено наибольшее число маршрутных снегомерных наблюдений. Результаты статистического сравнения модельных расчетов и данных измерений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистическая оценка сравнения фактических и восстановленных данных о снежном покрове на территории Москвы и Московской области за период с 2000 по 2017 г.

Номер станции	Название станции	Коэффициент корреляции	СКО	Смещенность	RMSE
<i>Запас воды в снеге, мм</i>					
27417	Клин	0,939	38,8	3,41	14,0
27502	Волоколамск	0,938	36,5	0,43	14,0
27509	Можайск	0,927	34,2	-0,25	13,8
27511	Ново-Иерусалим	0,927	34,7	-8,41	15,9
27515	Немчиновка	0,884	38,1	-7,88	21,2
27523	Павловский Посад	0,922	38,4	-10,5	19,9
27538	Черусти	0,922	39,8	-7,45	18,7
27611	Наро-Фоминск	0,954	37,3	-6,62	14,1
27618	Серпухов	0,959	34,4	-17,6	21,9
27625	Коломна	0,951	33,6	-1,30	11,4
27627	Кашира	0,937	38,6	-8,18	16,6
<i>Плотность снежного покрова, г/см³</i>					
27417	Клин	0,74	0,080	0,039	0,070
27502	Волоколамск	0,60	0,073	0,022	0,069
27509	Можайск	0,70	0,074	-0,001	0,059
27511	Ново-Иерусалим	0,69	0,082	0,024	0,075
27515	Немчиновка	0,65	0,082	-0,022	0,073
27523	Павловский Посад	0,57	0,092	0,031	0,100
27538	Черусти	0,32	0,101	0,051	0,153
27611	Наро-Фоминск	0,62	0,093	0,044	0,099
27618	Серпухов	0,76	0,075	0,011	0,055
27625	Коломна	0,76	0,068	0,001	0,050
27627	Кашира	0,59	0,088	0,008	0,088

Примечание. СКО — средноквадратическое отклонение, RMSE — средноквадратическая ошибка.

В табл. 3 не представлена статистическая оценка изменения высоты снежного покрова, потому что модель снежного покрова *SnoWE* использует измеренную высоту снега на станции в качестве входных данных. Несоответствие модельных и фактических данных свидетельствует о том, что высота снега на маршруте отличается от измеренной на станции, в определенных случаях разность достигает значений 10—15 см. В связи с этим могут проявляться дополнительные ошибки

при расчете плотности или запаса воды по модели, вызванные несоответствиями с измеренными характеристиками.

Таким образом, модель снежного покрова SnoWE хорошо воспроизводит динамику развития снежного покрова и его характеристик: коэффициент корреляции с данными наблюдений для запаса воды в снеге достигает 0,96 (минимум 0,88); коэффициент корреляции с данными наблюдений для плотности достигает 0,76 (минимум 0,32). Модель снежного покрова незначительно занижает значения восстановленного запаса воды и завышает значения восстановленной плотности. Завышение плотности в основном происходит в весенний период времени, когда снег начинает активно таять. Занижение водного эквивалента снежного покрова происходит в связи с недоучетом ветровой составляющей и приносом снега извне. В дальнейшем планируется увеличить мерность модели и улучшить учет ветрового переноса.

3. Оценки альbedo снежного покрова по спутниковым данным на территории Московского региона

Для оценки пространственного распределения альbedo снега на территории Московского региона использовались спутниковые данные коллекции MOD10A1, спутник *Terra*, 2000—2017 гг. Для метеорологических станций были выбраны спутниковые пиксели, ближайšie к координатам метеорологических площадок, для которых нормализованный дифференцированный снежный индекс был больше 0,4. Кроме того, были отобраны только те данные, которые обладали самым высоким качеством (табл. 4).

Таблица 4

Альbedo снега и индекс NDSI по спутниковым данным за 2000—2017 гг. для пикселей, ближайших к наземным станциям

Станция	φ° с.ш.	λ° в.д.	Альbedo снега, %	NDSI	Число наблюдений
МО МГУ	55,7069	37,5219	25	54	220
ВДНХ	55,8314	37,6221	36	55	242
Волоколамск	56,0127	35,9331	46	61	531
Можайск	55,5180	36,0126	62	67	298
Ново-Иерусалим	55,9100	36,8413	64	67	287
Павловский Посад	55,7716	38,6927	38	53	326
Черусти	55,5473	39,9978	71	73	369
Балчуг	55,7454	37,6300	47	59	331
Тушино	55,8783	37,4368	34	55	292
Кашира	54,8230	38,1540	63	68	294

Примечание. NDSI — нормализованный дифференцированный индекс.

Наименьшее значение альbedo характерно для пикселя, наиболее близко расположенного к станции МО МГУ, наибольшее — для станции Черусти. Более высокое альbedo снега отмечается в городской черте на станциях Балчуг и ВДНХ,

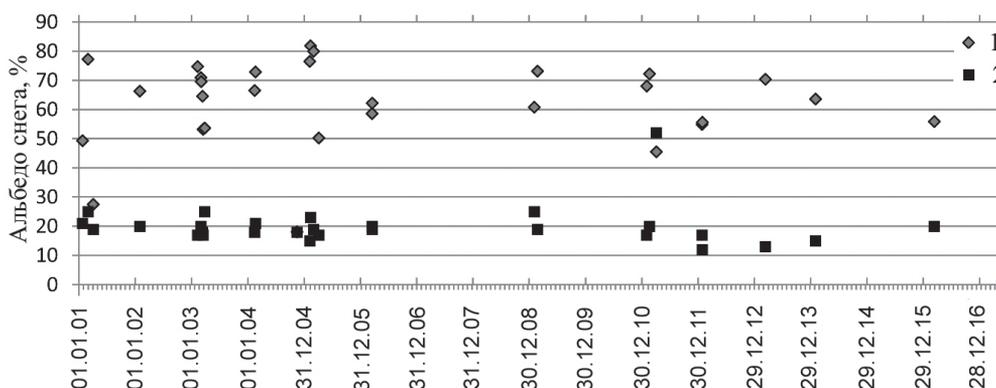


Рис. 6. Альbedo снега по данным актинометрических измерений (1) и спутниковым данным (2) коллекции MOD10A1 для МО МГУ.

вероятно, в связи с влиянием расположенных близко к выбранным пикселям Водоотводного канала и Латвийского сквера.

Сравнение спутниковых и наземных данных показало, что восстановленные спутниковые данные об альbedo снежного покрова значительно отличаются от результатов точечных наземных измерений. Спутниковые данные существенно занижены по сравнению со стандартными актинометрическими данными, поскольку последние представляют собой точечные измерения, а спутниковые данные — эффективное альbedo поверхности. Среднее значение альbedo снега по данным наблюдений в полученной выборке составляет 62 % (стандартное отклонение 15 %), а по спутниковым данным — 20 % (стандартное отклонение 7 %). Согласие между спутниковыми и наземными данными улучшается при увеличении значений индекса NDSI (чем выше значение индекса NDSI, тем большая площадь спутникового пикселя занята снежным покровом). В частности, 4 апреля 2011 г. при индексе NDSI, равном 85, альbedo по данным наблюдений составляет 46 %, а по спутниковым данным — 52 % (рис. 6).

Выводы

В ходе проделанной работы установлено, что в Московской области снежный покров лежит на 2—3 недели дольше, чем в Москве. В области снежный покров выпадает раньше и устойчивый снежный покров формируется быстрее. Данное явление связано с более высокой приземной температурой воздуха в городе и влиянием городской застройки на формирования снежного покрова. Также установлено, что значения максимальной высоты снежного покрова за последние девять зимних сезонов (2010—2018 гг.) увеличились в среднем на 3—4 см на всех метеорологических станциях за исключением станции Коломна, где высота снежного покрова, наоборот, уменьшилась на 3,2 см. Снежный покров распределен

в Московской области более равномерно, чем в Москве. Снег в Москве весной тает на несколько дней быстрее, чем в Московской области.

В ходе работы было выполнено усовершенствование модели снежного покрова SnoWE. Разработана «архивная» версия счета модели. На основании архивной версии модели выполнено восстановление характеристик снежного покрова для территории Москвы и Московской области за период с 2000 по 2018 г. Модель снежного покрова SnoWE воспроизводит динамику развития снежного покрова и его характеристик: коэффициент корреляции с данными наблюдений для запаса воды в снеге достигает 0,96 (минимум 0,88); коэффициент корреляции с данными наблюдений для плотности снега достигает 0,76 (минимум 0,32). Наибольшие различия восстановленных значений запасов воды в снеге с данными маршрутных снегосъемок наблюдаются в случае различия высоты снежного покрова на маршруте и на станции.

Значения запаса воды в снеге, восстановленного с помощью модели SnoWE, занижены (максимальное занижение 17 мм). Для восстановленной плотности снега характерны завышенные значения (максимальное завышение 0,051 г/см³). Наибольшие ошибки восстановления запаса воды снежного покрова выявлены в период весеннего таяния снежного покрова.

Межгодовые изменения альbedo поверхности при наличии снежного покрова в Москве составляют от 52 до 67 %, коэффициент вариации равен 7 % за период 2001—2017 гг. Спутниковые данные MODIS (коллекция MOD10A1) об альbedo снежного покрова существенно занижены по сравнению со стандартными актинометрическими данными. В случае если наблюдается однородное покрытие спутникового пикселя снегом, то значения альbedo по спутниковым данным сравнимы с данными наземных точечных измерений для Москвы.

За предоставление данных и консультацию по работе с системой прогноза COSMO-Ru авторы выражают благодарность Г.С. Ривину и Д.В. Блинову.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18—35—00498 мол_а (результаты — раздел 1), РФФИ № 17—11—01254 (результаты — раздел 2), РФФИ № 17—77—10132 (результаты — раздел 3).

Список литературы

1. Блинов Д.В., Ривин Г.С. Система краткосрочного негидрастатического прогноза погоды COSMO-Ru: Технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142—162.
2. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Модель для расчёта характеристик снежного покрова на основе данных наблюдений стандартной метеорологической сети // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 352. С. 85—102.
3. Китаев Л.М., Кислов А.В. Региональные различия снегонакопления — современные и будущие изменения (на примере Северной Европы и севера Западной Сибири) // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 2. С. 98—104.
4. Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б., Сократов С.А. Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетрометра SnowMicroPen // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 4. С. 473—485.
5. Кренке А.Н., Разуваев В.Н., Китаев Л.М., Мартуганов Р.А., Шакирзянов Р.И. Снежность на территории СНГ и его регионов в условиях глобального потепления // Криосфера Земли. 2000. Т. IV, № 4. С. 97—106.

6. Локощенко М.А. Снежный покров и его современные изменения в Москве // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 71—82.
7. Носенко О.А., Долгих Н.А., Носенко Г.А. Снежный покров центра европейской части России по данным AMSR-E и SSM/I // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3, №. 1. С. 296—300.
8. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Раритет-Пермь, 2014. 296 с.
9. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // Лёд и Снег. 2015. Т. 54, №. 4. С. 72—80.
10. Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Кутаев Л.М. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 73—86.
11. Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56, №. 3. С. 369—380.
12. Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. Вып. 2 (368). С. 120—143.
13. Aoki T., Hachikubo A., Hori M. Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos // J. Geophys. Res. 2003. 108 (D19). 4616. doi:10.1029/2003JD003506.
14. Klein A.G., Stroeve J. Development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS instrument // Ann. Glaciol. 2002. V. 34. P. 45—52.
15. Stroeve J.C., Box J.E., Haran T. Evaluation of the MODIS (MOD10A1) daily snow albedo product over the Greenland ice sheet // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 105, No. 2. P. 155—171.

ГЕОДИНАМИКА КАК ОДНА ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ

Е.М. Шумакова

Институт водных проблем РАН, spectr56@gmail.com

Анализируются температурные и геофизические аномалии, наблюдаемые вблизи плотины одной из волжских ГЭС и в бассейне Волги. Изучается связь расположения участков повышенной скорости увеличения зимней температуры воздуха с локализацией крупных разломов, районов современной геодинамической и сейсмической активности на территории Русской платформы. Рассматривается гипотеза о связи повышения зимней температуры с геодинамической активностью территорий. Рассматриваются также закономерности формирования тепловых аномалий в сейсмически активных районах при участии радона; предложено применение данных закономерностей в разломных зонах с меньшей геодинамической активностью.

Ключевые слова: температурная аномалия, геодинамическая активность, разлом, геофизические аномалии, атмосферные предвестники землетрясений, радон.

GEODYNAMICS AS ONE OF THE REASONS FOR THE INCREASE IN WINTER AIR TEMPERATURE IN THE VOLGA RIVER BASIN

E.M. Shumakova

Water Problems Institute of RAS

The paper analyzes temperature and geophysical anomalies observed near one of the Volga River hydropower plants and in the whole Volga basin. We studied the correlation of places of increased growth rate of winter temperatures with places of deep faults, places of modern geodynamic or seismic activity on the territory of the Russian platform. The hypothesis that the growth of winter air temperatures is connected with region geodynamics is discussed; regularities of temperature anomalies formation in seismic active areas involving radon are considered; application of these regularities in fault zones with low geodynamic activity is offered.

Keywords: temperature anomaly, geodynamic activity, fault, geophysical anomalies, atmospheric earthquake predictor, radon.

Введение

Планетарные процессы, по-видимому, более значимы для проявлений различных геофизических полей, чем это представляется в начале узкоспециализированных исследований. Исследователи различных направлений приходят к пониманию и обоснованию единства геофизической среды, взаимосвязи процессов во всех оболочках Земли, экспериментальному обоснованию корреляций и созданию теоретических и модельных основ. Существуют многочисленные примеры взаимодействия процессов в земной коре и в атмосфере, которые относятся в основном к экстремальным событиям. Аномалии и закономерности проявления атмосферных процессов в геодинамически активных районах часто пытаются

использовать в качестве возможных предвестников землетрясений, так как проблема прогноза сильных землетрясений актуальна и не решена окончательно. Вероятно, наиболее известно явление формирования линейных облачных аномалий (ЛОА) или грозовых облаков, трассирующих разломы в период их активности.

Создана методология анализа влияния изменчивости атмосферной циркуляции атмосферы на экзогенные процессы земной коры и сейсмичность Земли [2, 3], связывающая возникновение сильных землетрясений с изменчивостью атмосферных процессов, которые влияют на экзогенные процессы и сейсмичность, процессы в земной коре.

С 1979 г. разрабатываются направления, позволяющие определить влияние сейсмических процессов на явления в атмосфере — на формирование ЛОА [9], грозовую активность. Встречается информация о связи возникновения смерчей, торнадо с моментами активности разломов [28], приуроченности траекторий движения атмосферных вихрей к разломным зонам различного ранга [29]. Разнообразные процессы в ионосфере и магнитосфере коррелируются с моментами геодинамической активности.

Результаты, изложенные в настоящей статье, получены в ходе выполнения различных, не связанных между собой исследований. Первое из них проводилось в районе Жигулевской ГЭС — изучалось вибрационное воздействие крупного работающего гидроузла на окружающие территории [16—18]). Целью этого исследования была разработка комплексного мониторинга территории и обеспечения безаварийной эксплуатации зданий и комфортного проживания населения вблизи плотины. Тема эта весьма далека от метеорологии и климатологии. Однако в ходе исследования постоянно выяснялись факты, говорящие о формировании сложной незамкнутой природно-техногенной системы плотина — окружающая среда, в которой вибрации грунтов (геофизические процессы в поверхностных слоях грунта) лишь играют роль индикатора состояния геологической среды, роль ключевого компонента, изменения которого отражают трансформации в системе. Далеко не все компоненты системы известны и не все связи между ними изучены теоретически и/или экспериментально, а происходящие трансформации не сразу можно сформулировать. Изначально на роль главного фактора, определяющего все процессы в системе, предназначалось работающее гидросооружение. На практике постепенно выясняется, что существенное, иногда определяющее влияние оказывает геологическое строение территории, ее геодинамика.

Корреляции геофизических полей, в том числе атмосферных, ионосферных и др., в качестве возможных предвестников землетрясений лучше изучены для сейсмоактивных районов.

Другое дело территории, которые считаются или считались до недавнего времени асейсмичными, например расположенные на наиболее устойчивых участках земной коры, плитах и платформах.

Постепенно выясняется, что и на платформенных территориях влияние процессов в разломных зонах на различные геолого-геофизические процессы существенно и многообразно. Известны примеры, когда в результате активизации процессов в неактивных, казалось бы, разломах происходили аварии на

гидротехнических сооружениях — в Калифорнии (США), в Индии [31]. Плотины предположительно в некоторых случаях могут играть роль провоцирующего фактора, приводящего к активизации геодинамических процессов. Во время Нефтегорского землетрясения с магнитудой 7,6 и интенсивностью 9 баллов в эпицентре (1995 г.) разлом, не учтенный при строительстве, вышел на дневную поверхность [14]. Катастрофы, возможно, не произошло бы, если бы объекты не располагались непосредственно на разломе. Чернобыльская АЭС стоит на пересечении нескольких разломов, и по одной из версий, впрочем, оспариваемой, аварии предшествовали толчки с небольшой магнитудой [28].

В центре Русской платформы, на Средней Волге, в районе Жигулевской ГЭС, проявление многих геофизических процессов с большой степенью вероятности связано с процессами в системе Волжских разломов и определяется геологией и современной геодинамикой территории.

Изучение вибрационного воздействия работающего гидроузла на грунты, здания и сооружения прилегающей к плотине территории показало, что невозможно результаты работ интерпретировать без учета геологии и геодинамики территории. Да, возникают упругие волны, переносящие энергию падающей воды в глубь территории, при работе водопропускных сооружений плотины ГЭС. Однако особенности распространения упругих волн — дальность и, соответственно, интенсивность возникающих в грунтах вибраций, анизотропность, когда в отдельных направлениях вибрации грунта можно зафиксировать на расстоянии порядка 15 км, — определяются особенностями геологического строения.

Установлено, что и некоторые процессы в атмосфере в районе Жигулевской ГЭС происходят не так, как на смежных территориях Самарской области, и наиболее вероятная причина аномалий — Жигулевский разлом и происходящие в нем процессы.

Интерес к Жигулевскому разлому, в наиболее амплитудной части которого оказалась построена плотина Жигулевской ГЭС, возник после серии землетрясений в конце 2000 г. За время существования плотин и водохранилищ на Волге такое событие произошло впервые. И хотя оно не вышло за пределы исторически установленной оценки сейсмичности района, в связи с урбанизацией территории возрос геодинамический риск, а плотина Жигулевской ГЭС с крупнейшим в Европе водохранилищем в случае аварии ставит под угрозу все нижележащие территории, включая атомный объект — Балаковскую АЭС.

На Средней Волге проводился большой объем исследовательской работы при поиске и добыче нефти. Поэтому после землетрясения удалось быстро собрать информацию и рассмотреть ее под иным углом — с точки зрения оценки современной геодинамической активности территории.

Выяснилось, что русло Волги в среднем течении приурочено к системе глубинных меридиональных разломов, идущих от Камы до Азова. Эти разломы могут как проводить энергию удаленных сильных землетрясений, так и реагировать на них местными событиями [10, 18]. Регион находится под воздействием сжимающих напряжений, возникающих при давлении на Русскую платформу соседних структурных единиц земной коры. Напряжения активно реализуются

по Жигулевскому разлому. В результате этого в районе Жигулевской ГЭС правый и левый берег Волги (они же крылья разлома) двигаются навстречу друг другу, причем левый берег опускается со скоростью несколько миллиметров в год, а правый подымается. Уже сейчас сдвиг геологических пластов левого и правого берега Волги составляет приблизительно 1 км. Именно на этом участке поставили плотину. Сильно разрушенные известняки волжских берегов, карсты — все затрудняло строительство. Вышли из положения следующим образом — бетонное здание ГЭС сместили в устье правобережного оврага, где известняки перекрыты мощным слоем глин. Земляная дамба и бетонная водосливная плотина поставлены на левом берегу, где опущенное северное крыло разлома перекрыто рыхлыми породами мощностью почти 700 м.

Общее напряженно-деформированное состояние среды в условиях встречного движения крыльев Жигулевского разлома и напряжения сжатия являются наиболее вероятной причиной увеличения дальности распространения упругих волн, возникающих при попусках через плотину и вызывающих вибрации грунтов. Рост интенсивности вибраций грунтов с течением времени при прочих равных условиях — явление, крайне затрудняющее прогноз ситуации и планирование мероприятий на плотине и на территории, — также можно объяснить геодинамической напряженностью среды [11].

Оказалось, невозможно описать даже техногенный процесс вибрационного воздействия работающего гидроузла на окружающие территории с функциональной зависимостью интенсивности вибраций V_z от значений расхода воды через плотину Q при попусках (коэффициент корреляции V_z/Q $r \geq 0,9$) без учета геологии.

Влияние Жигулевского разлома выходит за пределы земной коры. В 2006 г. Н.Е. Тишкин, директор Тольяттинской гидрометеорологической обсерватории (Volga UGMS), отметил более интенсивное повышение средней температуры воздуха в Тольятти за период 1952—2006 гг. по сравнению с Самарской областью в целом (3 °С против 2 °С по области) и высказал предположение, что это связано с близостью Жигулевского разлома и его влиянием [16, 17]. Основные закономерности «глобального потепления» присутствовали — направленное изменение зимней температуры воздуха после 1979—1980 гг. В летний период изменения тоже наблюдались, и заключались они в увеличении разброса характеристик температуры, изменении режима выпадения осадков в сторону редких сильных ливней без изменения суммарного количества осадков.

Фактически было установлено еще одно геофизическое поле — атмосферное, поле приземной температуры воздуха, характеристики которого различаются вблизи разлома и на смежных территориях, удаленных от разлома. Эта гипотеза была устно представлена в 2007 г. в рамках Российско-британского семинара «Изменения климата и возможные последствия для экосистемы Волжского бассейна», проходившего в Тольятти в ИЭВБ РАН 14—15 февраля 2007 г. Механизм возможной передачи энергии не анализировался: гипотеза выдвигалась на основе территориального совпадения расположения метеостанции и разлома. Позднее В.Н. Яковлевым (Волжское отделение Института геологии и разработки горючих

ископаемых, г. Самара) [16] устно в рамках круглого стола высказывалось предположение о том, что разуплотнение пород в разломной зоне может облегчить транспорт эндогенного тепла к поверхности из области тепловой аномалии и геодинамические процессы могут быть причиной потепления. Работы в области анализа поля температуры воздуха не получили продолжения и использовались без доказательств в качестве еще одного примера проявления влияния разлома.

Интересно, что над Жигулевским разломом также отмечено образование ЛОА [16]. Рекогносцировочные работы в 2004—2005 гг. выполнялись вскоре после землетрясения по заказу МЧС и показали перспективность исследований. На тот момент изучение формирования ЛОА над разломами земной коры в моменты их активности по данным дистанционного зондирования Земли со спутников проводилось в основном для сейсмически активных территорий. Оказалось, что Жигулевский разлом также трассируется ЛОА, однако работы не получили продолжения.

В 2015 г. выяснилось, что при изучении зимнего минимального стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата выявлена долгосрочная локальная тепловая аномалия в районе Жигулевской ГЭС — Самары.

Для оценки минимального зимнего стока по данным 88 метеостанций бассейна Волги и смежных территорий анализировалось изменение зимней температуры воздуха за 1960—2010 гг. На фоне основных закономерностей — активного повышения температуры воздуха после 1979—1980 гг., убывания абсолютного и относительного повышения температуры с запада на восток на территории бассейна Волги — наблюдались неоднородности, которые при оценке стока не стали объектом внимания [4].

Сопоставление данных об аномалиях геофизических полей в районе Жигулевской ГЭС, в том числе о более быстром повышении температуры воздуха в приземном слое по данным стандартных метеорологических наблюдений, наличии аномалий повышения зимней температуры воздуха в бассейне Волги в целом и территориальном соответствии одной из аномалий территории Самарской области, послужило толчком к исследованию, результаты которого приводятся в настоящей статье.

Задача исследования заключалась в проверке корреляции расположения участков повышенной скорости увеличения зимней температуры воздуха в бассейне Волги с локализацией разломов и участков современной геодинамической активности, а также оценке геологических условий территории температурных аномалий и возможности их возникновения под влиянием геодинамических процессов.

Методика исследования

Для анализа климатических изменений на территории бассейна Волги использовались данные из архива ВНИИГМИ — МЦД (www.meteo.ru).

Использовались данные о приращении средней температуры воздуха за зимний сезон (с декабря по март) за 1980—2010 гг. и тренды за весь период наблюдений. Оценивалась статистическая значимость полученных результатов [1].

Анализ возможных причин более интенсивных климатических изменений в районе метеостанции Тольятти и в бассейне Волги проводился путем выявления действующих геолого-геофизических факторов в районе Тольятти и Средней Волги и сопоставления карты коэффициентов линейного тренда воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) и карты приращений зимней температуры за период с 1980 по 2010 г. с картами тектонических нарушений на территории Тольятти, Самарской Луки, Средней Волги, Московской области, схемой сейсмического районирования Восточно-Европейской платформы, информацией о геохимических и иных признаках геодинамической активности территорий, полученных из открытых источников — научных публикаций, отчетов, электронных источников.

Рассматривались по литературным источникам условия и механизмы формирования тепловых аномалий, приуроченных к разломным зонам в сейсмически активных районах: локализация по вертикали в приземном слое и в более высоких слоях атмосферы; амплитудно-временные характеристики. Проводилась оценка возможности применения результатов исследования связи геодинамики и процессов в атмосфере при прогнозе сильных землетрясений применительно к долгосрочным процессам, таким как многолетние направленные изменения температуры, являющиеся объектом рассмотрения в настоящей статье. Обосновывалась возможность связи геодинамики и аномальных изменений температуры в бассейне Волги.

Результаты исследований

Несмотря на то что площадь бассейна Волги не особенно велика, для отдельных участков выявлены существенные с точки зрения климатологии различия в темпах повышения температуры воздуха. По результатам расчетов коэффициента линейного тренда k зимней температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) по данным 88 метеостанций за период 1960—2010 гг. выделяются два основных периода. Второй период начинается после 1980 г. и характеризуется направленным повышением зимней температуры воздуха. На фоне общего повышения выделяются локальные территориальные максимумы k , свидетельствующие о повышенной скорости изменения температуры воздуха. Абсолютный прирост температуры воздуха показывает те же аномалии [4]. Наиболее интенсивное повышение зимней температуры воздуха наблюдается в районе Казани и Коломны (коэффициент k равен 0,71 и 0,74 $^{\circ}\text{C}/10$ лет соответственно). Кроме того, выделяется район Саратова — Самары, где на фоне общего уменьшения прироста температуры воздуха к юго-востоку бассейна k несколько выше, чем на прилегающих участках. В абсолютном выражении повышение средней зимней температуры воздуха составило 1,8 $^{\circ}\text{C}$ в районе Казани и Коломны, 1,7 $^{\circ}\text{C}$ в районе Самары — Саратова. Существуют и другие участки температурных аномалий на границе бассейна Волги, которые в ходе данного исследования детально не изучались. Характеристики температуры воздуха за период активного потепления (с 1979 г.) и за весь период исследований (с 1960 г.) показывают общие территориальные закономерности.

Сопоставим локализацию температурных аномалий с данными о разломах земной коры, собранных из различных источников, не всегда равноценных.

Как уже говорилось, Средняя Волга довольно хорошо обеспечена геологической информацией в связи с нефтедобычей. Кроме того, крупные города Поволжья, столкнувшись с различными геологическими проблемами, в основном провели картирование своих территорий различными способами и нанесли основные, а иногда и мельчайшие тектонические разрывные нарушения и/или их проекцию на дневную поверхность.

Детальное изучение геологии проведено для трех участков: район Самара — Саратов и район Казани расположены в среднем течении Волги, район Коломны — у слияния притоков Волги — рек Москвы и Оки.

В районе Казани попарно пересекаются три разлома мантийного заложения (рис. 1 а), одни из них Азово-Камский, южное крыло которого пересекает Самарскую область [10, 18]. Процессы в одном из разломов на рубеже XIX — XX веков вызвали серию ощутимых землетрясений. При более детальном картировании на территории Казани инструментально выделено 20 разрывных нарушений различного ранга, считающихся активными, вызывающих в том числе развитие карстовых процессов [8].

Самарскую область пересекают четыре современно активных разлома мантийного заложения, один из них Жигулевский [18]. Для одного из районов Самарской области — района Самарской Луки — детализированная карта, составленная

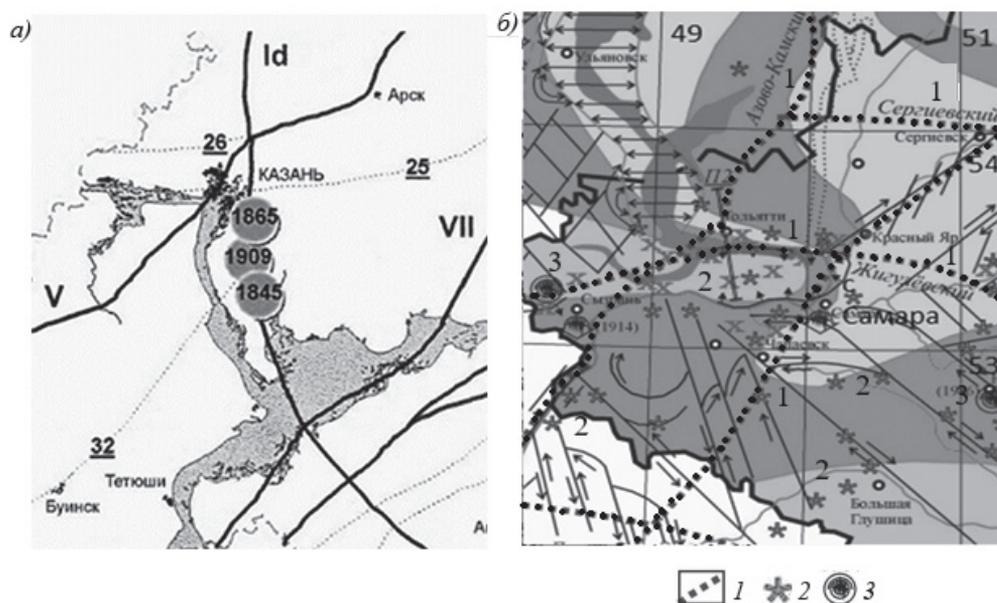


Рис. 1. Фрагменты схем расположения разломов земной коры.

а) в районе Казани: Id, V, VII — разломы мантийного заложения; 25, 26, 32 — региональные разломы; серыми кружками с цифрами указаны положение и год землетрясений в XIX—XX веках; б) в районе Самары [18]: 1 — разломы мантийного заложения; 2 — землетрясения силой до 4 баллов, 3 — землетрясения силой более 4 баллов.

после землетрясений 2000 г., показывает наличие многочисленных разломов более низкого ранга, локализацию современных (слабых) сейсмических событий и др. (рис. 1 б) [18].

В Саратовской области наблюдается сочленение нескольких крупных геоструктур Восточно-Европейской платформы, осложненных системой Волжских разломов; там происходят новейшие вертикальные и горизонтальные движения земной коры [10] преимущественно по Волжскому разлому в полосе шириной приблизительно 100 км, вытянутой вдоль Волги. Ряд признаков указывает на активность разлома в новейшее время. Существует вероятность возникновения землетрясений магнитудой до 6 и интенсивностью до 8 баллов.

Коломна расположена у слияния рек Москвы и Оки, что уже говорит о наличии тектонически ослабленных структур. Геодинамическая активность этой территории максимальна в Московской области и оценивается в 4 балла [29]. По данным ИФЗ им. Шмидта, в районе Коломны пересекаются три разлома второго ранга (рис. 2). Отдельные фрагменты (южные) этих разломов в районе Коломны обозначены как современно активные, наблюдаются различные признаки современной активности в виде дегазации из недр Земли и др. [29, 30].

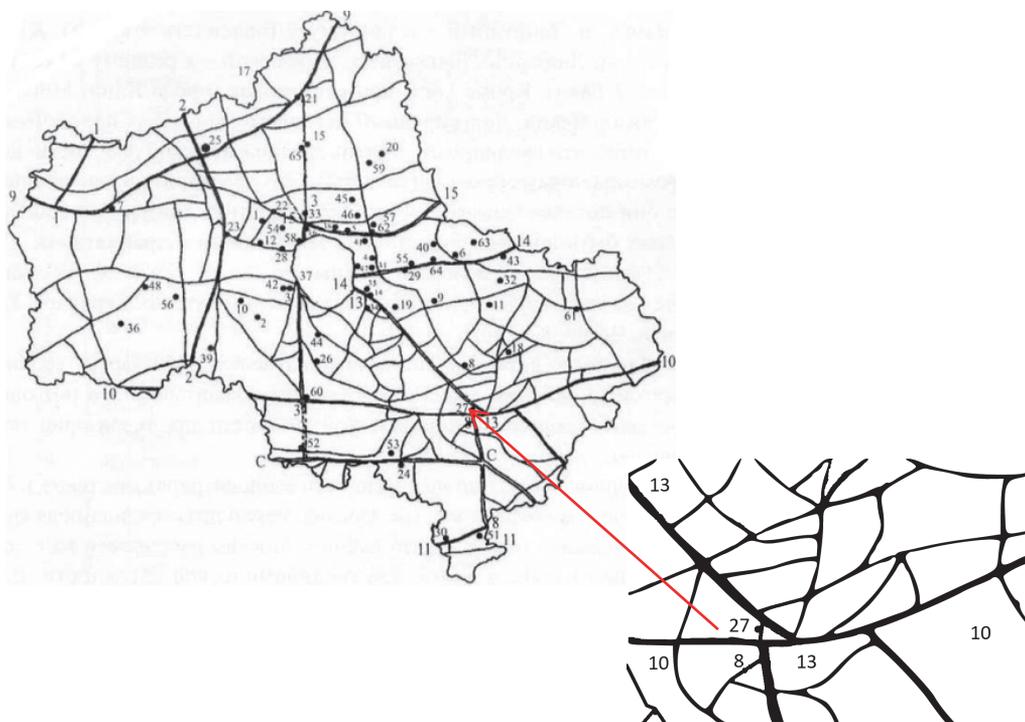


Рис. 2. Карта геодинамического районирования Московской области с увеличенным фрагментом, соответствующим району Коломны [29].

8 — разлом; 10 — разлом, опасность 4 балла; 13 — разлом, опасность 1 балл; 27 — Коломна.

Сопоставление карты трендов зимней температуры воздуха с тектоническими картами европейской части России (материалы ВО ИГ и РГИ, г. Самара) показывает совпадение локализации современно активных в геодинамическом отношении территорий Восточно-Европейской платформы в пределах бассейна Волги и территорий, где климатические изменения происходят более интенсивно (рис. 3).

Все три участка аномального повышения зимней температуры воздуха в бассейне Волги приурочены к зонам крупных разломов, показывающих признаки современной геодинамической активности.

Район Жигулевской ГЭС оказался не самым активным в геодинамическом отношении. Наиболее сильно современная геодинамика проявляется в Республике Татарстан (район Казани). В меньшей степени деформации осуществляются в Ульяновской, Самарской, Оренбургской, Саратовской областях [10, 18].

Гипотеза о приуроченности участков более интенсивных изменений температуры воздуха в бассейне Волги к зонам геодинамической активности находит территориальное подтверждение.

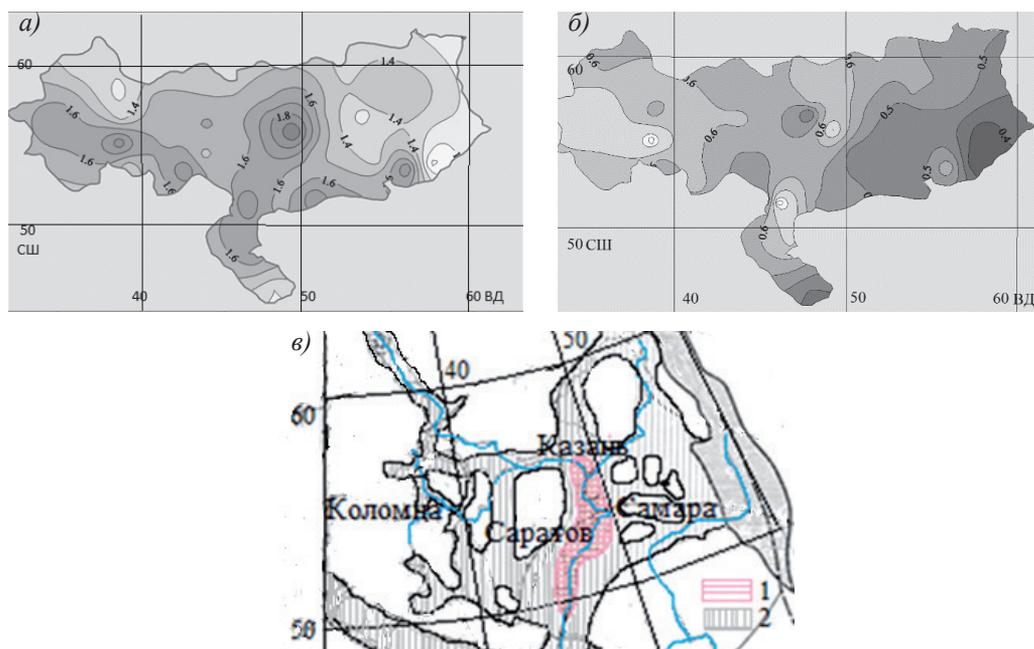


Рис. 3. Приращение средней температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за зимние месяцы за период с 1979 по 2010 г. (а) [4]; коэффициент линейного тренда зимней (декабрь — март) температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за период с 1960 по 2010 г. (б) [4]; фрагмент схемы сейсмического районирования Восточно-Европейской платформы (в).

Рис. в: 1 — районы вероятных интенсивных землетрясений,
2 — районы возможных землетрясений.

Для полноты исследований оценим иные причины, которые могли бы привести к повышению температуры воздуха на метеорологической станции. Антропогенная составляющая в данном случае маловероятна. В Саратове, Самаре, Казани и тем более Тольятти не наблюдалось стремительного роста численности населения или увеличения промышленного производства после 1980 г., реализовывались программы энергоресурсосбережения. Данные по Самарской области брались при исследованиях зимнего стока по метеостанции Безенчук, расположенной в ПГТ.

Циркуляционные процессы в силу масштабов маловероятны в качестве основной причины локальных территориальных аномалий повышения температуры воздуха. Однако планируется для полноты исследований в дальнейшем проследить изменение траекторий движения циклонов на Средней Волге после 1980 г., а также проанализировать динамику изменения почвенных температур.

Если обратиться к особенностям атмосферных процессов в зонах высокой сейсмической активности, то оказывается, что тепловые аномалии, сопровождающие сильные землетрясения, уже анализировались по данным наземных наблюдений. В работе Милькиса [7] утверждалось, что, когда случилось землетрясение, средняя за сезон или среднемесячная температура была выше, чем среднее многолетнее значение для данного региона. Интерес к воздушным тепловым аномалиям в качестве возможного предвестника землетрясений вновь проявился в связи с совершенствованием их дистанционного обнаружения. Показано, что перед коровыми землетрясениями с магнитудой $M > 4,5$ вдоль разломов наблюдаются положительные аномалии ИК-излучения [5, 15]. Затем тепловые аномалии были обнаружены также в вариациях температуры атмосферы по данным метеорологических станций в течение несколько недель до сильных землетрясений в Мексике в период с 1973 по 2003 г. [20], в вариациях температуры воздуха и дебита воды в скважинах [27].

На примере землетрясения в Мексике в 2003 г., когда был проведен корреляционный анализ результатов мониторинга всех контролируемых в регионе геофизических полей, корректно показано, что перед землетрясением наблюдаются мощные тепловые эффекты, приводящие к изменению температуры и влажности воздуха на больших территориях [24].

Несмотря на изучение возможности использования тепловых аномалий в качестве предвестников землетрясения при краткосрочном прогнозе, исследования в основном носят ретроспективный характер, а исследователи предпочитают говорить об исследовании, мониторинге районов возможных землетрясений, о геологическом и геофизическом картировании.

При наличии корреляции между повышением температуры приземного слоя воздуха и периодами геодинамической активности разломов оставался непонятен механизм передачи тепловой энергии воздуху.

В настоящее время установлен механизм повышения температуры воздуха в зоне разломов, который позднее был экспериментально подтвержден в лабораторных экспериментах с радоном, инжектируемым в камеру с воздухом [22].

Выделение тепла происходит непосредственно в атмосфере в виде скрытой теплоты испарения, а центрами конденсации для влаги становятся ионы, образующиеся в результате ионизации атмосферных газов радоном, выделяемым из земной коры перед землетрясением [24].

Вынос на поверхность радона запускает целую цепь процессов в атмосфере. Механизм формирования ЛОА долгое время не был точно известен, хотя для картирования разломов в геологии метод начали применять приблизительно сто лет назад. Сейчас показано, что ЛОА возникают в верхних слоях атмосферы также в результате ионизации после целого ряда иных атмосферных аномалий, одна из которых — повышение температуры приземного слоя воздуха.

Максимальная концентрация радона наблюдается точно над разломом. Тепловые аномалии у поверхности Земли точно повторяют конфигурацию разломов [23]. По оценкам, разность значений температуры воздуха над разломом и вне разломной зоны составляет 2—5 °С.

Эманации радона объясняют линейную структуру тепловых и облачных аномалий в областях подготовки землетрясений [19].

Наиболее высока вероятность обнаружения тепловой аномалии в течение пяти суток накануне крупных землетрясений [13].

В процессе перемешивания атмосферы происходит увеличение пространственного масштаба аномалии [21], тепловое пятно может охватывать территории в сотни тысяч квадратных километров.

Даже незначительное увеличение концентрации радона за счет высокой энергетической эффективности процесса ионизации приводит к регистрируемому изменению параметров атмосферы [26].

Процесс выделения тепла при конденсации воды на ионизированных молекулах в открытой системе земная кора — атмосфера бесконечен, так как предыдущее испарение воды происходит за счет неисчерпаемой солнечной энергии [12]

Все регистрируемые в атмосфере — ионосфере — магнитосфере аномалии можно объединить в рамках комплексной модели [11, 12, 25], разработанной для прогноза сильных землетрясений. Основным отличием модели является ее междисциплинарный характер. Процессы, описываемые в модели, развиваются в различных геофизических оболочках, начиная от земной коры.

Однако авторы работы [12] говорят об универсальности модели и возможности применения ее в геофизике в широком смысле — там, где существуют источники ионизации, запускающие все механизмы в атмосфере.

Возможно, в Поволжье, в зоне Волжских разломов и Жигулевского разлома, по аналогии с районами высокой сейсмической активности проявляются тепловые процессы в атмосфере; связь атмосферных и геодинамических процессов, проявляется не только в районах с высокой сейсмичностью, но и в районах тектонических нарушений с более слабой геодинамикой.

Действительно, механизм формирования атмосферных аномалий запускается при эманации радона из земной коры. В Поволжье имеется система крупных Волжских разломов, современно активных. Повсеместно зафиксирована

повышенная эманация радона (для Казани, Тольятти, Саратова, Самары существуют множественные измерения, анализ и публикации).

Моменты формирования ЛОА подтверждают комплекс процессов в атмосфере, запускаемых радоном в районах подготовки землетрясений.

Проявление температурных аномалий по данным метеостанции Тольятти в зимний период в результате геодинамических причин не является неустрашимым противоречием, хотя вопрос о сезонной изменчивости сейсмических явлений остается дискуссионным. В работе [6] показано, что существует сезонность изменений частоты землетрясений, связанная с изменением скорости движения Земли в галактике; при этом максимум повторяемости землетрясений приходится на период максимальной скорости (июнь). Эта закономерность проявляется для средних землетрясений и указывает на процессы, увеличивающие и уменьшающие сжатие (в разломах). Замечено, что тектоническая активность Русской платформы достигает пика в апреле — июле и в ноябре — январе [28]. Многочисленные исследования показывают, что планетарные процессы обуславливают сезонность слабых и средних землетрясений. Для сильных землетрясений показана связь сезонной изменчивости с региональными атмосферными процессами [3].

Таким образом, применяя закономерности проявления взаимодействия геосферы и атмосферы в сейсмически активных районах к ситуации в бассейне Волги, в районе Жигулевской ГЭС, можно сказать, что основное отличие наблюдается во временных характеристиках изменения температуры приземного слоя воздуха. В качестве возможного предвестника землетрясений рассматриваются тепловые аномалии с периодом несколько суток. В первом упоминании о температурной аномалии в связи с землетрясением говорилось о повышении среднемесячной температуры.

В случае Поволжья речь идет о более длительном повышении температуры воздуха. Следует установить, наблюдались ли в Поволжье тепловые аномалии продолжительностью в несколько суток, сопровождаемые ЛОА. Первоначально анализ предполагается выполнить для периодов нескольких зафиксированных в районе Жигулевской ГЭС местных сейсмических событий последних лет, сведения о которых имеются, например, в [18]. Затем следует оценить, могут ли подобные аномалии, если они будут выявлены, складываться в долгосрочное повышение температуры воздуха.

Планируется изучить геологию и геодинамику районов иных метеостанций и оценить возможные варианты корреляции изменений температуры с геодинамикой. Так, перспективными для исследования являются участки температурных аномалий на юго-восточной границе бассейна Волги (на границе с Оренбургской областью).

Что даст связь повышения температуры воздуха с геодинамикой, если гипотеза будет признана доказанной?

Для анализа происхождения долгосрочных аномалий повышения приземной температуры воздуха получаем возможную причину происходящих изменений — геодинамические процессы, в которых выдавливание радона из земной коры приводит к запуску последующих процессов в атмосфере. Отсутствие объяснения в климатологии причин для приблизительно 50 % составляющей глобального

потепления и наличие у «радоновой» модели корректно установленного механизма повышения температуры приземного слоя воздуха делает эту гипотезу пригодной для дальнейшей проверки на основе экспериментальных материалов.

При обнаружении связи тепловых аномалий с последующими сейсмическими событиями исследователи получили возможность отслеживать подготовку сильных землетрясений по относительно легко дистанционно контролируемому параметру — температуре воздуха.

Возможно, общие закономерности повышения температуры воздуха могут быть использованы для комплексного анализа ситуации в Поволжье, и в первую очередь в районе Жигулевской ГЭС, для прогноза геофизических полей, оценки геодинамического риска.

Так, например, активность Жигулевского разлома в настоящий момент никак не контролируется, хотя потенциально сила возможного здесь землетрясения оценивается в 9 баллов [18], а для Саратовской области — в 8 баллов [10].

Если использовать концепцию зоны подготовки землетрясения применительно к району Жигулевской ГЭС, то здесь уже наблюдаются аномалии скорости распространения упругих волн, ЛЮА, более интенсивное выделение радона, увеличение числа местных сейсмических событий [18], долгосрочная тепловая аномалия.

Вне компетенции автора говорить о подготовке землетрясения. Однако увеличение интенсивности вибраций как результат изменения условий прохождения упругих волн в грунтах, нарастание скорости изменения зимней температуры воздух в районе Жигулевской ГЭС и Поволжья, возможно, свидетельствуют о повышении геодинамической активности территории.

Исследователи получают регистрируемый параметр — температуру приземного слоя воздуха — как индикатор роста напряжений в геологической среде. Это актуально для всего Поволжья, и для района Жигулевской ГЭС в частности.

Выводы и предложения

Выявлено территориальное совпадение трех участков более быстрого повышения зимней температуры воздуха в бассейне Волги после 1980 г. с районами современной геодинамической активности на европейской части России.

Показано наличие на данных участках крупных разломов, проведена комплексная оценка их активности.

Оценена возможность формирования температурных аномалий в соответствии с механизмом, запускаемым выделяющимся из земной коры в разломных зонах радоном с выделением тепла непосредственно в воздухе.

Оценена возможность применения комплексной модели формирования атмосферных аномалий в районах подготовки сильных землетрясений для территории Поволжья.

Внесен вклад в создание комплексной картины геолого-геофизических процессов, происходящих в районе Жигулевской ГЭС.

Необходимо провести дополнительные исследования краткосрочных температурных и других аномалий (по данным дистанционного зондирования Земли)

для периодов, предшествующих зафиксированным в бассейне Волги сейсмическим событиям.

В случае выявления корреляций следует использовать метод тепловых аномалий для мониторинга геодинамической активности платформенных разломов, и прежде всего для района Жигулевской ГЭС.

Работа выполнена в составе фундаментальных исследований по теме № 0147-2019-0004 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090105-5) Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

1. Барковский Е.В. По закону сохранения энергии // Техника — молодежи. 2001. № 10. С. 56—60.
2. Боков В.Н. Качество метеорологических прогнозов — основа точности прогноза землетрясений // УЗ РГГМУ. 2006. № 2. С. 229—239.
3. Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // УЗ РГГМУ. 2010. № 14. С. 89—100.
4. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2014. № 3. С. 83—99.
5. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67—69.
6. Кропоткин П.Н., Люстих А.Е. Сезонная периодичность землетрясений и принцип Ньютона — Маха // Доклады АН СССР. 1974. Т. 217. № 5. С. 1061—1064.
7. Милькис Б.Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. 1986. № 3. С. 36—47.
8. Мирзоев К.М., Степанов В.П., Гатиятуллин Н.С., Тарасов Е.А., Гатиятуллин Р.Н., Кашиуркин П.И., Кожевников В.А. Глубинный карст и современные движения земной поверхности в Татарстане // Георесурсы. 2006. № 1 (18). С. 44—47.
9. Морозова Л. И. Проявление Главного Уральского разлома в поле облачности на космических снимках // Исследование Земли из космоса. 1980. № 3. С. 101—103.
10. Огаджанов В.А. О проявлении сейсмичности в Поволжском регионе после сильных землетрясений в бассейне Каспийского моря // Физика Земли. 2002. № 4. С. 48—54.
11. Прогноз землетрясений возможен?! / Под ред. С.А. Пулинца. М.: Троянт, 2014. 144 с.
12. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С. 1—19.
13. Пулинец С. А., Узунов Д. П. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф // Труды Института прикладной геофизики им. Е.К. Федорова. Вып. 89. 2011. С. 173—185.
14. Рогожин Е.А. Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника. 1996. № 2. С. 45—53.
15. Сальман А.Г., Тронин А.А. Вариации потока уходящего ИК-излучения Земли в сейсмоактивных районах Средней Азии // Известия АН СССР. Физика Земли. 1990. № 7. С. 67— 69.
16. Трубецкова М.Д., Шумакова Е.М. Системный подход к организации геофизического мониторинга в районе Жигулевской ГЭС. Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016) / В сб.: Девятая межд. конф. Под ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М., 2016. С. 357—359.
17. Шумакова Е.М., Трубецкова М.Д., Разумовский Л.В. Геодинамика района Жигулевской ГЭС и ее проявление в геофизических процессах приплотинной зоны / В сб.: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VI Межд. науч.-практ. конф., 2017. С. 184—189.

18. Яковлев В.Н., Шумакова Е.М., Трезуб Н.В. Сейсмическая активность и геодинамика Самарской области // ИСНЦ РАН. 2014. Т. 16, № 1. С. 27—34.
19. Doda L., Pulinets S. Earthquake clouds and physical mechanism of their formation / AGU Fall Meeting, Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T31A-0426, 2006.
20. Dunajevka M.A., Pulinets S.A. Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico // Atmosfera. 2005. V. 18, No. 4. P. 235—247.
21. Levina, G.V., Moiseev, S.S., Rutkevich, P.B. Hydrodynamic alpha-effect in a convective system // Series: Advances in Fluid Mechanics. Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence (Eds. L. Debnath and D.N. Riahi). 2000, 2. P. 111—162.
22. Martinelli G., Solecki A.T., Tchorz-Trzeciakiewicz D.E., Piekarczyk M., Grudzinska K.K. Laboratory experiments on radon 222 exposure effects on local environmental temperature: implications for satellite TIR measurements/ Abstr. EGU General Assembly 27 April – 2 May 2014. Vienna, Austria, 2014. Id. 3175.
23. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // Advances in Space Research. 2004, 33. P. 268—273.
24. Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Pokhmelnikh L. A. The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. 2006, 31. P. 143—153.
25. Pulinets S., Ouzounov D., Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model - a unified concept for earthquake precursors validation // Asian J. Earth Sci. 2010, 39. doi:10.1016/j.jseaes.2010.03.005.
26. Svensmark H., Pedersen J. O. P., Marsh N. D., Enghoff M. B., Uggerhøj U. I. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions // Proc. R. Soc. A. 2007, 463. P. 385—396.
27. Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.V., Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V. 29. P. 501—506.
28. Барковский Е.В. Геофизическая причина взрывов на Чернобыльской АЭС, в Сасово и других регионах Восточно-Европейской платформы // Научный журнал Русского физического общества. 16 апреля 1994 г. IPCC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rusphysics.ru/articles/199/>. Дата обращения: 1.03.2019.
29. IPCC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://alfapol.ru/geo-dinamicheskoe-rajonirovanie-moskvy-i-moskovskoj-oblasti/> Дата обращения: 2.03.2017.
30. IPCC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://solium.ru/forum/saveimg/2011/04/12/rfywxmxuger0arxalj.jpg/> Дата обращения: 2.03.2017.
31. IPCC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cawater-info.net/bk/dam-safety/safety-and-earthquake.htm/> Дата обращения: 1.04.2019.

АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В БАССЕЙНАХ РЕК

В.А. Зеленцов, С.А. Потрясаев, И.Ю. Пиманов, М.Р. Пономаренко

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, pimen@list.ru

Представлены результаты разработки комплекса средств автоматизации, объединенных в систему мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки с использованием гидрологических и гидродинамических моделей и наземно-космических данных. Построенная на базе сервис-ориентированной архитектуры с применением открытых кодов и свободно распространяемого программного обеспечения, система позволяет автоматизировать полный цикл моделирования речных наводнений и визуализации его результатов. Рассмотрены результаты тестирования работы системы на участке реки Северная Двина. Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения сервис- и событийно-ориентированных архитектур в сочетании с технологиями платформо-независимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов.

Ключевые слова: наводнения, мониторинг, комплексное моделирование, сервис-ориентированная архитектура, искусственные нейронные сети, геоинформационные системы.

AUTOMATION OF MONITORING AND INTEGRATED MODELING OF HYDROLOGICAL SITUATION IN RIVER BASINS

V.A. Zelentsov, S.A. Potriasaev, I.Yu. Pimanov, M.R. Ponomarenko

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS

The results of the development of an automation equipment complex, combined into a system for monitoring and forecasting the hydrological situation using a complex of hydrological and hydrodynamic models, ground observations and remote sensing data are presented. The system is based on a service-oriented architecture with the use of open codes and free software and allows to automate the full cycle of river flood modeling and visualization of the results. The results of testing the system on Northern Dvina River are described. The obtained data shows the effectiveness of using service- and event-oriented architectures in combination with the technologies of platform-independent universal description, automatic search and integration of web services.

Keywords: flood, monitoring, complex modeling, service-oriented architecture, artificial neural network, geoinformation systems.

Введение

Ограниченное использование систем моделирования, прогнозирования и оценки рисков наводнений, прежде всего в оперативном режиме, на сегодняшний день связано с рядом факторов, к числу которых относятся:

- низкая степень автоматизации работы систем;
- недостаточная оперативность поставки и обработки необходимых данных;
- высокая сложность и междисциплинарность задач интеграции разнородных данных и моделей в единой системе;
- разобщенность усилий разработчиков гидрологических и гидродинамических моделей, специалистов по информационным технологиям и экспертов в области совместной обработки разнородных наземно-аэрокосмических данных;
- сложности с интерпретацией результатов моделирования и доведением их до пользователей, не обладающих специальными знаниями в области гидрологии и информационных технологий.

Для эффективной работы подобных систем требуется автоматизировать весь цикл моделирования, включая этапы загрузки разнородных исходных данных (данных с гидропостов, метеоинформации, материалов аэрокосмической съемки, результатов наземного мониторинга и др.), выбора моделей и их настройки, проведения расчетов, интерпретации результатов моделирования, организации работы в реальном масштабе времени, визуализации данных и др. [10].

Существующие информационные технологии и программные средства для интеграции разнородных информационных ресурсов, как правило, позволяют автоматизировать отдельные этапы работы системы [3]. При этом решение комплексной задачи автоматизации мониторинга и оперативного прогнозирования наводнений в бассейнах рек остается открытым вопросом.

Именно автоматизация, а также интеграция распределенных разнородных информационных ресурсов являются основными принципами, положенными в основу предлагаемых в данной работе программных и информационно-технологических решений по созданию информационной системы для мониторинга, оперативного анализа и прогнозирования гидрологической обстановки в бассейнах рек. С точки зрения требований оперативности наибольшее внимание уделяется организации работы системы при наводнениях.

Необходимо отметить, что отличительной особенностью рассматриваемой в статье разработки комплекса средств автоматизации является ориентация на использование апробированных и подтвердивших свои характеристики гидрологических и гидродинамических моделей. Такой подход обеспечивает высокоточное оценивание границ затоплений и уровней подъема воды с учетом конкретных условий распространения водного потока, принципиально отличает рассматриваемые задачи построения системы прогнозирования от задач только фиксации границ зон уже состоявшихся затоплений и задач геоинформационного моделирования [9], позволяющих оценить возможные границы зон разлива воды при тех или других потенциально возможных уровнях ее подъема.

Методика исследования

Проблематика создания комплекса средств автоматизации и соответствующей системы мониторинга гидрологической обстановки охватывает необходимость решения по меньшей мере двух групп задач. Первая из них касается разработки

методов и алгоритмов оценивания и выбора наиболее приемлемых для каждой конкретной ситуации моделей прогнозирования распространения водного потока. Вторая группа задач состоит в выборе, адаптации и практической реализации комплекса программно-технологических решений, обеспечивающих в оперативном режиме интеграцию разнородных информационных ресурсов, включая выбранные модели прогнозирования, обработку наземно-аэрокосмических данных, интерпретацию, визуализацию и предоставление результатов мониторинга и моделирования пользователю.

Методической основой решения задач первой группы являются полученные к настоящему времени результаты нового научного направления — квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [7], уже апробированных в ряде прикладных направлений и доказавших свою эффективность.

В настоящей статье основное внимание уделяется второй группе задач по обоснованию архитектуры и технологическому построению интегрирующего комплекса средств автоматизации. При этом для прогнозирования наводнений в оперативном режиме реализуется технология, построенная на базе концепции многомодельного описания сложных природных объектов с реализацией механизма выбора и структурной и параметрической адаптации параметров наиболее адекватной модели для каждой конкретной ситуации [1, 17].

Система мониторинга гидрологической обстановки (СМГО) в рассматриваемой постановке в общем случае включает размещенные на различных ресурсах средства сбора гидрологической и метеоинформации, математические модели прогноза, источники данных аэрокосмической съемки, пользовательские терминалы, средства оповещения и др.

Наиболее распространенными типами архитектур при создании подобных систем являются [12]:

- монолитная архитектура;
- модульная архитектура;
- компонентная архитектура;
- клиент-серверная архитектура;
- сервис-ориентированная архитектура.

Преимуществами систем с монолитной архитектурой [2, 16] являются простота управления и развертывания, обеспечение высокой согласованности программного кода и высокого качества контроля ошибок. Основным недостатком данных систем с точки зрения рассматриваемых задач является их ориентация на создание относительно небольших, локальных приложений, развертываемых на едином вычислительном ресурсе.

Модульная архитектура используется при создании более сложных программных комплексов [2, 6]. Она основана на декомпозиции приложения и введении понятия плагина — программного модуля, который независимо компилируется, может динамически подключаться к основной программе и обеспечивать тем самым расширение ее функциональности.

В компонентной архитектуре [22] используется аналогичный подход, позволяющий создавать достаточно сложные информационные системы за счет

«блочного» построения программного кода и повторного использования одних и тех же фрагментов кода. При этом базовым является требование универсальности используемых модулей. Развитие универсальности привело к созданию программных библиотек с возможностью широкого выбора необходимых модулей для реализации требуемой функциональности информационной системы.

Однако и монолитная, и компонентная архитектуры предназначены для построения локализованных информационных систем.

Для СМГО одной из основных требуемых функций является организация взаимодействия разнородных информационных ресурсов, к тому же функционирующих в асинхронном режиме. К таким ресурсам относятся: программные комплексы и автоматизированные системы получения и предобработки исходных данных, их каталогизации, хранения, архивирования; расчетно-вычислительные модули, осуществляющие прогноз распространения водного потока и оценивание потенциального ущерба; программно-инструментальные средства интерпретации результатов расчетов и предоставления их пользователю и т.д. При этом отдельные информационные ресурсы и модули могут быть территориально распределены и должны взаимодействовать через телекоммуникационные сети. Реализацию такого взаимодействия обеспечивает клиент-серверная архитектура [18]. В простейшем варианте клиент-серверная архитектура включает пользовательский клиент, на котором реализуется основная логика работы информационной системы, и серверную часть в виде системы управления базами данных (СУБД) или файл-сервера. В общем случае данный тип архитектуры обеспечивает любое взаимодействие двух и более распределенных программных модулей. Наиболее полный вариант такого взаимодействия обеспечивается при использовании сервис-ориентированной архитектуры (СОА) [19].

СОА позволяет реализовать модульный подход к построению сложных информационных систем. Для этой цели отдельные прикладные модули системы исполняются как веб-сервисы с возможностью обмена данными по стандартным протоколам. Связующим программным обеспечением в СОА традиционно является сервисная шина предприятия (Enterprise Service Bus, ESB). ESB предоставляет централизованный и унифицированный событийно-ориентированный обмен сообщениями между различными модулями информационной системы [19].

Используемые модули могут содержать внутри себя сторонние программные комплексы, решающие конкретные прикладные задачи и представленные в виде законченных решений, прошедших при необходимости валидацию и верификацию. При этом могут использоваться различные языки программирования, программно-технологические средства и инструменты для организации взаимодействия, обработки и хранения данных. Это дает возможность рационального построения СМГО в целом за счет выбора наилучшей конфигурации программно-аппаратных решений для каждой прикладной задачи.

Использование СОА в качестве базового архитектурного решения позволяет учесть основные особенности задач оперативного комплексного моделирования наводнений и автоматизировать процедуры мониторинга гидрологической обстановки в бассейнах рек.

Проведенный анализ показал, что для максимально полной автоматизации функционирования СМГО в ее состав должны быть включены следующие компоненты:

- сервисная шина;
- интерпретатор сценария на языке VPEL, встроенный в сервисную шину;
- программное обеспечение для отображения данных по стандартам веб-картографии;
- система управления базой пространственных данных;
- сервер администрирования;
- сервис сбора данных с гидрологических датчиков;
- сервис получения, обработки и загрузки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- сервис прогнозирования значений параметров гидродинамических процессов;
- сервис, управляющий работой расчетной гидродинамической модели;
- сервис прогнозирования уровня и расхода воды на гидропостах;
- сервис обработки и интерпретации результатов расчетов;
- пользовательский веб-интерфейс — веб-приложение для работы на стационарных и мобильных пользовательских устройствах.

Структурно-функциональная схема СМГО, включающая перечисленные компоненты, приведена на рис. 1.

Как отмечалось выше, в данной системе реализована концепция многомодельного описания сложных природных объектов с реализацией механизма выбора и структурной и параметрической адаптации параметров наиболее адекватной модели для каждой конкретной ситуации.

Расчет расходов воды выполняется не только на основе гидрологических моделей, но также с помощью искусственных сетей (ИНС). Для этого использован специально разработанный алгоритм автоматического подбора (адаптации) конфигурационных параметров предложенных моделей ИНС.

Корректировка параметров используемых гидродинамических моделей выполняется по результатам анализа данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Важное место в системе отводится использованию материалов космической съемки. Космическая съемка позволяет получить площадные пространственные данные по всей площади водосбора и при совместном использовании с результатами наземного гидрометеорологического мониторинга выполнить подробный площадной анализ гидрологической обстановки на территории. Использование данных дистанционного зондирования Земли является перспективным направлением мониторинга российских рек, для которых, как правило, характерны редкая сеть пунктов гидрометеорологических наблюдений, отсутствие актуальных пространственных данных на территорию (ЦМР и др.), формирование ледовых заторов в ходе вскрытия рек.

При решении задач мониторинга наводнений наиболее широкое применение сегодня находят оптическое и радиолокационное зондирование, обеспечивающие

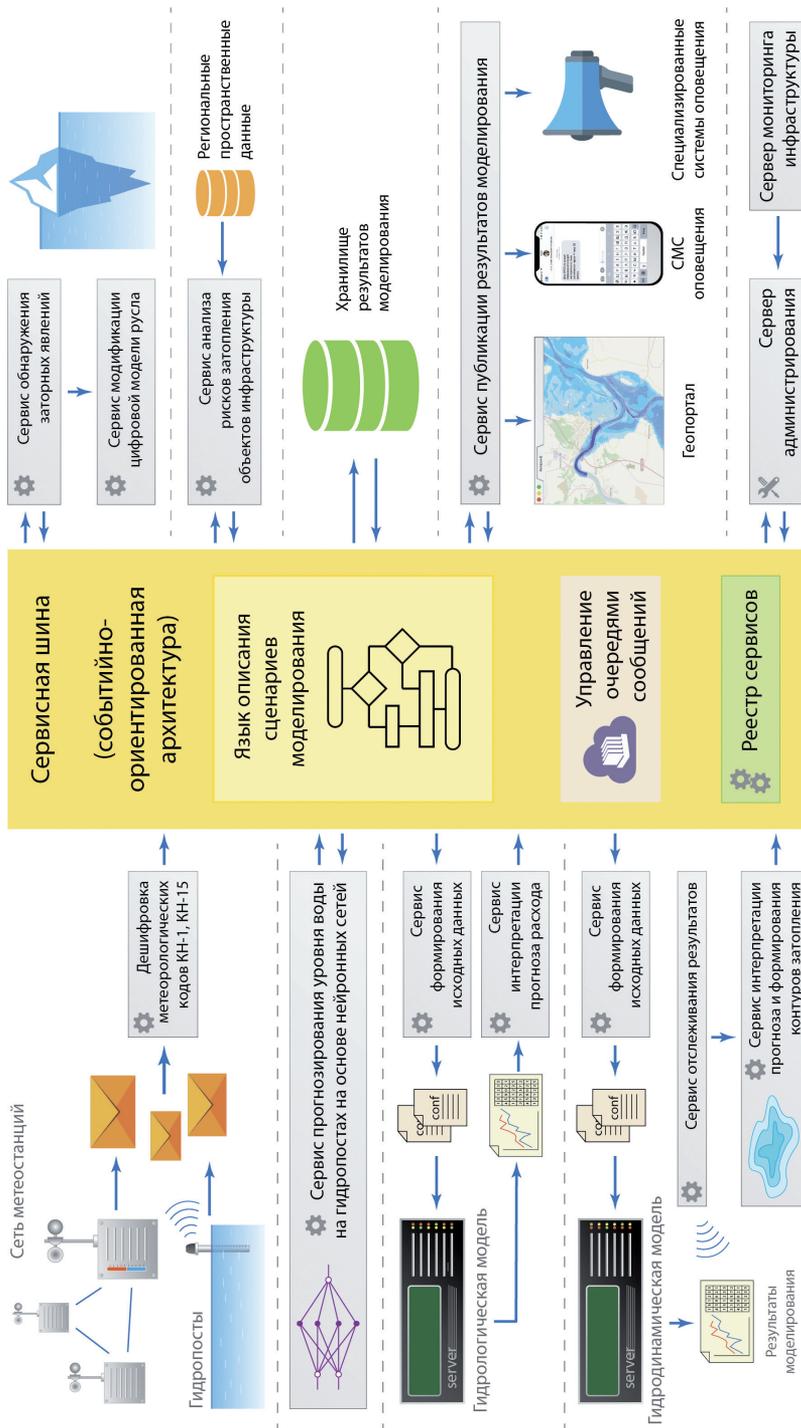


Рис. 1. Структурно-функциональная схема СМГО.

широкий пространственный охват съемки и регулярное получение оперативных данных. В то же время существуют и ограничения по использованию данных технологий. Так, значительная облачность существенно ограничивает возможности применения оптических систем. В этом случае основным источником данных становятся материалы радарной съемки, не зависящей от состояния облачного покрова и освещенности земной поверхности. Использование радарных снимков наиболее эффективно на открытых участках; в условиях городской застройки задача усложняется [20, 21]. Таким образом, решение данной проблемы требует комплексного применения материалов космической съемки — оптической и радарной. В рамках исследования предложен метод обработки и анализа данных ДЗЗ, включающий три основных этапа [4]:

- автоматическую пороговую обработку радиолокационных данных;
- расчет нормализованного разностного водного индекса NDWI по данным зондирования в оптическом диапазоне;
- совместный анализ результатов обработки радарных и оптических данных.

Для хранения информации (входных данных и результатов обработки и моделирования) применяется битемпоральная база данных, которая благодаря используемой темпоральной модели данных (ТМД) дает возможность фиксировать время актуальности данных, а также транзакционное время (момент их записи в хранилище). Это позволяет организовать оперативный режим работы системы и выполнять сценарное моделирование. При этом для работы с темпоральными данными конечному пользователю не требуются специальные знания, так как для визуализации данных в веб-интерфейсе используется временная шкала — удобный инструмент для просмотра как исходных данных, так и результатов прогнозирования и сценарного моделирования.

Стоит отметить, что все этапы вычислительного процесса (от сбора данных до представления результатов прогнозирования) полностью автоматизированы. В связи с тем, что система ориентирована на пользователей без специальных знаний в области информационных технологий, интерфейс содержит только минимальный необходимый набор инструментов для работы с данными, к которым относятся:

- строка поиска пространственных данных;
- перечень отображаемых данных;
- временная шкала для работы с темпоральными данными.

Это позволяет скрыть от конечного пользователя всю сложность системы и не требует от него специальной подготовки в области информационных технологий, геоинформатики и др. Внешний вид интерфейса пользователя показан на рис. 2.

Результаты исследований

Разработанная система апробирована в ходе весеннего половодья в 2014—2018 гг. на участке русла реки Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас. Наводнения — частое для данного района явление, причиняющее значительный экономический ущерб.

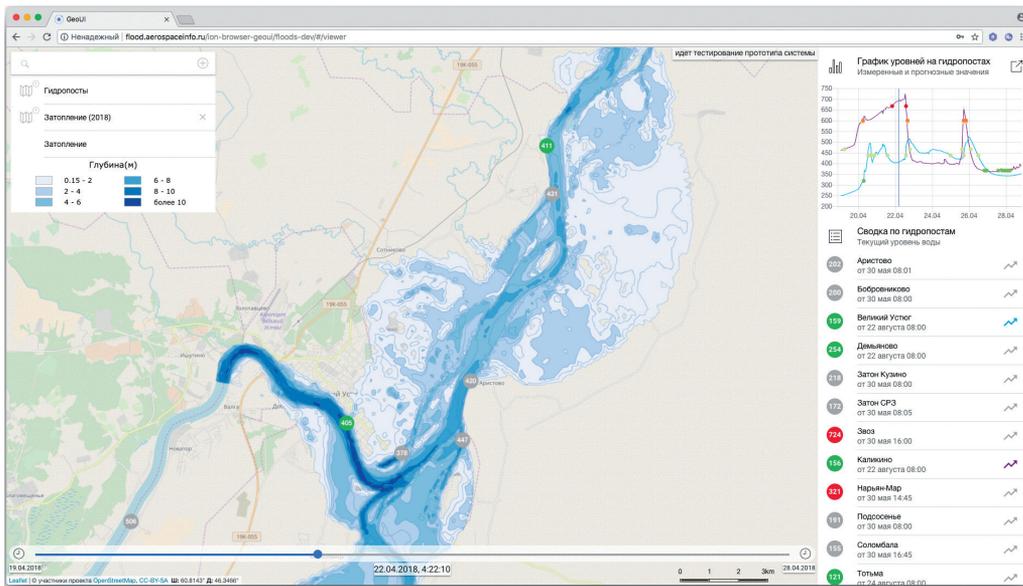


Рис. 2. Вид веб-интерфейса системы.

Вверху справа — графики изменения уровня с фиксацией пересечения границ опасных явлений, ниже — оперативные значения уровня воды на гидропостах.

Целью апробации являлось подтверждение возможности автоматизации всех этапов мониторинга и моделирования гидрологической обстановки на базе предложенного состава технологических решений.

Для наблюдения и изучения наводнений на выбранной территории специалистами Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и Института водных проблем РАН неоднократно проводились подробные исследования, в том числе настройка гидродинамических моделей и проверка их достоверности [13, 14, 23, 24]. В 2014—2016 гг. авторами статьи совместно с данными специалистами были выполнены тестовые запуски системы. Весной 2018 г. в течение всего периода половодья тестирование осуществлялось в режиме реального времени.

В ходе эксперимента сценарные расчеты выполнялись с применением отечественной модели класса STREAM 2D (ранее известные как Flood и River), разработанной под руководством А.Н. Милитеева и В.В. Беликова [11]. Расчет расходов воды, поступающей на верхние границы гидродинамической модели, осуществлялся с помощью модели ECOMAG, разработанной под руководством Ю.Г. Мотовилова [8], и искусственных нейронных сетей. Также в рамках совершенствования системы обе модели использованы для получения данных в режиме реального времени на участке слияния рек Сухоны и Юга.

При тестировании работы системы в оперативном режиме данные для моделирования затоплений поступали с 12 стационарных и 5 временных гидропостов. Для их загрузки в модель осуществлялся этап предварительной обработки.

Для прогноза затопления Великого Устюга, связанного с формированием ледовых заторов, использовались разрабатываемые прогностические искусственные нейронные сети, с помощью которых был составлен прогноз на период 9 марта — 29 апреля 2018 г. для следующих районов:

- посты Тотьма и Каликино (река Сухона);
- пост Гаврино (участок слияния рек Юга и Лузы);
- пост в Великом Устюге.

Анализ данных, полученных с применением модели ECOMAG и ИНС, показал следующее:

- имитационная модель, учитывающая данные о процессах формирования стока по всей площади водосбора за значительный период времени, точнее отражала аномальные ситуации и прогнозировала их развитие;

- ИНС эффективнее работают при обычном ледоходе, прогнозируя длительные по времени и инерционные изменения, так как они были обучены на тестовых примерах именно для таких условий без учета аномальных ситуаций.

Таким образом, для того чтобы повысить точность прогнозирования уровня воды, необходимо использовать комплекс различных моделей на базе независимых методов. В связи с этим в период нормального ледохода использовались ИНС, а при нештатной ситуации (в частности, при возникновении ледовых заторов) прогнозирование осуществлялось с применением имитационной модели.

В ходе работы системы прогноз затоплений выполнялся каждый час на 24 часа вперед после загрузки данных в модель. Далее выполнялась визуализация зон и глубины затоплений в интерфейсе системы, позволяющем одновременно просматривать следующие данные:

- моделируемые контуры зон распространения воды;
- информацию о гидропостах, используемых для получения данных;
- графики изменения уровня воды на гидропостах с результатами прогнозов изменения уровня;
- результаты обработки данных ДЗЗ.

В качестве материалов космической съемки использовались снимки с КА «Ресурс-П» и «Канопус-В» (Россия), Sentinel-1 и Sentinel-2 (Европейское космическое агентство), RADARSAT-2 (Канада). Для оценки результатов моделирования и получения дополнительных сведений о территории (в частности, о ледовых заторах) в ходе половодья весной 2018 г. (1 апреля — 16 мая 2018 г.) в системе опубликовано более 20 снимков с российских КА и спутников Sentinel.

Вид интерфейса системы с наложенным космическим снимком КА Sentinel-2 показан на рис. 3.

Кроме того, в ходе тестирования сценарного режима работы системы результаты моделирования наводнения 2016 г. были сопоставлены с результатами обработки космических снимков за тот же период. При этом были использованы данные RADARSAT-2, обработанные в соответствии с предложенным подходом. Анализ результатов позволил выявить высокий уровень совпадения контуров затопления на открытых территориях (без городской застройки). В целом расхождение между площадями зон затоплений, построенных по результатам

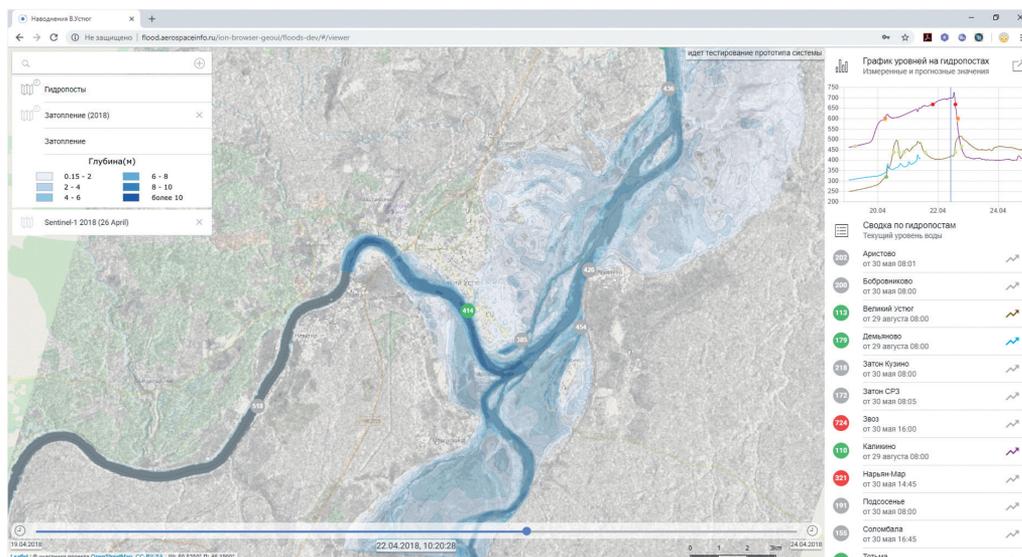


Рис. 3. Общий вид интерфейса системы.

моделирования и обработки данных ДЗЗ, составило 7 %. При этом выполнена оценка точности прогноза по составу объектов инфраструктуры на затопленных участках, составившая не менее 90 %.

Выводы

Результаты апробации предложенного подхода и тестирования разработанной системы (в оперативном и сценарном режимах) подтверждают эффективность применения сервис- и событийно-ориентированных архитектур совместно с технологиями платформонезависимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов, обеспечивающих требуемую базовую функциональность систем мониторинга и моделирования наводнений. Система построена на базе открытой отечественной программной платформы. Кроме того, особенности построения системы позволяют в полной мере учесть специфические условия российских рек и отвечают требованиям к информационному обеспечению гидрометеорологического мониторинга.

Благодаря автоматизации процессов мониторинга и моделирования, а также наличию удобных и простых средств взаимодействия с моделирующими комплексами разработанная система мониторинга гидрологической обстановки дает возможность объединить усилия разработчиков гидрологических и гидродинамических моделей, специалистов в области разработки информационных технологий и программно-инструментальных средств обработки разнородных данных и специалистов-практиков для использования результатов математического моделирования в оперативном режиме.

Полная автоматизация вычислительного процесса избавляет пользователя от трудностей применения разнородных территориально распределенных информационных ресурсов, существенно расширяя круг пользователей и включая в него службы по чрезвычайным ситуациям, органы муниципального образования, страховые компании и др.

Исследования по разработке моделей на базе искусственных нейронных сетей, использованию многомодельного подхода, а также экспериментальные исследования по тестированию системы на р. Северная Двина выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-11-01254). Исследования по выбору технологий для создания веб-сервисов выполнены в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0004. Обработка данных ДЗЗ выполнена при финансовой поддержке проекта Speeding up Copernicus-based innovation in the Baltic Sea Region (BalticSatApps) программы INTERREG Baltic Sea Region.

Список литературы

1. Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных // Труды СПИИ РАН. 2015. № 41 (4). С. 5—33.
2. Гринфилд Дж., Шорт К., Кук С., Кент С., Крупи Дж. Фабрики разработки программ: потоковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты / Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 592 с.
3. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Труды СПИИ РАН. 2017. № 55 (6). С. 86—113.
4. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р. Использование данных космического радиолокационного зондирования при анализе зон затопления в половодье // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII, № 7—8. С. 54—60. DOI: 10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-54-60.
5. Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Семенов А.Е. Мониторинг и моделирование наводнений на базе системы с сервис-ориентированной архитектурой // Геориск. 2016. № 1. С. 12—15.
6. Календарев А. Современная веб-архитектура. От монолита к микросервисам // Системный администратор. 2017. № 1—2. С. 80—83.
7. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: изд-во РАН, 2018. 314 с.
8. Мотовилов Ю.Г. Свидетельство о гос. рег. в Роспатенте № 2013610703. ЕСОМАГ. Россия, 2013.
9. Новаковский Б.А., Колесникова О.Н., Прасолова А.И., Пермяков Р.В. Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийска, Алтайский край) // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 15—20.
10. Пиманов И.Ю. Программные инструментальные средства для комплексного моделирования при мониторинге и прогнозировании развития чрезвычайных ситуаций с использованием данных дистанционного зондирования // Известия вузов. Приборостроение. 2018. № 11. С. 988—996.
11. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологии CUDA (на графических процессорах NVIDIA) / А.И. Алексюк, В.В. Беликов. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266. Российское агентство по интеллектуальной собственности, 2017.
12. Советов Б.Я., Водяхо А.И., Дубенецкий В.А., Цехановский В.В. Архитектура информационных систем. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 288 с.

13. *Alabyan A.M., Lebedeva S.V.* Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation // *J. Hydroinformatics*. 2018. V. 20, No. 4. P. 798—813.
14. *Agafonova S.A., Frolova N.L., Krylenko I.N.* et al. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia // *Natural Hazards*. 2017. V. 88, No. S1. P. 171—188.
15. *Zelentsov V.* et al. River Flood Forecasting System: An Interdisciplinary Approach / In: Refice A., D'Addabbo A., Capolongo D. (eds.). *Flood Monitoring through Remote Sensing*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-63959-8_4.
16. *Gouigoux J. P., Tamzalit D.* From Monolith to Microservices: Lessons Learned on an Industrial Migration to a Web Oriented Architecture // In: Proc. IEEE International Conf. on Software Architecture Workshops (ICSAW'2017), 2017. P. 62—65. doi: 10.1109/ICSAW.2017.35
17. *Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.J., Nemykin S.A.* Creation of Intelligent Information Flood Forecasting Systems Based on Service Oriented Architecture / In: R. Silhavy, R. Senkerik, Z. Oplatkova, P. Silhavy, Z. Prokopova (eds.). *Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems. CSOC 2016 // Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. V. 466. P. 371—381. DOI: 10.1007/978-3-319-33389-2_35.
18. *Oluwatosin H.S.* Client-Server Model // *IOSRJ Comput. Eng.* 2014. V. 16, No. 1. P. 2278—8727.
19. *Paik H., Lemos A., Barukh M., Benatallah B., Natarajan A.* Web Service Implementation and Composition Techniques. Springer International Publishing, 2017. 256 p.
20. *Ponomarenko M.R., Pimanov I.Y.* Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects / In: Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017 // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. V. 574. P. 291—299. DOI: 10.1007/978-3-319-57264-2_30.
21. *Ponomarenko M.R., Pimanov I.Yu.* Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2016. V. 9 (7). P. 994—1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.
22. *Richards M.* *Software Architecture Patterns*. O'Reilly Media, Inc, 2015. 47 p.
23. *Belikov V.V., Krylenko I.N., Alabyan A.M.* et al. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers // *Proc. IAHS*. 2015. V. 370. P. 69—74.
24. *Krylenko I., Motovilov Yu., Antokhina E.* et al. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions // *Proc. IAHS*. 2015. V. 368. P. 156—161.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЕК РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) И ИХ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

В.А. Лобанов¹, Н.И. Горошкова²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,
lobanov@EL6309.spb.edu

² Государственный гидрологический институт

Проведено исследование таких основных характеристик ледового режима рек, как продолжительность периода ледостава, даты его начала и окончания, максимальная толщина льда на реках, а также характерных максимальных уровней: начала ледостава, ледохода, заторных и наибольших в году. Исследование выполнено для 11 пунктов на реках Якутии по продолжительным рядам данных наблюдений с 1950 по 2017 г. Получено, что повышение зимней температуры проявляется в уменьшении продолжительности периода ледостава в основном за счет более ранних сроков окончания ледостава. Также имеет место увеличение максимального уровня начала ледостава, а остальные характеристики ледового режима пока остаются стабильными. Исследования причин заторных наводнений для разработки методов их прогноза и оценки потенциального риска затопления хозяйственно освоенных территорий продолжают оставаться актуальными.

Ключевые слова: характеристики ледового режима, реки Якутии, изменение климата, оценка стационарности, изменение средних значений.

CHARACTERISTICS OF ICE REGIME OF THE RIVERS OF THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA) AND THEIR CLIMATE CHANGES

V.A. Lobanov¹, N.I. Goroshkova²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² State Hydrology Institute

The main characteristics of the ice regime of rivers such as the duration of the ice period, the dates of its beginning and ending, the maximum thickness of ice on the rivers, as well as the characteristics of maximum water levels such as ice-freezing, ice drift, ice congestion and the annual maximum water level are studied. The study was carried out for 11 gauged stations on the rivers of Yakutia with long-term time series from the beginning of 1950s through 2017. It has been obtained, that an increase in the winter temperature leads to a decrease in the duration of the freeze-up period, mainly due to the onset of an earlier date of the end of the freeze-up. There is also an increase in the maximum levels of freeze-up, while other characteristics of the ice regime remain stable.

Keywords: characteristics of the ice regime, the rivers of Yakutia, climate change, assessment of stationarity, change in mean values.

Введение

Ледовый режим рек относится к области криосферных явлений, которые обладают инерционностью и не сразу реагируют на внешние изменения, в том числе и климатические. Поэтому интересно рассмотреть, как отражается потепление климата на таких характеристиках ледового режима рек, как максимальная

толщина льда, продолжительность периода ледостава, даты начала и окончания ледостава и характерные уровни воды периода ледостава (максимальный уровень начала ледостава, ледохода, заторов льда, максимальный за год уровень), расчетные значения которых имеют большое значение для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений. Во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [4] показано, что характеристики криосферы уже откликаются на потепление климата и это проявляется в сокращении площади снежного покрова, уменьшении толщины морского льда на 23 % и сокращении доли многолетних морских льдов в Арктическом бассейне в 2—3 раза [1]. За счет повышения температуры воздуха в слое почвы до глубины 3 м начинает оттаивать вечная мерзлота, но интенсивность этого процесса меньше, чем скорость наблюдаемого повышения температуры [3].

Цель статьи состоит в анализе влияния климатических изменений на характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия).

Исходные данные

Для рассмотрения была выбрана территория центральной и южной части Якутии, где наблюдаемое повышение температуры, особенно в холодный период, наиболее значительно [6]. Схема размещения пунктов гидрологических наблюдений за характеристиками ледового режима приведена на рис. 1, а сведения о продолжительности наблюдений и координатах пунктов — в табл. 1. Как следует из

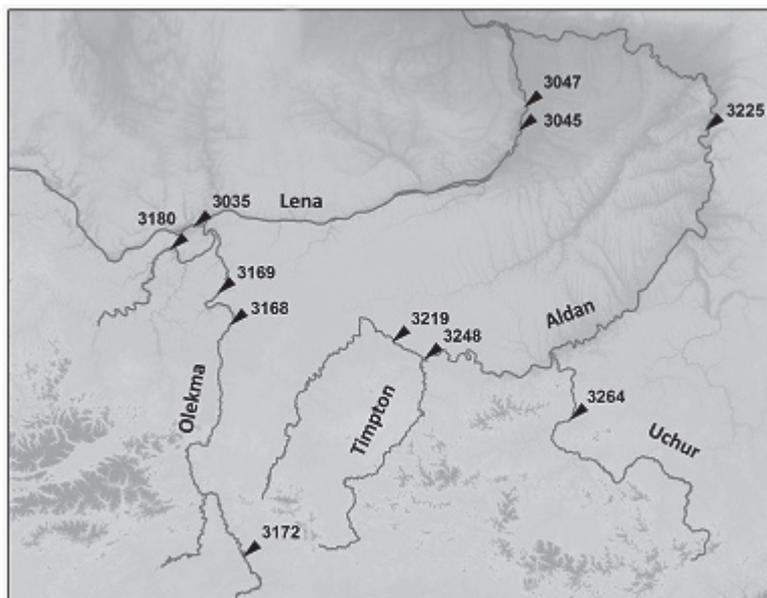


Рис. 1. Местоположение пунктов наблюдений за характеристиками ледового режима.

таблицы, продолжительность наблюдений в основном составляет 67 лет (начало в 1950 г. и окончание в 2016—2017 гг.).

Таблица 1

Характеристики пунктов и периоды наблюдений за гидрологическими характеристиками

Код поста	Река — пункт	φ° с.ш.	λ° в.д.	Период	
				Годы	Число лет
3035	Лена — Олекминск	60,4	120,4	1950—2017	68
3045	Лена — Якутск	62,0	129,8	1962—2016	55
3047	Лена — Кангалассы	62,3	130,0	1950—2016	67
3168	Олекма — Джекимдэ	59,0	121,8	1955—2016	62
3169	Олекма — Куду-Кёль	59,5	121,3	1950—2016	67
3172	Нюкжа — Лопча	55,8	122,7	1963—2016	54
3180	Чара — Токко	60,0	119,8	1950—2016	67
3219	Алдан — Томмот	59,0	126,3	1950—2016	67
3225	Алдан — Охотский Перевоз	61,9	135,5	1950—2016	67
3248	Тимптон — Усть-Тимптон	58,7	121,0	1953—2016	64
3264	Учур — Чюльбю	57,9	131,1	1954—2017	64

Помимо гидрологических характеристик, рассматривалась также и средняя температура воздуха за зимний период на метеостанции Якутск. Многолетний ряд наблюдений за зимней температурой воздуха приведен на рис. 2, из которого видно, что температура повышается, причем особенно интенсивно с конца 1980-х годов. Аналогичная закономерность повышения зимней температуры воздуха отмечается на большинстве метеостанций Республики Саха (Якутия) [8].

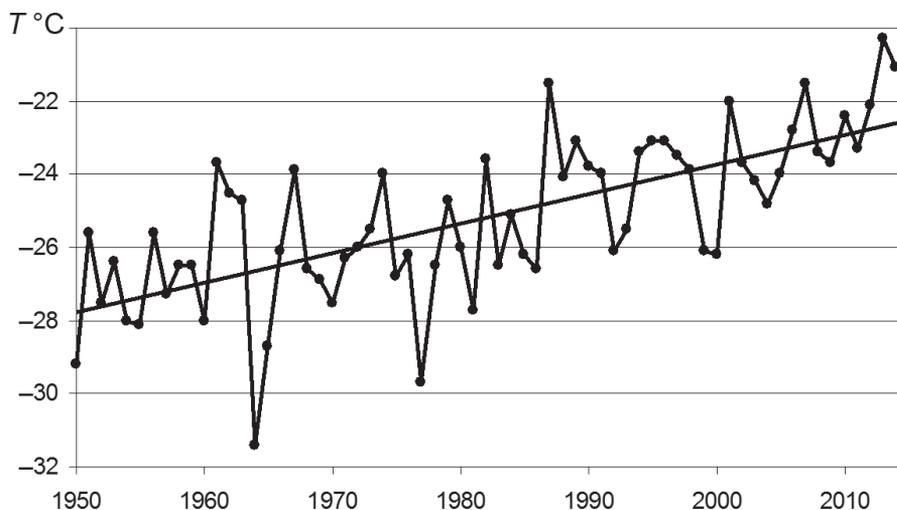


Рис. 2. Многолетний ряд температуры воздуха за зимний период на метеостанции Якутск.

Методика исследования

Методика оценки климатических изменений основана на применении статистических критериев оценки стационарности дисперсий (критерий Фишера) и средних значений (критерий Стьюдента) для двух частей временного ряда [7, 11, 15, 16]. Кроме этого, для аппроксимации многолетних временных рядов применены два типа моделей нестационарного среднего значения: хорошо известная модель линейного тренда [15] и менее известная модель ступенчатого, или скачкообразного изменения среднего [10, 12, 13]. В последней из упомянутых моделей средние значения определяются для двух частей временного ряда, а год ступенчатого перехода от одного квазистационарного периода к другому находится итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1) = \min, \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 — средние квадратические отклонения; n_1, n_2 — объемы каждой из двух частей временного ряда.

При этом в алгоритме задается минимальный объем первой части ряда, например $n_1 = 10$, при котором объем второй части ряда равен $n_2 = n - n_1$, и затем он последовательно увеличивается от n_1 до $m = n - 10$, при котором $n_2 = 10$, т.е. $n_1 = 11, 12, \dots, m$. Данная процедура соответствует известному методу «расширяющегося окна» [9].

За показатель эффективности моделей нестационарного среднего (Δ) принимается относительная разность (%) средних квадратических отклонений остатков между моделью стационарного (σ_0) и нестационарного ($\sigma_{\text{нест}}$) среднего [13, 14]:

$$\Delta = (\sigma_0 - \sigma_{\text{нест}}) / \sigma_0 \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Если нестационарная модель лучше, чем стационарная, то Δ будет существенно отличаться от нуля. Также с помощью этого показателя можно оценить, какая из нестационарных моделей эффективнее, т.е. ею будет та модель, у которой Δ больше. Статистически значимое отличие σ_0 и $\sigma_{\text{нест}}$ оценивается по критерию Фишера как отношение $F = \sigma_0^2 / \sigma_{\text{нест}}^2$ [7].

Климатические изменения характеристик ледового режима

Рассматривались такие основные характеристики ледового режима рек, как наибольшая толщина льда за период ледостава ($L_{\text{макс}}$), продолжительность периода ледостава в сутках ($T_{\text{лед}}$), даты начала ($T_{\text{нач}}$) и окончания ($T_{\text{кон}}$) ледостава в сутках от начала года. Прежде всего, оценивалась стационарность дисперсий и средних значений по известным критериям Фишера и Стьюдента соответственно [11, 16]. Для этой цели многолетние временные ряды характеристик ледового режима разбивались на две равные части и для каждой из них определялись дисперсии и средние значения, на основе которых рассчитывались статистики критериев. Эти расчетные значения статистик (S_p) сравнивались с критическими (S_{kp}) при заданных уровнях значимости α , равных 1, 3 и 5 %.

Результаты оценки стационарности приведены в табл. 2, где знаком «+» отмечено принятие гипотезы стационарности при уровне значимости $\alpha = 5\%$, а знаком «-» отклонение гипотезы при $\alpha = 1\%$. В диапазоне α от 1 до 5% гипотезу стационарности можно условно принять или отклонить. Поэтому в табл. 2 знаком «(+» обозначено условное принятие гипотезы стационарности при $\alpha = 3\%$ ($S_p < S_{кр}$), а знаком «(-)» — условное отклонение этой гипотезы при $\alpha = 3\%$ ($S_p > S_{кр}$). В случае условного принятия или отклонения гипотезы стационарности в табл. 2 приводится также и уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики критерия.

Как следует из табл. 2, стационарными можно считать только многолетние ряды значений наибольшей толщины льда на реках. Для рядов остальных характеристик ледового режима гипотеза стационарности средних значений отклоняется при $\alpha = 5\%$ в четырех случаях из 11 для продолжительности ледостава, в четырех случаях для даты начала и в пяти случаях для даты окончания ледостава. Рядов, нестационарных по дисперсиям при $\alpha = 5\%$, всего пять, а если считать, что гипотезу стационарности можно условно принять в трех случаях из пяти, то для оставшихся двух случаев нестационарность дисперсии обусловлена влиянием отдельных аномальных экстремумов.

Таблица 2

Результаты оценки стационарности многолетних рядов характеристик ледового режима по критериям Фишера (Φ) и Стьюдента ($Ст$)

Код поста	L_{\max}		$T_{\text{лед}}$		$T_{\text{нач}}$		$T_{\text{кон}}$	
	Φ	$Ст$	Φ	$Ст$	Φ	$Ст$	Φ	$Ст$
3035	+	+	(+) 4,6	(-)2,4	+	(-)1,6	(+)4,4	+
3045	+	+	+	-	+	(-)2,8	+	+
3047	+	+	+	+	(-)2,1	+	+	(+)3,6
3168	+	+	+	-	+	-	+	-
3169	+	+	+	+	+	+	+	(+)3,4
3172	+	+	+	(-)2,9	+	-	+	+
3180	+	+	+	+	+	+	+	(-)2,6
3219	+	+	+	+	+	+	+	(-)2,1
3225	+	+	+	+	(-)1,7	+	+	+
3248	(+)4,3	+	+	+	+	+	+	(+)4,3
3264	+	+	+	+	+	+	+	+

В целом же оценка стационарности дисперсий и средних за два одинаковых полупериода временного ряда имеет свои ограничения, так как год разделения на две подвыборки варьировал от 1982 до 1989 г. из-за разной продолжительности рядов. Поэтому если изменения начались в конце 1980-х годов, то их нельзя было выявить, если дата полупериода относилась к началу 1980-х.

Следующий способ оценки климатических изменений основан на применении двух моделей нестационарного среднего: линейный тренд и ступенчатые изменения. Результаты оценки эффективности нестационарных моделей приведены в табл. 3 для трех характеристик ледостава: $T_{\text{лед}}$, $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{кон}}$.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей

Код поста	$T_{\text{лед}}$				$T_{\text{нач}}$				$T_{\text{кон}}$			
	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	R	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	R	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	R
3035	14,5	18,6	1997	-0,52	4,7	6,2	2005	0,17	10,5	14,1	1997	-0,45
3045	7,8	12,3	1989	-0,39	1,5	7,6	1987	-0,01	7,7	11,3	2005	-0,38
3047	4,6	9,2	2005	-0,3	0	1,6	1977	0,32	13,1	14,9	2005	-0,49
3168	16,9	21,8	1988	-0,56	5,1	10,6	1991	0	12,4	11,8	1988	-0,48
3169	3,8	5,5	1989	-0,27	0	1,5	1977	0,27	13	15,1	2005	-0,49
3172	5,9	8,4	1988	-0,34	3,8	8,5	1989	-0,02	2,8	4,2	2006	-0,24
3180	4,9	7,2	1989	-0,31	0	2,7	1969	0,24	13,8	14,7	1997	-0,51
3219	8,2	12,8	1990	-0,4	3	9,1	2003	0,31	8,5	8,4	2005	-0,4
3225	10,7	14	1996	-0,45	4,9	12	1995	0,13	7,5	9,4	1966	-0,38
3248	3,5	5,3	2006	-0,26	0,8	5,9	2006	0	3,6	6,8	1966	-0,27
3264	5,3	13,9	1998	-0,32	0	7,5	1974	0,17	12,4	12,9	1970	-0,48
Среднее	7,8	11,7			2,2	6,6			9,6	11,2		

Примечания: 1. $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ст}}$ — показатели эффективности (%) нестационарных моделей тренда и ступенчатых изменений; $T_{\text{ст}}$ — год ступенчатого перехода от одного стационарного режима к другому; R — коэффициент корреляции линейного тренда. 2. Жирным шрифтом выделены случаи статистически значимых R при $\alpha = 5\%$ и эффективных моделей при $\Delta \geq 10\%$.

Для многолетних рядов максимальной толщины льда только в одном случае (р. Тимптон — с. Усть-Тимптон (3248)) коэффициент корреляции модели линейного тренда статистически значим и равен $R = -0,44$, а также $\Delta_{\text{тр}} = 10,2\%$ и $\Delta_{\text{ст}} = 11,3\%$.

В целом из анализа результатов, представленных в табл. 3, можно сделать вывод о том, что имеет место уменьшение продолжительности периода ледостава, что связано в основном с более ранней датой окончания ледостава и в меньшей степени с более поздней датой его начала. На отдельных реках, таких как Лена, Чара, Учур, изменение характеристик ледового режима существенно, а на других (Тимптон, Ньюжа) проявляется пока достаточно слабо. Еще один вывод состоит в том, что в случае нестационарных моделей модель ступенчатых изменений эффективнее, чем модель линейного тренда, так как средние значения $\Delta_{\text{тр}} < \Delta_{\text{ст}}$. Примеры нестационарных рядов продолжительности ледостава, дат его начала и окончания приведены на рис. 3—5.

На основании предложенных нестационарных моделей для характеристик ледового режима были также определены численные значения изменения продолжительности ледостава и дат его начала и окончания, которые приведены в табл. 4 для модели ступенчатых изменений ($\Delta_{\text{ст}}$) и тренда ($\Delta_{\text{тр}}$). В таблице, кроме того, приводится среднее квадратическое отклонение (СКО) многолетнего ряда (σ) и жирным шрифтом выделены ситуации, когда установленные изменения превышают СКО.

Приведенные в табл. 4 результаты свидетельствуют о том, что продолжительность ледостава уменьшается на 5—15 дней в зависимости от реки и выбранной

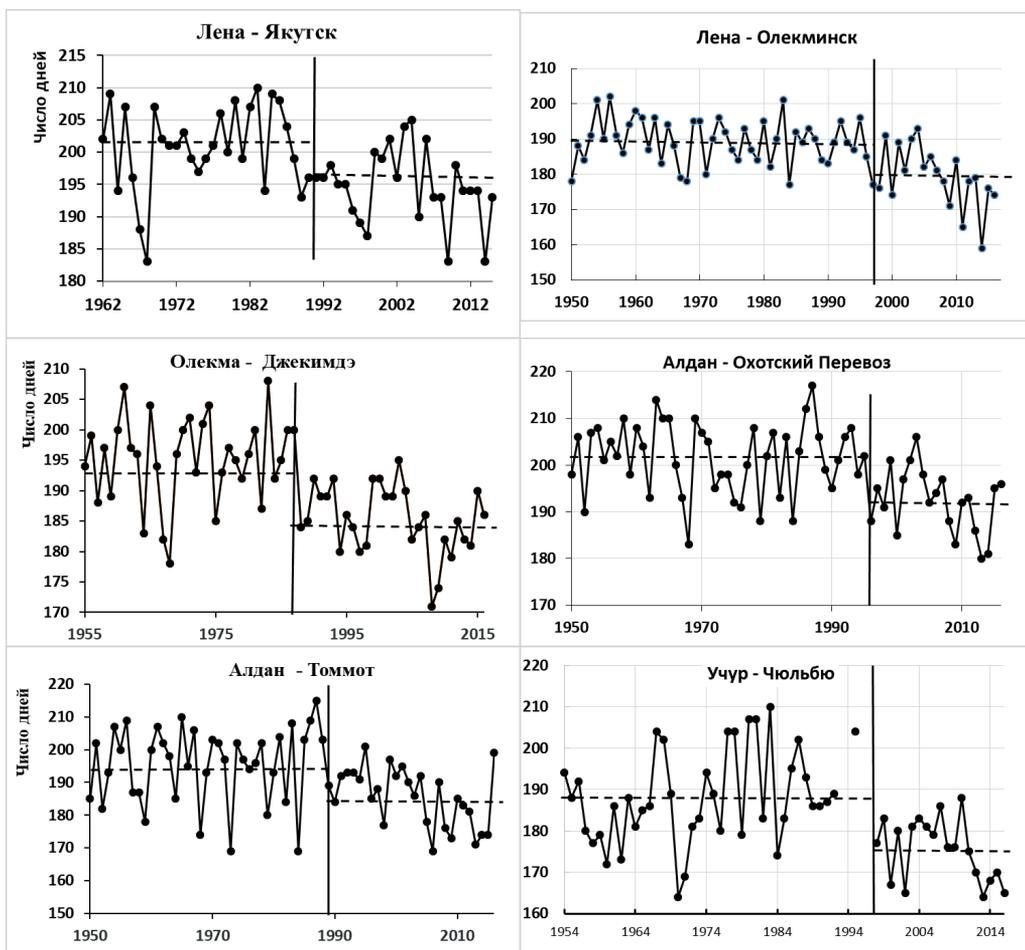


Рис. 3. Нестационарные временные ряды продолжительности (число дней) периода ледостава.

нестационарной модели. При этом по модели линейного тренда получаются более завышенные значения (в среднем на 2—3 дня), так как она учитывает отдельные экстремумы в начале и конце ряда. Превышение СКО имеет место в четырех случаях для модели ступенчатых изменений и в девяти случаях для модели линейного тренда; двойного превышения СКО (2σ) не наблюдается ни в одном случае. Дата начала ледостава наступает в среднем на 3—4 дня позже, хотя вариация существенна и составляет 0—8 дней. Это увеличение меньше естественной изменчивости или сопоставимо с ней. Дата окончания ледостава наблюдается раньше на 2—11 дней (в среднем на 5—8 дней), причем превышение СКО имеет место в трех случаях для модели ступенчатых изменений и в восьми случаях для модели линейного тренда. Двойного превышения СКО не отмечалось ни в одном случае.

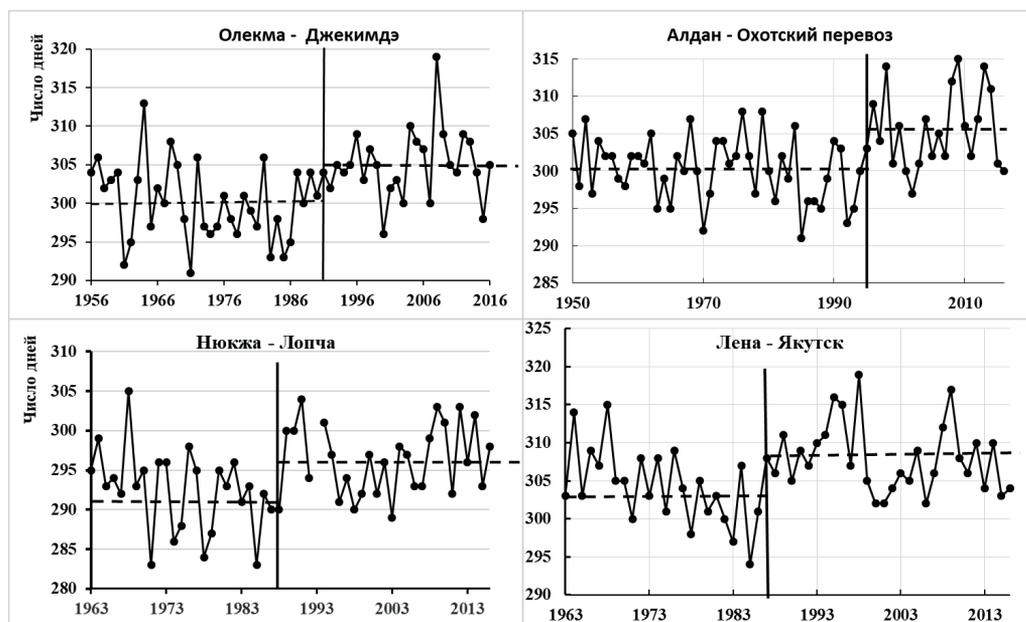


Рис. 4. Нестационарные временные ряды дат начала ледостава (число дней от начала года).

Таблица 4

Климатические изменения (число дней) продолжительности ледостава $T_{\text{лед}}$, дат его начала $T_{\text{нач}}$ и окончания $T_{\text{кон}}$ для разных рек

Код поста	Река — пункт	$T_{\text{лед}}$			$T_{\text{нач}}$			$T_{\text{кон}}$		
		$\Delta_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$	σ	$\Delta_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$	σ	$\Delta_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$	σ
3035	Лена — Олекминск	-10	-14	8,4	+3	+5	4,8	-7	-9	6,0
3045	Лена — Якутск	-7	-8	6,7	+3	+3	5,0	-4	-6	4,6
3047	Лена — Кангалассы	-7	-9	7,7	+1	0	6,2	-6	-8	4,7
3168	Олекма — Джекимдэ	-10	-15	8,1	+5	+6	5,3	-5	-9	5,8
3169	Олекма — Куду-Кёль	-5	-7	7,7	+1	0	5,8	-4	-8	4,7
3172	Нюкжа — Лопча	-6	-9	7,9	+4	+5	5,1	-2	-4	5,7
3180	Чара — Токко	-8	-11	9,6	+1	0	7,2	-7	-11	6,3
3219	Алдан — Томмот	-9	-15	11,6	+6	+8	9,1	-3	-8	5,7
3225	Алдан — Охотский Перевоз	-10	-13	8,5	+6	+6	5,2	-4	-7	5,2
3248	Тимптон — Усть-Тимптон	-9	-10	11,4	+7	+4	9,1	-2	-6	7,1
3264	Учур — Чюльбю	-13	-12	11,8	+7	0	9,8	-6	-11	6,8
	Среднее	8,5	11,2	9,0	4,5	3,4	6,6	4,5	7,9	5,7

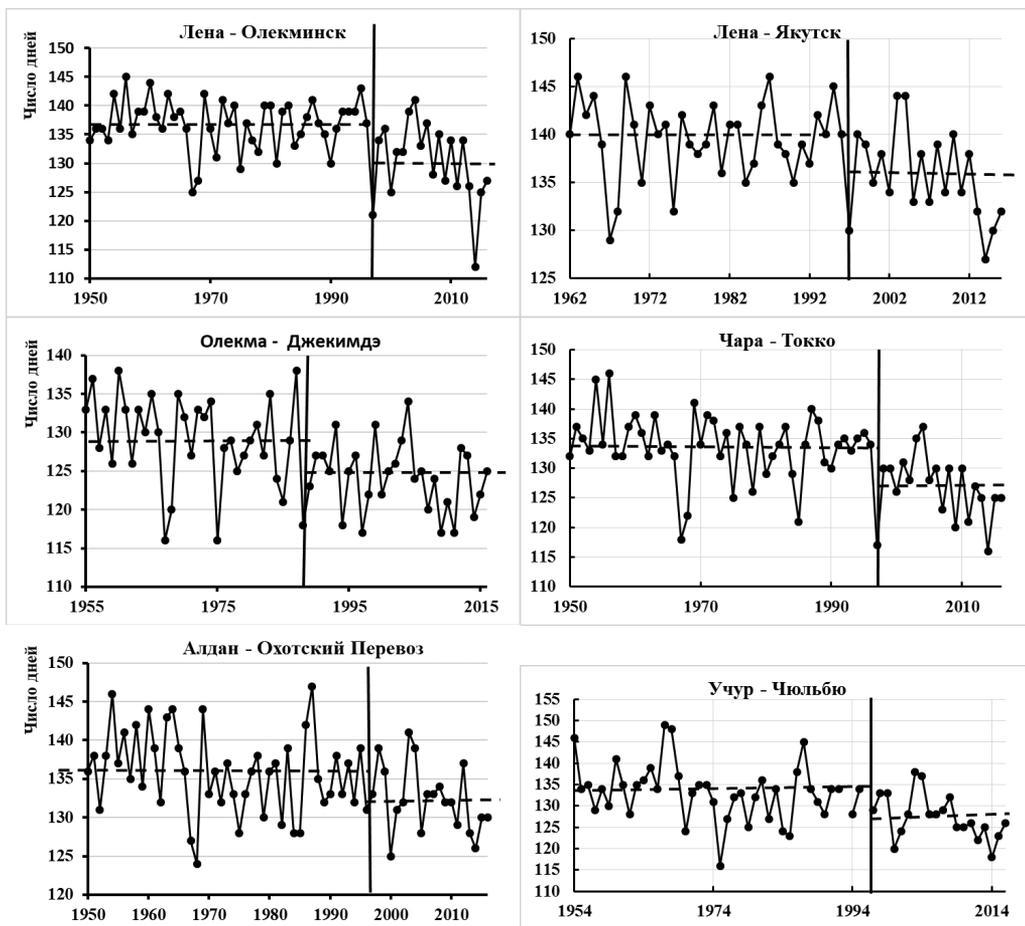


Рис. 5. Нестационарные временные ряды дат окончания ледостава (число дней от начала года).

Климатические изменения характеристик уровенного режима

Помимо продолжительности ледостава и дат его начала и окончания, рассматривались также и характерные уровни зимнего и весеннего периодов: максимальный речной уровень начала ледостава ($H_{\text{лдст}}$), максимальный уровень ледохода ($H_{\text{лдох}}$), максимальной заторный уровень ($H_{\text{зат}}$), а также для сравнения с ними максимальный за год уровень воды ($H_{\text{год}}$), которые обычно наблюдаются в период весеннего половодья.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей приведены в табл. 5 для трех характерных уровней: $H_{\text{лдст}}$, $H_{\text{лдох}}$ и $H_{\text{год}}$.

Таблица 5

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей уровней воды

Код поста	$H_{\text{лдст}}$				$H_{\text{лдж}}$				$H_{\text{год}}$			
	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	R	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	R	$\Delta_{\text{тр}}$	$\Delta_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	R
3035	1,3	7,6	2005	0,16	0,0	3,9	1197	0,02	1,7	6,6	1992	0,18
3045	0,4	0,5	1985	0,09	0,9	5,6	1998	0,13	1,3	6,2	1998	0,16
3047	5,5	13,3	1999	0,33	2,2	9,1	1998	0,21	3,6	11,6	1998	0,27
3168	9,6	12,8	1994	0,43	0,1	1,6	1994	0,05	0,5	3,1	2001	0,10
3169	2,6	4,8	1998	0,23	0,0	1,1	1965	0,00	0,7	2,4	1996	0,12
3172	15,9	13,5	2007	0,54	2,1	4,5	2001	-0,20	0,6	2,2	1981	-0,11
3180	14,6	25,2	2003	0,52	2,9	10,2	1998	0,24	1,0	3,2	2006	0,14
3219	8,8	16,3	1997	0,41	0,1	0,6	1996	-0,04	0,2	2,2	1992	0,07
3225	2,8	7,5	2000	0,24	0,2	2,8	1996	0,06	0,0	0,8	1994	0,02
3248	11,6	17,5	1998	0,47	0,1	1,9	1997	0,03	0,6	2,3	1974	-0,11
3264	1,3	9,2	2002	0,16	0,6	3,6	1997	0,11	0,4	2,1	1984	-0,09
Среднее	6,8	11,6			0,8	4,1			1,0	3,9		

Из таблицы следует, что нестационарность проявляется только в половине многолетних рядов максимального уровня начала ледостава, который увеличивается. Для других максимальных уровней (ледохода и максимальных в году) проявление нестационарности средних практически отсутствует. Временные нестационарные ряды максимального уровня начала ледостава приведены на рис. 6.

Средние значения максимального уровня в начале ледостава для нестационарных рядов, приведенных на рис. 6, возросли на 51—83 см в зависимости от пункта наблюдений, что во всех шести случаях превышает СКО, но максимум — в 1,5 раза (для пункта 3180 Чара — Токко).

Увеличение в последние годы максимального уровня начала ледостава является следствием изменения характера образования льда в осенний период. Смещение дат начала образования ледяного покрова на более поздние приводит к увеличению продолжительности шугохода и объема шуги. Русло реки к этому времени уже оказывается частично заполнено шугой.

Эти процессы приводят к увеличению вероятности возникновения заторов льда в период весеннего половодья, максимальный уровень которых часто является причиной мощных наводнений и затопления огромных территорий, как это было, например, в Якутске в 1998 и 1999 гг. и в Ленске в 2001 г. [2, 17]. Наиболее затороопасным является участок р. Лены у поста 3047 Лена — Кангалассы, где с конца 1980-х годов повторяемость максимального уровня заторного происхождения увеличилась в два раза: с девяти до 19 случаев. В ряду максимального уровня по посту 3169 Олекма — Куду-Кель более 50 % значений (47 из 67) заторного генезиса. По другим створам исследуемого района число случаев максимального заторного уровня в рядах составило от четырех (пункт 3219) — пяти (пункт 3225) до 23 (пункт 3168) — 28 (пункт 3047). Поэтому проверка на стационарность при таком ограниченном материале свидетельствует об отсутствии статистически значимой стационарности в средних значениях этих рядов.

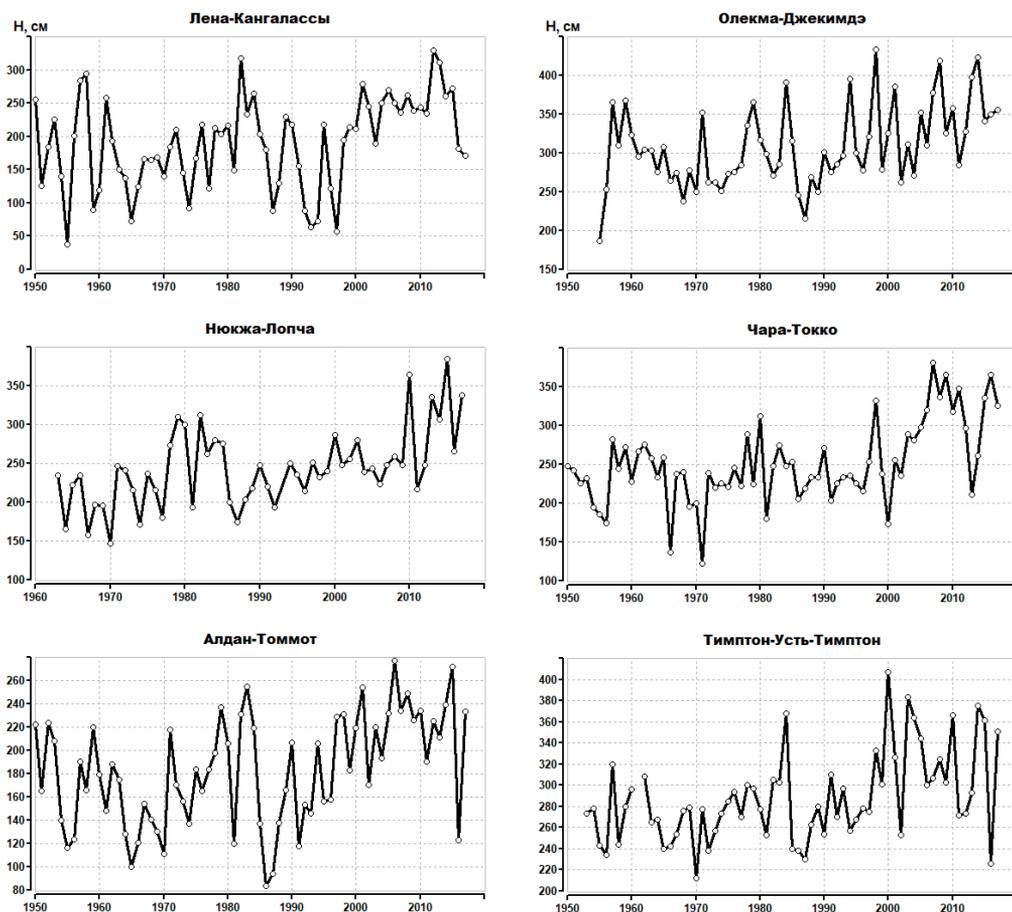


Рис. 6. Нестационарные временные ряды максимального уровня (см) начала ледостава.

Хотя наводнения заторного характера наблюдаются не ежегодно, причиняемый ими материальный ущерб достигает многих миллионов рублей. Поэтому исследование причин их формирования, разработка основанных на учете осенних и весенних факторов методик прогноза максимального уровня начала ледостава, максимальной толщины льда, температуры воздуха в зимний период, а также оценка потенциального риска затопления хозяйственно освоенных территорий являются актуальными [5].

Заключение

В результате выполненного исследования характеристик ледового режима на реках Республики Саха (Якутия) можно сделать следующие выводы.

1. Максимальная толщина льда на реках пока остается практически стационарной и статистически значимого ее уменьшения не наблюдается.

2. Продолжительность ледостава на реках уменьшилась на 1—2 недели в зависимости от конкретного речного водосбора; это уменьшение превышает естественную изменчивость (хотя пока и ненамного — в среднем на 20 %) и наблюдается в 80 % случаев.

3. Продолжительность ледостава уменьшилась в основном за счет более ранней даты окончания ледостава: в среднем на 6—8 дней при вариации от 2 до 11 дней. При этом превышение естественной изменчивости имело место в 72 % случаев.

4. Начало ледостава сдвигается на более поздние сроки. Это смещение составляет в среднем всего 3—4 суток с максимумом 8 суток, а превышение над естественной изменчивостью составляет не более 15 % и отмечается всего в 18 % случаев.

5. Из характерных зимних уровней воды нестационарность проявляется лишь в многолетних рядах максимального уровня начала ледостава, который возрастает. Хотя это увеличение отмечается только для половины рядов и превышает естественную изменчивость максимум на 50 %, это существенно повышает значимость осеннего фактора в процессах образования максимальных заторных уровней.

6. Установлено, что в случае нестационарных средних модель ступенчатых изменений является более эффективной для временных рядов, чем модель линейного тренда, которая к тому же за счет учета экстремумов в начале и в конце ряда завывает сами эти изменения на 20—30 %.

Список литературы

1. Алексеев Г.В., Данилов А.И., Кацов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е. Морские льды Северного полушария в связи с изменением климата в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 6. С. 723—735.
2. Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженов А.В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55—61.
3. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Шендер Н.И. Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии / В сб.: Труды 10-й Междунар. конф. по мерзлотоведению. Салехард: Печатник, 2012. Т. 3. С. 47—52.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: изд-во ИГКЭ, 2015. 1008 с.
5. Горошкова Н.И., Стриженов А.В. Происхождение и потенциальный риск заторных наводнений на реках Восточной Сибири / В сб.: Доклады IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб: изд-во Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, 2016.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Ожидаемые и наблюдаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД, 2012. 194 с.
7. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
8. Кириллина К.С., Лобанов В.А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории республики Саха (Якутия) // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 137—151.

9. *Кобышева Н.В., Наровлинский Г.Я.* Климатологическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 295 с.
10. *Лобанов В.А., Шадурский А.Е.* Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 73—88.
11. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Учебное пособие. Часть 1. СПб, 2011. 144 с.
12. *Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Учебное пособие. Часть 2. СПб, 2012. 141 с.
13. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн.1. СПб: изд-во РГГМУ, 2016. 332 с.
14. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2 Динамика климата. Кн. 2. СПб: изд-во РГГМУ, 2018. 377 с.
15. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
16. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
17. *Рождественский А.В., Бузин В.А., Лобанов В.А.* Исследование условий формирования и расчеты максимальных уровней воды на р. Лене у г. Ленска // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 68—76.

**ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ
МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛООБМЕНА ПОВЕРХНОСТИ
ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ПРИВОДНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА
ДЛЯ ПЕРИОДА ОТКРЫТОЙ ВОДЫ**

А.В. Пилипенко

Российский государственный гидрометеорологический университет,
pilipenko.an.12@gmail.com

Получены эмпирические зависимости между параметрами теплообмена поверхности Ладожского озера с атмосферой для различных лимнических районов Ладожского озера для процессов сезонного нагревания и охлаждения. Эти зависимости могут быть использованы при оценках испарения и турбулентного потока тепла в приводном слое воздуха. На основе средних многолетних данных получены уравнения изменения градиентов температуры и влажности в приводном слое воздуха для процессов нагревания и охлаждения для лимнических районов Ладожского озера. Полученные результаты могут быть использованы при количественных оценках неравномерности прихода тепла на акваторию озера при возможных климатических изменениях температуры поверхности воды Ладожского озера.

Ключевые слова: Ладожское озеро, температура поверхности воды, температура воздуха, влажность воздуха, давление насыщенного пара, теплообмен, гистерезис.

**EMPIRICAL RELATIONS BETWEEN HEAT EXCHANGE
PARAMETERS OF LAKE LADOGA SURFACE WITH AIR
BOUNDARY LAYER FOR THE OPEN WATER PERIOD**

A.V. Pilipenko

Russian State Hydrometeorological University

Empirical relations between the heat exchange parameters of Lake Ladoga surface and the atmosphere for various limnic regions of Lake Ladoga for the processes of seasonal heating and cooling are obtained. These relations can be used in estimating evaporation and turbulent heat fluxes in the air boundary layer. On the basis of the average long-term data, the equations of temperature gradients and humidity gradients in the air boundary layer for the heating and cooling process for the limnic areas of Lake Ladoga are obtained. The results obtained can be used for quantitative estimates of the irregularity of the arrival of heat in the lake's water area with possible climatic changes in the surface temperature of the water of Lake Ladoga.

Keywords: Lake Ladoga, water surface temperature, air temperature, air humidity, vapour pressure, heat exchange, hysteresis.

Введение

Ладожское озеро оказывает значительное влияние на окружающие его районы суши и создает особые условия взаимодействия поверхности воды и приводного слоя воздуха над акваторией. Процессы внешнего теплообмена определяют пространственно-временную структуру теплового баланса поверхности и всей

водной толщии озера [1]. В самом озере происходит взаимодействие гидрологических, физических, химических, биологических, геоморфологических и геологических процессов.

Для рассмотрения особенностей процессов обмена теплом необходимо знать закономерности распределения гидрометеорологических элементов в приводном слое. В зависимости от термической стратификации, от трансформации воздушного потока при определенных условиях во времени и пространстве процессы обмена могут быть направлены от водной поверхности или к ней и протекать с различной интенсивностью. Направление процессов теплообмена определяется градиентами температуры (ΔT) и влажности (Δe) в приводном слое. Как известно, турбулентный теплообмен с воздухом (P) в значительной степени зависит от разности температуры воды и температуры воздуха ($\Delta T = T_w - T_a$), а затраты тепла на испарение (LE) зависят от разности значений давления насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давления водяного пара в приводном слое ($\Delta e = e_w - e_a$). Безусловно, на потоках тепла существенно сказывается ветровое воздействие, однако оно не приводит к изменению их направленности — к поверхности озера или от нее, поэтому в данной работе рассматриваются параметры, ответственные за знак потоков тепла, и не учитывается изменчивость ветра [2].

Оценки потоков тепла (P и LE) для различных периодов, выполненные А.Ф. Изотовой в 1960—1970-х годах, показывают, что потоки тепла прямо пропорциональны скорости ветра и их значения для районов Ладоги со слабыми ветрами (восточный, западный, шхерный) составляют: LE в мае 2,25; 1,10 и 1,30 ккал/(см²·мес) соответственно; в ноябре 1,23; 1,38 и 1,24 ккал/(см²·мес) соответственно; P в мае -0,26; -1,11, и -1,04 ккал/см²·мес соответственно, в ноябре 0,45; 0,51 и 1,06 ккал/(см²·мес) соответственно; для центрального южного и центрального северного районов, которые отличаются сильными ветрами: LE в мае -1,27 и -0,17 ккал/(см²·мес) соответственно, в ноябре 3,31 и 3,04 ккал/(см²·мес) соответственно; P в мае -0,65 и -0,54 ккал/(см²·мес) соответственно, в ноябре 2,96 и 2,63 ккал/(см²·мес) соответственно [3].

Целью настоящего исследования является установление эмпирических зависимостей между существенными параметрами теплообмена поверхности озера с атмосферой: температурой воздуха и температурой воды, а также давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давлением водяного пара в воздухе в зависимости от распределения глубины озера. Эти зависимости затем могут быть использованы при оценках испарения с поверхности озера и турбулентного теплообмена между водной поверхностью и атмосферой.

Как известно, Ладожское озеро — крупнейшее озеро Европы: его площадь составляет 18 329 км², из которых 457 км² приходится на острова. Объем водной массы озера равен 848 км³, длина береговой линии без учета длины береговой линии островов — 1570 км. Начало ледовых явлений на Ладоге приходится на конец ноября, а таяние ледяного покрова в среднем приходится на период с начала до середины мая [4]. Озеро — димиктическое, полностью стратифицировано с момента исчезновения термобара в конце июня до возникновения осеннего термобара в ноябре [6].

Материалы и методы исследования

База данных, созданная в Институте озероведения РАН и послужившая основой для дальнейшего изучения теплового состояния воды и приводного слоя воздуха озера, включает в себя данные более 300 000 измерений гидрометеорологических параметров за период с 1897 по 2012 г. (рис. 1 *а*). Измерения проводились ежегодно за указанный период в каждой точке на высоте 2 м над поверхностью воды. На карте (см. рис. 1 *а*) хорошо видны стандартные разрезы и районы наиболее интенсивных измерений.

В настоящей работе в качестве исходных данных использовались значения температуры поверхности воды и приводного воздуха, а также значения абсолютной влажности воздуха за период открытой воды.

Лимническое районирование Ладожского озера было проведено в зависимости от распределения глубины, и все дальнейшие расчеты выполнены на его основе. Озеро было разбито на шесть районов (рис. 1 *б*): мелководный (глубина 0—18 м), переходный (18—50 м), район озерного уступа (50—70 м), склоновый (70—100 м), глубоководный (100—140 м) и район впадин (более 140 м) [6].

На рис. 2 показано распределение числа измерений всех исследуемых параметров в зависимости от месяца. Из рисунка видно, что наиболее благоприятные месяцы для измерений летние (июнь, июль, август) — здесь количество данных больше почти в два раза, чем в октябре и ноябре (минимальное число измерений

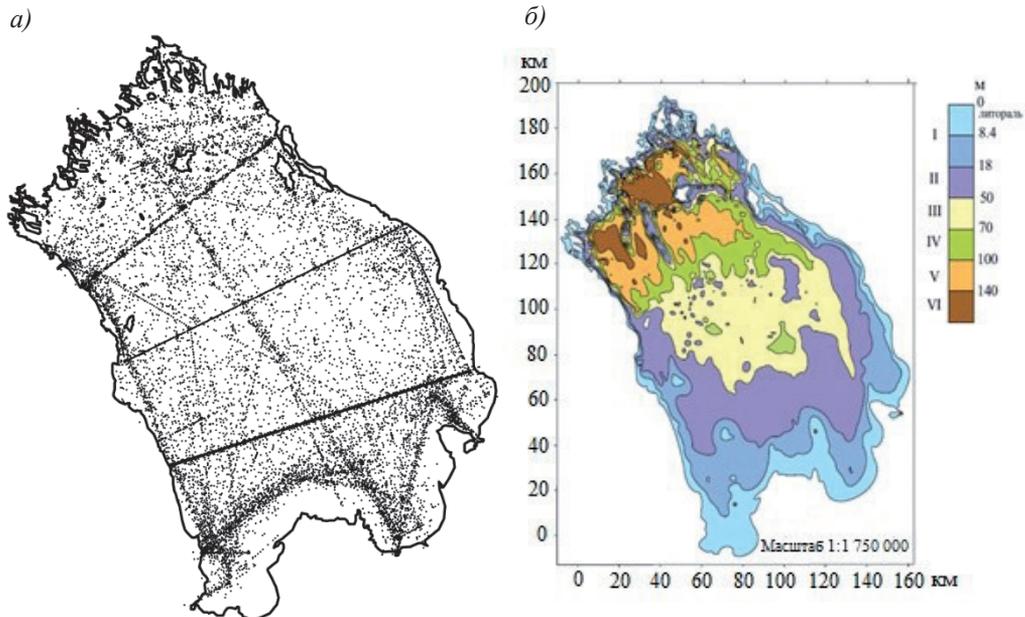


Рис. 1. Характеристики Ладожского озера [4].

а — распределение станций наблюдений по акватории Ладожского озера,
б — лимническое районирование Ладожского озера.

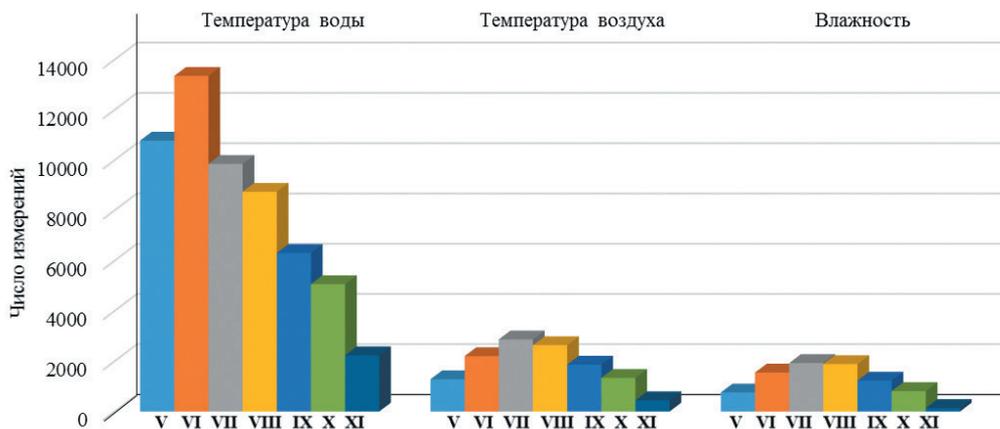


Рис. 2. Распределение числа наблюдений по всем исследуемым параметрам в зависимости от месяца для периода май — ноябрь.

2 тыс.). Самый большой объем данных собран по температуре воды (14 тыс. измерений), количество данных о температуре воздуха и влажности различается незначительно.

Расчет среднего многолетнего сезонного хода указанных характеристик был выполнен для каждого из выделенных районов Ладожского озера по всем данным вне зависимости от года наблюдений за период открытой воды (с 5 мая по 25 ноября) с целью изучения статистически обоснованных изменений пространственных термических структур озера. Осреднение проводилось для синоптического периода (10 суток) с перекрытием 5 суток, что позволило сгладить пространственно-временные вариации в каждом районе [8].

Отсутствие количественных оценок параметров теплообмена LE и P сдерживает работы по моделированию термогидродинамических процессов, происходящих в Ладожском озере.

Обсуждение результатов

На рис. 3 и 4 представлены зависимости между значениями температуры поверхности воды и воздуха и значениями давления насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давления водяного пара в приводном слое. Зависимости построены по среднедекадным данным за период с 5 мая по 25 ноября для каждого из шести лимнических районов Ладожского озера для периода весеннего нагревания (май — начало августа) и осеннего охлаждения (август — конец ноября).

Процесс нагревания отличается от процесса охлаждения, и степень этих отличий зависит от района озера, т.е. определяется распределением глубины. Очевидно (рис. 3), что в Ладожском озере существует температурный гистерезис для каждой из шести лимнических зон.

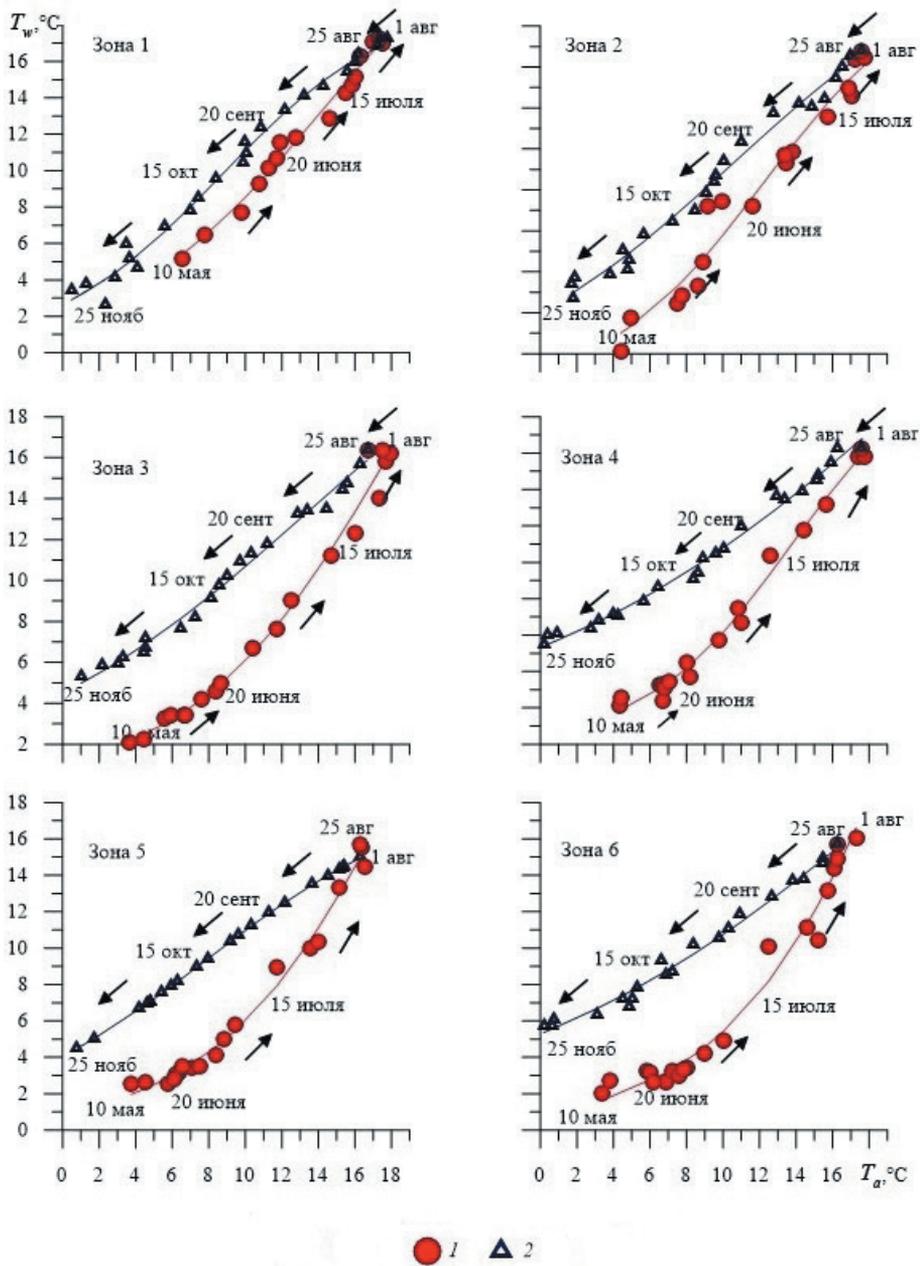


Рис. 3. Гистерезис связи между температурой воды (T_w) и температурой воздуха (T_a) для шести лимнических зон Ладожского озера, полученный на основе средних многолетних данных.

1 — процесс нагревания, 2 — процесс охлаждения.

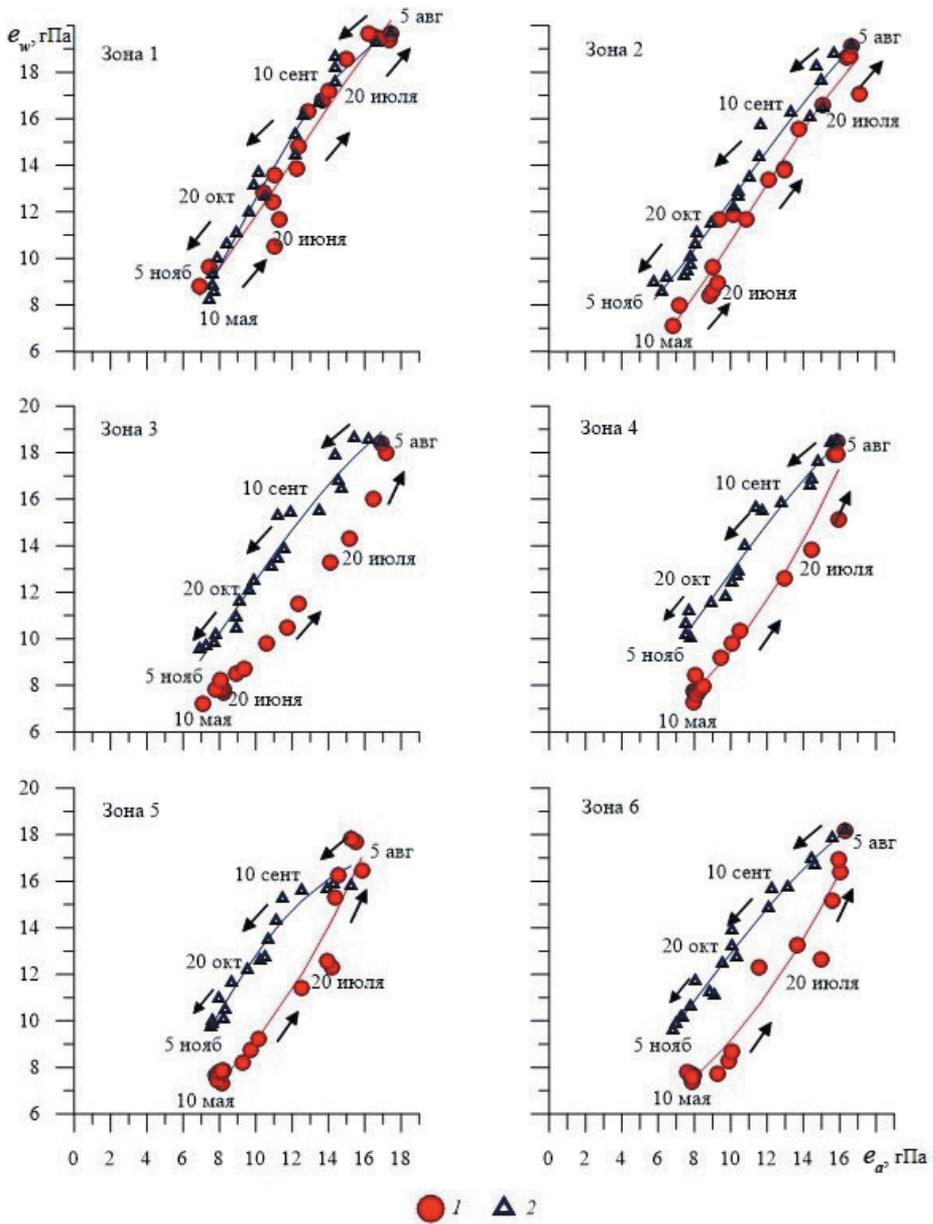


Рис. 4. Гистерезис связи между давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды (e_w) и давлением водяного пара в приводном слое (e_a) для шести лимнических зон Ладожского озера, полученный на основе средних многолетних данных.

1 — процесс нагревания, 2 — процесс охлаждения.

В различных частях озера нагревание и охлаждение водной толщи протекают по-разному в зависимости от распределения глубины. В связи с этим и форма кривых получается разная. Наиболее ярко выражены эти различия между мелководной (зона 1) и глубоководной (зона 5) зонами. Для зоны 5 (глубоководной) и зоны 6 (района впадин) наблюдается сходство временного хода температуры воздуха и температуры воды, так как речь идет о глубине более 100 м и, соответственно, процесс нагревания происходит в этих зонах медленнее, чем в мелководной, и охлаждается мелководная зона достаточно равномерно и значительно быстрее, чем глубоководная. Можно заметить, что с переходом от зоны к зоне увеличивается расхождение между линией нагревания и линией охлаждения. Это свидетельствует о том, что различие между скоростью нагревания и скоростью охлаждения зависит от глубины зоны, и, чем глубже, тем больше эти различия.

Гистерезис влажности для каждой из шести лимнических зон Ладожского озера представлен на рис. 4. Полученные результаты свидетельствуют о неравномерности прихода тепла на акваторию Ладоги за счет затрат тепла на испарение LE в зависимости от распределения глубины; это подтверждает и разная форма кривых. Наиболее ярко выраженные различия наблюдаются между мелководной (зона 1) и глубоководной (зона 5) зонами. Таким образом, результаты совпадают с выводами, полученными относительно температурного гистерезиса. В мелководной зоне (зона 1) скорости нагревания и охлаждения совпадают, в переходной зоне (зона 2) отмечается незначительное расхождение, и далее, с увеличением глубины, расхождение в скоростях становится все более заметным.

Следует отметить, что в 1970-х годах Т.Б. Форш-Меншуткиной и В.В. Меншуткиным [5] был экспериментально обнаружен кислородный гистерезис в олиготрофных озерах и дано его математическое описание. Были получены теоретические кривые кислородного гистерезиса, рассчитанные по уравнениям, похожим на используемые в данном исследовании, что указывает на подобие температурного и кислородного гистерезиса в озерах.

Для выполнения дальнейших исследований полученная зависимость между температурой воды и температурой воздуха была аппроксимирована уравнением, опубликованным в отчете по исследованию Канадских озер [9]:

$$T_w = \frac{a}{1 + e^{y(b-T_a)}}, \quad (1)$$

где T_w — температура воды; a , b , y — эмпирические коэффициенты; T_a — температура воздуха.

Аналогичная форма уравнения была использована для количественной оценки зависимости между давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды (e_w) и давлением водяного пара в приводном слое (e_a).

На основе средних многолетних данных и результатов проведенных расчетов (см. уравнение (1)) были получены уравнения, описывающие процессы нагревания и охлаждения, для всех шести лимнических зон Ладожского озера для

градиентов температуры и влажности. В табл. 1 и 2 приводятся эмпирические коэффициенты, входящие в полученные уравнения.

Для сравнения результатов были вычислены статистические характеристики (см. табл. 1 и 2): число данных (n), коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратическое отклонение (СКО). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что зависимости (см. рис. 3 и 4) могут быть использованы для дальнейших расчетов.

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты, входящие в уравнения вида (1) зависимости между температурой воды и температурой воздуха, и статистические характеристики, полученные по этим уравнениям, для всех лимнических зон Ладожского озера

Зона	Нагревание						Охлаждение					
	Коэффициент			n	R^2	СКО, °C	Коэффициент			n	R^2	СКО, °C
	a	b	y				a	b	y			
1	26,82	14,29	0,18	18	0,99	3,54	19,49	8,68	0,21	23	0,98	5,91
2	20,69	12,23	0,23	18	0,99	4,12	22,61	10,57	0,14	23	0,98	5,91
3	33,29	18,18	0,18	18	0,97	4,61	26,44	13,26	0,12	23	0,98	5,29
4	21,91	13,74	0,25	18	0,97	4,99	41,18	21,89	0,09	23	0,99	5,16
5	39,05	18,71	0,20	18	0,96	4,61	18,81	0,16	7,94	23	0,98	5,54
6	58,95	22,31	0,19	18	0,95	4,24	38,04	20,44	0,09	23	0,98	4,89

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты, входящие в уравнения вида (1) зависимости между давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды и давлением водяного пара в приводном слое, и статистические характеристики, полученные по этим уравнениям, для всех лимнических зон Ладожского озера

Зона	Нагревание						Охлаждение					
	Коэффициент			n	R^2	СКО, гПа	Коэффициент			n	R^2	СКО, гПа
	a	b	y				a	b	y			
1	27,96	11,85	0,17	18	0,93	3,20	21,55	8,78	0,28	20	0,96	3,17
2	24,22	11,13	0,20	18	0,96	3,41	25,91	10,44	0,16	22	0,97	3,34
3	475,87	51,85	0,09	16	0,97	3,62	22,81	9,02	0,20	21	0,96	3,09
4	296,06	42,20	0,11	16	0,95	3,38	23,93	9,17	0,18	18	0,96	2,85
5	625,01	48,73	0,11	16	0,93	3,10	18,11	7,03	0,30	20	0,94	2,89
6	424,62	48,27	0,10	18	0,92	3,54	22,15	8,21	0,19	16	0,96	2,55

Полученные результаты могут быть использованы при количественных оценках неравномерности прихода тепла на акваторию озера при возможных климатических изменениях температуры поверхности воды Ладожского озера [7]. Они подтверждают пространственно-временную неоднородность распределения параметров теплообмена в зависимости от лимнического районирования Ладожского озера.

Выводы

Установлены эмпирические зависимости параметров теплообмена, которые связывают температуру воды с температурой воздуха и давлением насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды с давлением водяного пара в приводном слое.

Эти зависимости могут быть использованы при оценках испарения и турбулентных потоков тепла в приводном слое воздуха. На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что распределение составляющих теплового баланса по акватории Ладожского озера — затрат тепла на испарение и турбулентного потока тепла — существенно зависит от распределения глубины воды в озере.

Представленные зависимости позволяют также исходя из предполагаемых климатических изменений и задавая значения температуры воздуха давать оценку изменениям температуры поверхности Ладожского озера. Кроме того, они могут быть использованы в качестве граничных условий в моделях термогидродинамических процессов, происходящих в Ладожском озере [7].

Список литературы

1. *Догановский А. М., Малинин В. Н.* Гидросфера Земли. СПб: Гидрометеоздат, 2004. 629 с.
2. *Изотова А. Ф.* Турбулентный тепло- и влагообмен больших озер. Л.: Наука, 1982. 144 с.
3. *Изотова А. Ф.* Турбулентный теплообмен и затраты тепла на испарение с поверхности Ладожского озера // Тепловой режим Ладожского озера // Труды лаборатории озераведения. 1968. Т. XXII. С. 100—143.
4. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под ред. В.А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
5. *Фори-Менишуткина Т.Б.* Кислородный гистерезис в олиготрофных озерах / В кн.: Вопросы современной лимнологии. Под ред. С.В. Калесника. Л.: Наука, 1973. 240 с.
6. *Науменко М.А.* Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Серия геогр. 2013. № 1. С. 62—72.
7. *Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г.* О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безледный период // Доклады РАН. 2006. Т. 408, № 5. С. 675—678.
8. *Науменко М.А., Каретников С.Г.* Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера / В кн.: Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. С. 16—49.
9. *Schertzer W.M., Taylor B.* Report to the Okanagan Water Supply and Demand Study on Lake Evaporation Assessment of the Capability to Compute Evaporation from Okanagan Lake, Other Mainstem Lakes and Basin Lakes and Reservoirs using the Existing Database // WSTD Contribution. 2009. No. 08-547. 102 p.

ОПЕРАТИВНЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА НЕАРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ

Е.С. Нестеров

Гидрометцентр России, nesterov@mecom.ru

Представлено краткое описание разработанных в Гидрометцентре России оперативных технологий прогноза основных характеристик, необходимых для гидрометеорологического обеспечения деятельности на неарктических морях России: волнения, течений, уровня, ледовых условий. Прогнозы ветрового волнения даются как для всей акватории морей, так и для отдельных прибрежных районов (проливов, бухт и т.д.). В прогнозах уровня особое внимание уделяется штормовым нагонам, а также прогнозу невских наводнений с учетом действующего комплекса защитных сооружений (дамбы). Анализируется современное состояние наблюдательной сети в Мировом океане. Указываются особенности гидрометеорологического обеспечения в меняющихся климатических условиях.

Ключевые слова: прогноз, оперативные технологии, неарктические моря, волнение, уровень моря, ледовые условия.

OPERATIONAL FORECASTING TECHNOLOGIES FOR HYDROMETEOROLOGICAL SUPPORT OF ACTIVITIES IN THE NON-ARCTIC SEAS OF RUSSIA

E.S. Nesterov

A brief description of the operational technologies developed in the Hydrometeorological Center of Russia for forecasting the main characteristics necessary for hydrometeorological support of activities in the non-Arctic seas of Russia (waves, currents, level, ice conditions) is given. Forecasts of wind waves are given for the entire water area of the seas, and for certain coastal areas (straits, bays, etc.). The forecasts of the level spare special attention to storm surges, as well as the forecast of the Neva floods, taking into account the existing complex of protective structures (dam). The current state of the observation network in the World ocean is analyzed. The features of hydrometeorological support in changing climatic conditions are specified.

Keywords: forecast, operational technologies, non-Arctic seas, waves, sea level, ice conditions.

Введение

Основной задачей оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности является подготовка и своевременное доведение до конечных потребителей прогнозов ветра, волнения, течений, уровня, температуры воды, ледовых условий и др., включая штормовые предупреждения об угрозе возникновения опасных явлений. Для решения этой задачи необходимо развитие наблюдательной сети, совершенствование технологий диагноза и прогноза основных

элементов погоды и состояния морей и океанов, а также развитие средств автоматизированного распространения данных наблюдений и прогностической продукции.

Для обеспечения безопасности мореплавания, жизнедеятельности населения и функционирования прибрежной индустрии наиболее важны прогнозы волнения, уровня, течений и ледовых условий. Основные задачи, проблемы и средства гидрометеорологического обеспечения морской деятельности достаточно подробно изложены в публикациях [1—3, 14, 15]. В настоящей работе дается краткий обзор методов и технологий диагноза и прогноза гидрометеорологических параметров, наиболее важных для обеспечения морской деятельности. В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны оперативные методы и технологии диагноза и прогноза гидрометеорологических параметров на неарктических морях России (ветер, волнение, течения, уровень, ледовые характеристики).

Наблюдательная сеть

Современное состояние наблюдательной сети в Мировом океане подробно описано в [7]. Основная тенденция состоит в том, что данные наблюдений должны оперативно распространяться по различным каналам (радиосвязь, спутники, Интернет) в центры сбора информации с минимальной задержкой по времени. Объем данных контактных наблюдений (буи, платформы, суда) остается небольшим по сравнению со спутниковой информацией. В дальнейшем эти данные кодируются и передаются в Глобальную систему телесвязи (ГСТ), прямой доступ к которой имеют только центры национальных метеорологических служб.

Для прогноза волнения важна информация с береговых гидрометеорологических станций (ГМС), с волновых буев, морских платформ и спутниковая альтиметрия. На 2017 г. в Мировом океане насчитывалось около 300 волновых буев и 50 платформ, которые распределены крайне неравномерно [7]. Спутниковые альтиметры дают информацию о высоте волн на больших акваториях с точностью до 0,5 м.

Информация об уровне моря состоит из данных измерений уровня на ГМС и спутниковой альтиметрии. Данные наблюдений уровня на российских станциях передаются в национальном коде КН-02 SEA. Альтиметрическая информация передается в виде аномалий уровня, которые отражают динамические процессы в океанах и морях (абсолютную динамическую топографию, геострофические течения).

Информация о морском льде состоит из результатов наблюдений на ГМС и спутниковых данных. Данные наблюдений различных ледовых характеристик на российских станциях передаются в коде КН-02 SEA [10]. Спутниковая информация о ледовом покрове включает в себя такие характеристики, как сплоченность льда, положение кромки льда, векторы дрейфа льда. Из вышесказанного следует, что данные наблюдений на береговых ГМС важны для составления различных прогнозов. Однако расстояние между соседними российскими ГМС в некоторых регионах может быть довольно большим. По данным на 2010 г. среднее расстояние

между ГМС составляло 178 км, максимальное 800—1300 км (Охотское, Восточно-Сибирское моря), минимальное 36—51 км (Балтийское море) [11].

Прогноз волнения

В Гидрометцентре России разработана система прогноза на пять суток характеристик ветрового волнения на основе спектральной модели WaveWatch [8]. Прогнозы регулярно выпускаются для Мирового океана, Баренцева, Белого, Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей. На рис. 1 представлен пример прогноза волнения в Черном и Азовском морях.

Шаг расчетной сетки составляет 50 км для Мирового океана и от 2 до 10 км для морей. Для прогноза требуется информация о скорости ветра, разности температуры воды и воздуха, сплоченности морского льда. Метеорологические характеристики для прогноза задаются на основе выходной продукции глобальных атмосферных моделей ПЛАН и GFS. В прогностические характеристики ветрового волнения входят высота значительных волн, средняя длина и средний период волн, направление распространения волн и др. Для оценки качества прогнозов используются данные спутниковых альтиметрических наблюдений и волновых буйев.

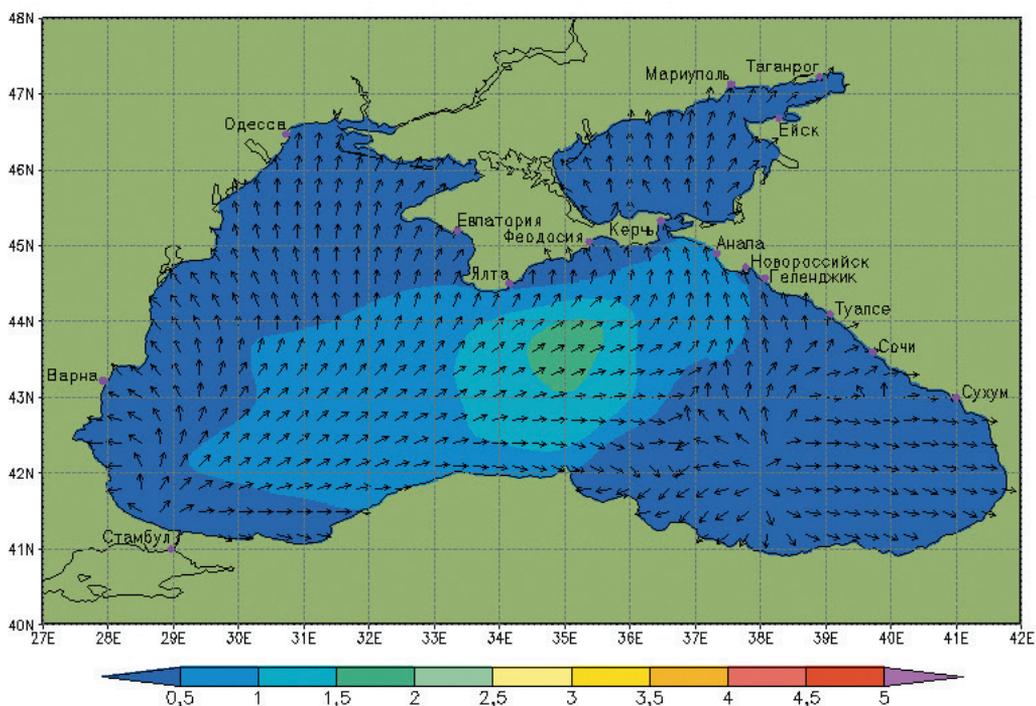


Рис. 1. Прогноз высоты (м) и направления распространения ветрового волнения в Черном и Азовском морях на 09 ч 12 апреля 2019 г.

Для потребителей также важен прогноз ветрового волнения с высоким разрешением для отдельных небольших акваторий (бухт, гаваней, портов и др.). В связи с этим в Гидрометцентре России и МГУ имени М.В. Ломоносова на основе волновой модели SWAN была разработана система регионального прогноза волнения для отдельных прибрежных акваторий Черного моря (Керченский пролив, Цемесская бухта и др.) [13]. Расчет производится на нерегулярной вычислительной сетке с переменным шагом до 20—100 м в прибрежных областях. В качестве атмосферного форсинга используются прогнозы ветра по модели GFS.

Прогноз уровня и течений

В оперативной практике прогнозов уровня и течений большое внимание уделяется штормовым нагонам, которые представляют опасность для прибрежных населенных пунктов. Особенно большие нагоны характерны для северо-западной части Каспийского моря, Финского залива, юго-восточной части Баренцева моря и ряда других акваторий.

В Гидрометцентре России одной из первых была разработана система краткосрочного прогноза уровня и течений Каспийского моря, в основе которой лежит трехмерная бароклинная гидродинамическая модель [20]. Из рис. 2 видно, что по прогнозу на 02 ч 10 апреля 2019 г. в северо-восточной части моря ожидается сгон (понижение уровня) на 15—25 см.

В качестве входной метеорологической информации используются поля приземного атмосферного давления и ветра, рассчитываемые по модели COSMO. Учет осушения и затопления прибрежной зоны осуществляется с помощью специальной технологии. Шаг расчетной сетки составляет одну милю (1856 м).

После катастрофического наводнения в Таганроге 24 сентября 2014 г. аналогичная система была разработана для Азовского моря [18], где расчеты уровня и течений производятся на сетке с шагом 0,5 мили. В базу данных записывается уровень моря с дискретностью один час на 14 береговых ГМС Азовского моря и ежечасные поля уровня по всему Азовскому морю. Результаты прогнозов доступны потребителям через ftp-сервер.

При разработке системы прогноза уровня и течений для Баренцева и Белого морей [17] было важно учесть приливные движения, которые в Баренцевом и Белом морях весьма существенны. Наибольшие приливы наблюдаются в Мезенской губе Белого моря (до 8 м) и Чешской губе Баренцева моря (до 6 м), причем максимальная амплитуда штормовых нагонов в этих морях меньше, чем приливных колебаний, и не превышает 3—4 м. Из рис. 3 видно, что по прогнозу на 02 ч 9 апреля 2019 г. на северном побережье Кольского полуострова ожидается понижение уровня на 1,5—2,0 м, а на побережье юго-восточной части Баренцева моря и Чешской губы — повышение на 0,5—1,2 м.

Для учета приливных движений на жидкой границе задаются колебания уровня в виде суммы приливной и непериодической составляющих уровня моря. Приливная составляющая задается в виде суммы восьми основных приливных волн (гармоник), а непериодическая рассчитывается по полю ветра и климатическим

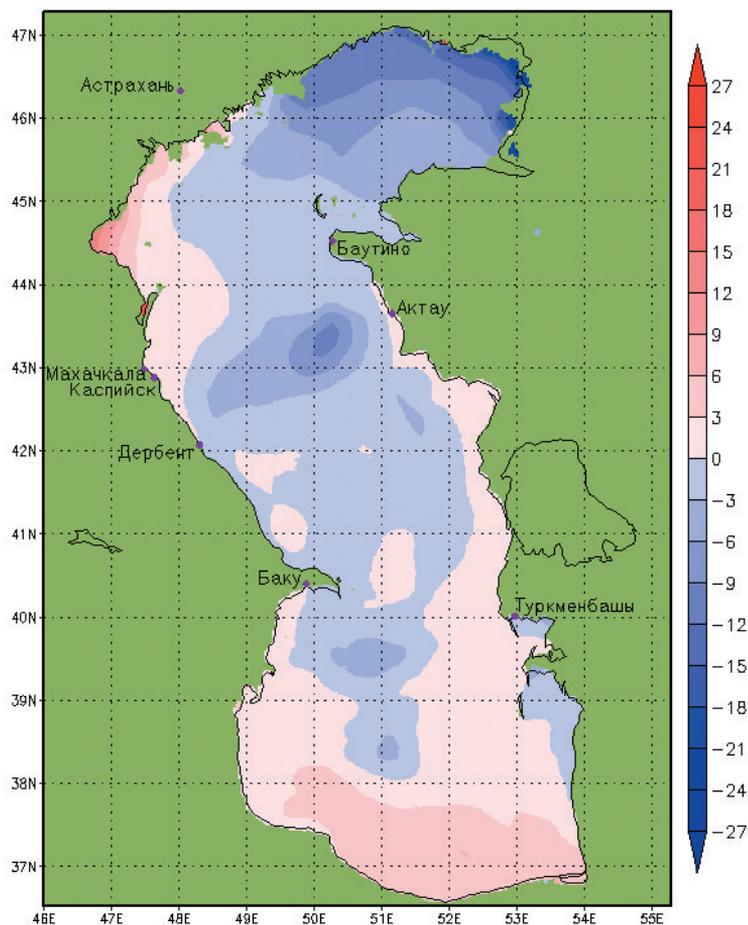


Рис. 2. Прогноз отклонения (см) от невозмущенного уровня Каспийского моря на 02 ч 10 апреля 2019 г.

полям температуры и солености воды. В модели также учитывается наличие льда, который значительно изменяет амплитуду и фазу приливных волн, особенно в прибрежных районах.

С целью защиты от невыходных наводнений в Санкт-Петербурге с 2011 г. функционирует комплекс защитных сооружений (КЗС). Для его работы необходим расчет времени оптимального открытия и закрытия ворот КЗС, для чего, в свою очередь, требуется расчет (прогноз) уровня и течений в верхней части Финского залива. Для достижения этой цели используются двумерные [9] и трехмерные [19] гидродинамические модели. В модели [19] расчет для всего моря производится на сетке с шагом две мили, а для вершины Финского залива — с шагом 90 м. Поля ветра и приземного давления задаются на основе выходной продукции атмосферной модели HIRLAM.

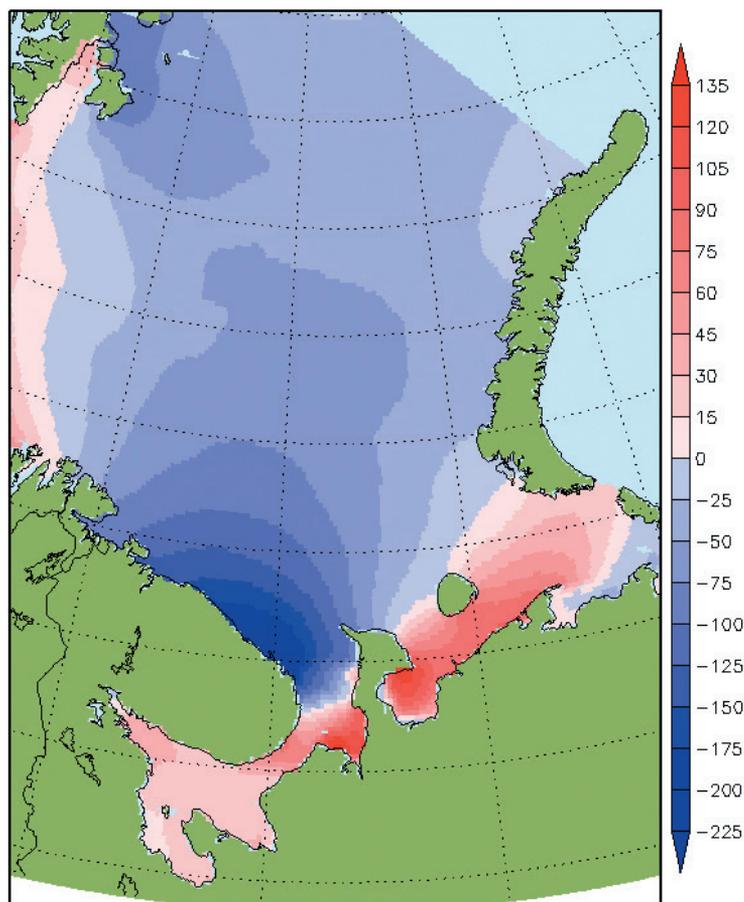


Рис. 3. Прогноз отклонения (см) от невозмущенного уровня Баренцева и Белого морей на 02 ч 9 апреля 2019 г.

Были выполнены численные эксперименты для трех наводнений в Санкт-Петербурге: 21 ноября — 2 декабря 2011 г., 20 декабря 2011 г. — 1 января 2012 г., 26—30 октября 2013 г. Для учета работы КЗС в модели было задано время закрытия и открытия водопропускных ворот (рис. 4). Из рисунка видно, что максимальный подъем уровня в пункте Горный институт 29 октября 2013 г. составил 110 см и был удовлетворительно воспроизведен моделью. При расчете характеристик этого наводнения по модели [9] было получено, что расчетный уровень в пункте Горный институт 29 октября 2013 г. был меньше фактического, что в [9] объясняется неточностью в задании процесса закрытия ворот КЗС.

Средний коэффициент корреляции фактического уровня в пункте Горный институт и расчетного уровня по модели [19] для трех наводнений оказался равным 0,92. Численные эксперименты показали, что модель может использоваться для прогноза уровня моря в Санкт-Петербурге с заблаговременностью 60 ч.

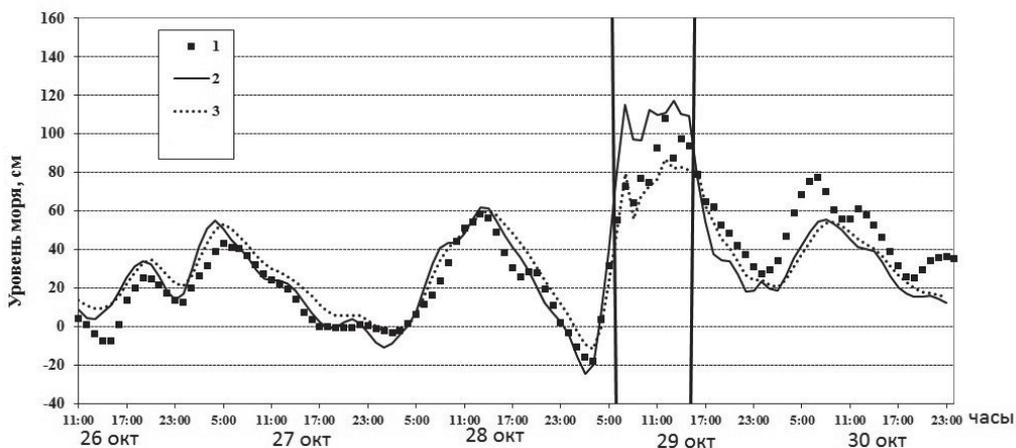


Рис. 4. Расчет уровня моря для пункта Горный институт на 26—30 октября 2013 г. по модели [19].

1 — данные наблюдений; 2 и 3 — модель с дамбой, шаг сетки 2 мили (2) и 90 м (3).
Вертикальные прямые — время закрытия и открытия ворот дамбы.

Ледовые прогнозы

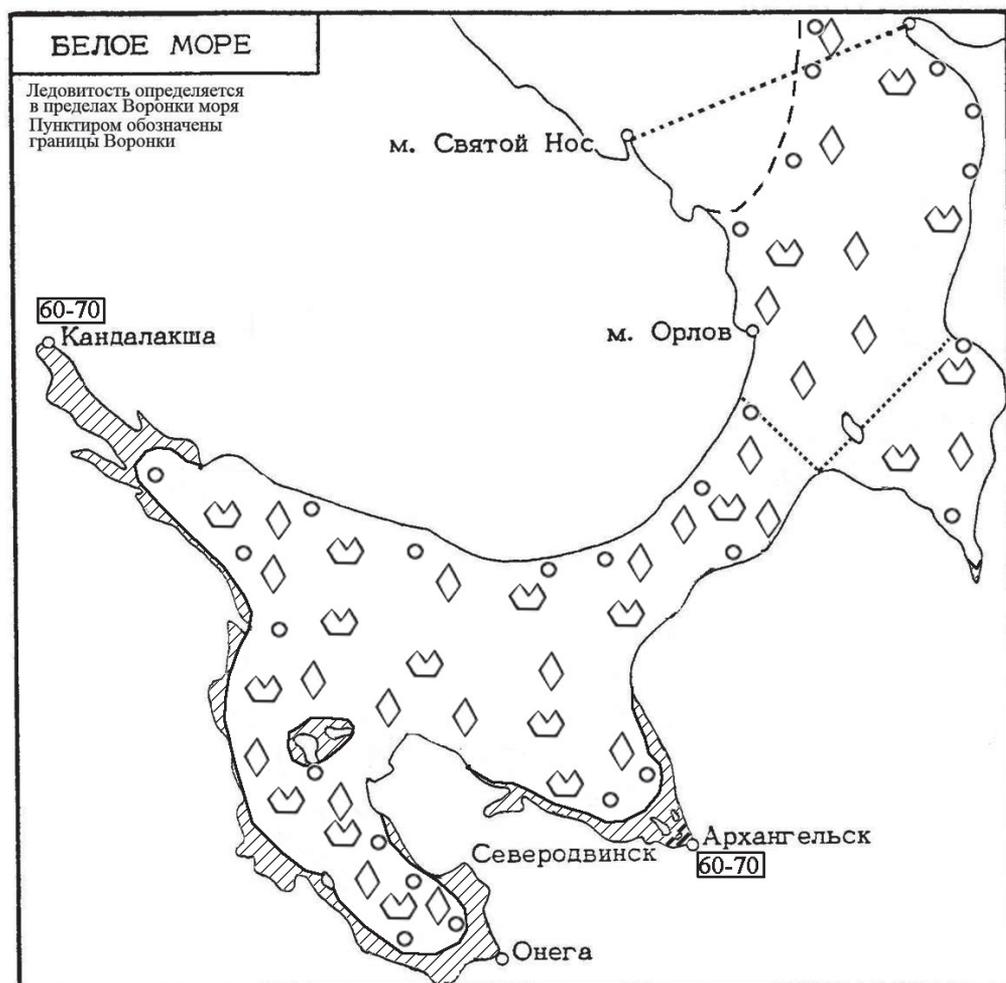
Долгосрочные ледовые прогнозы на неарктических морях России основываются в основном на физико-статистических методах. Ледовые процессы на морях связаны с предшествующими атмосферными процессами, которые, в свою очередь, определяются состоянием центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону. На этом основан единый подход к разработке методов долгосрочных ледовых прогнозов на неарктических морях.

Технология долгосрочного ледового прогноза состоит из двух этапов [4]:

- 1) расчет ледовых характеристик по уравнениям множественной регрессии на основе использования полей приземной температуры воздуха и приземного давления над атлантико-европейским сектором;
- 2) разложение кривых межгодовой изменчивости ледовых характеристик на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном прогнозе учитывается вклад каждого из этих компонентов.

На основе этого подхода в Гидрометцентре России были разработаны методы долгосрочного ледового прогноза для Баренцева, Белого, Балтийского, Азовского, Каспийского и дальневосточных морей. Прогнозируются следующие характеристики: дата первого появления льда, максимальные за ледовый сезон среднемесячная ледовитость моря (рис. 5) и толщина припайного льда, дата окончательного очищения моря от льда, продолжительность ледового периода. Эти прогнозы ежегодно публикуются в начале октября в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который рассылается потребителям.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

*	Начальные виды льда		Граница неподвижного льда
	Дрейфующий лед		Кромка дрейфующего льда
	Припай		Толщина льда (см)
			Чистая вода

Рис. 5. Прогноз максимального развития ледяного покрова в Белом море в марте 2019 г.

В случае сложной ледовой обстановки важен прогноз ледовых характеристик на несколько суток. Такая обстановка сложилась в Азовском море в феврале 2017 г. В результате резкого похолодания в конце января — начале февраля 2017 г. происходило очень быстрое ледообразование на всей акватории моря. Под воздействием северо-восточного ветра ледяные поля из северной части моря начали смещаться на юго-запад, причем скорость дрейфа составляла около 2 км/ч [21], что относится к опасным явлениям.

Ледовая обстановка особенно осложнилась к середине февраля, когда дрейфующий лед вошел в Керченский пролив (рис. 6).

Дрейф льда сопровождался торошением, особенно интенсивным в прибрежных районах, где высота торосов достигала 1 м. Эти процессы создали угрозу для строительства Крымской переправы. Однако в соответствии с краткосрочным метеорологическим прогнозом ожидалось изменение направления ветра на южное, в связи с чем был дан прогноз о том, что дальнейшее развитие ледовой обстановки не представляет угрозы для переправы.

Гидрометеорологическое обеспечение в изменяющихся климатических условиях

Одним из факторов, влияющих на успешность и эффективность гидрометеорологического обеспечения, являются климатические условия. Если эти условия изменяются достаточно быстро, возрастает интенсивность и повторяемость экстремальных явлений, и это должно учитываться при разработке прогностических методов и технологий. Во многих исследованиях показано, что за последние 50—100 лет возросла повторяемость глубоких циклонов, выходящих с акватории Северной Атлантики на Европу. В качестве примера можно привести циклоны Anatol, Kurt, Lothar и Martin в декабре 1999 г., которые привели к гибели 150 человек и причинили ущерб странам Западной и Центральной Европы в размере около 13,5 млрд долларов [16].

Увеличение повторяемости глубоких циклонов приводит к усилению штормового волнения, что представляет серьезную угрозу для судоходства. В связи с этим необходима надежная информация о климатической изменчивости волнения в морях и океанах. В настоящее время создаются справочники нового поколения по волновому климату морей и океанов, и необходимо дальнейшее развитие волновых моделей.

Последние десятилетия характеризуются увеличением повторяемости опасных явлений на территории России, и в частности невских наводнений в Финском заливе [6]. Если в начале XVIII века повторяемость невских наводнений составляла шесть случаев за 10 лет, то в последние десятилетия она достигла 16 случаев за 10 лет [12]. В связи с этим продолжается изучение механизмов возникновения невских наводнений и развитие технологий прогноза течений и уровня моря в Финском заливе на основе гидродинамических моделей с учетом работающей дамбы.

Наиболее ярко климатические изменения, связанные с глобальным потеплением, выражены в Арктике. В арктических морях в XXI веке произошло

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
 ФГБУ "ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

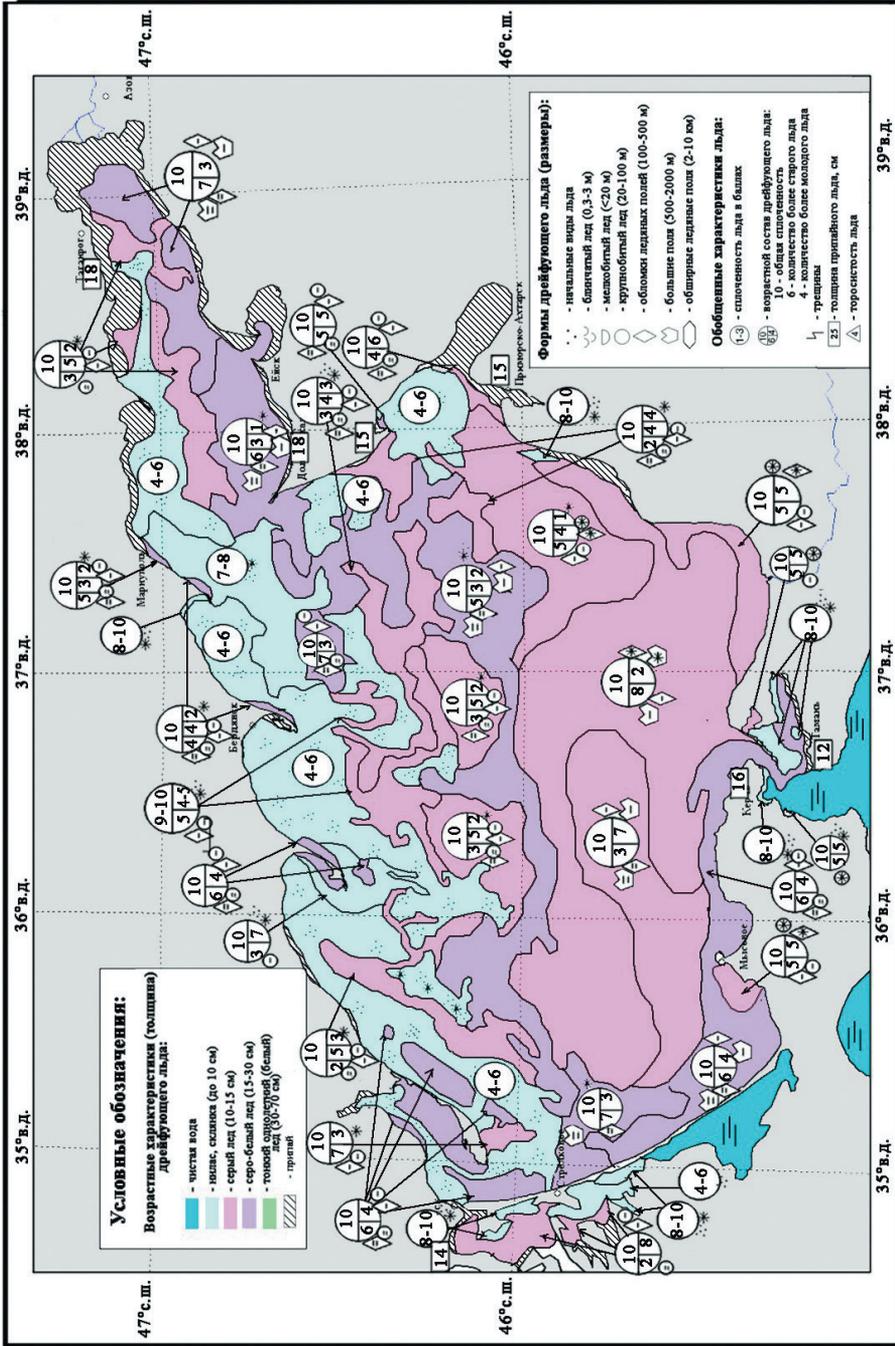


Рис. 6. Анализ ледовой обстановки в Азовском море на 17 февраля 2017 г.

значительное сокращение площади ледяного покрова по сравнению со второй половиной XX века. В среднем в июне — сентябре сокращение площади ледяного покрова составило в Карском море 18 %, в море Лаптевых 14 %, в Восточно-Сибирском море 19 %, в юго-западной части Чукотского моря 20 % [5].

Вместе с тем особенности короткопериодной изменчивости ледовых условий на акватории отдельных морей могут отличаться от общих тенденций. Например, если в 1950-х и 1960-х годах максимальное увеличение ледовитости Азовского моря между 10-дневными периодами составляло 50—70 %, то в период с 2000 по 2017 г. оно в отдельные зимы достигало 90—100 %, что свидетельствует об увеличении изменчивости ледовых условий моря. Поскольку долгосрочные ледовые прогнозы основываются в основном на статистических зависимостях, то изменения климата в таких прогнозах могут учитываться путем включения новых предикторов в прогностические уравнения и увеличения длины рядов исходных данных.

Выводы

В Гидрометцентре России разработаны оперативные технологии прогноза основных характеристик, необходимых для гидрометеорологического обеспечения деятельности на неарктических морях России: волнения, течений, уровня, ледовых условий. Дальнейшее развитие оперативных технологий заключается в увеличении разрешающей способности моделей, что позволит прогнозировать указанные выше характеристики в проливах, заливах, бухтах и т. д. Для этого необходимо развитие самих атмосферных и морских прогностических моделей (описание мезомасштабных процессов и т. д.). Например, очень важным является прогноз полей ветра с высоким разрешением, что актуально для обеспечения безопасности мореплавания.

Список литературы

1. Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. М.: ИГ «Социн», 2009. 287 с.
2. Абузяров З. К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Развитие технологий морских гидрологических прогнозов / В сб.: 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, 2010. С. 376—388.
3. Абузяров З.К., Нестеров Е.С. Морское метеорологическое обслуживание в системе Росгидромета: современное состояние и перспективы развития // Метеоспектр. 2014. № 2. С. 99—111.
4. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 64—77.
5. Думанская И.О. Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. С. 129—154.
6. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Механизмы опасных подъемов уровня моря в Финском заливе. СПб: Петербург — XXI век, 2017. 151 с.
7. Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) // Метеорология и гидрология. 2018. Вып. 12. С. 5—30.
8. Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. 2014. № 215. С. 90—101.
9. Клеванный К.А., Колесов А.М., Мостаманди М.-С. В. Прогноз наводнений в Санкт-Петербурге и восточной части Финского залива в условиях работы комплекса защитных сооружений // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 61—70.

10. Код для оперативной передачи данных морских береговых гидрометеорологических наблюдений (КН-02 SEA). М., 2014. 44 с.
11. *Комчатов В.Ф., Лучков В.П.* Вековая морская береговая гидрометеорологическая сеть — основа изучения гидрологического режима шельфовой зоны морей РФ и обеспечения гидрометеорологической безопасности // Труды ГОИН. 2011. Вып. 213. С. 5—14.
12. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость невских наводнений и морского уровня в Финском заливе в современных климатических условиях // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 544—557.
13. *Мысленков С.А., Архипкин В.С.* Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря // Труды ГОИН. 2014. Вып. 215. С. 117—125.
14. *Нестеров Е.С.* Оперативные системы прогноза параметров морской среды для европейских морей // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 121—126.
15. *Нестеров Е.С.* Оперативное гидрометеорологическое обеспечение деятельности на морях России // Труды ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 305—316.
16. *Нестеров Е.С.* Гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности в меняющихся климатических условиях // Труды ГОИН. 2018. Вып. 219. С. 227—234.
17. *Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И.* Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях // Метеорология и гидрология. 2013. № 6. С. 68—82.
18. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Моделирование изменений уровня Азовского моря в 2015—2016 годах // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 131—143.
19. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80—89.
20. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 90—99.
21. *Федоренко А.В.* Особенности ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе зимой 2016/17 г. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 193—202.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

А.В. Фролов

Институт водных проблем РАН, anatolyfrolov@yandex.ru

Предложена усовершенствованная модель Каспийского моря, учитывающая нелинейные зависимости слоя и объема оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня воды в море. В этой модели испарение с акватории Каспия впервые было рассмотрено как сумма стохастической и детерминированной компонент. Получена плотность распределения уровня моря в виде решения соответствующего уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова. Исследованы условия формирования двух видов плотности распределения вероятности уровня Каспия — бимодальной и одномодальной. Получен практически важный вывод о том, что в современных условиях благодаря оттоку морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, несмотря на зависимость слоя испарения с акватории Каспия от уровня моря, плотность распределения вероятности уровня остается одномодальной.

Ключевые слова: уровень Каспийского моря, плотность распределения вероятности, уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова, нелинейная гидрологическая система, бимодальность.

FEATURES OF THE MECHANISM OF THE LONG-TERM FLUCTUATIONS IN THE CASPIAN SEA LEVEL

A.V. Frolov

Water Problems Institute of RAS

An improved model of the Caspian Sea is proposed, taking into account the nonlinear dependencies of the layer and volume of seawater outflow into Kara-Bogaz-Gol Bay on the water level in the sea. In this model, evaporation from the Caspian waters was first considered as the sum of the stochastic and deterministic components. The probability density function (p.d.f.) of CSL is obtained as the solution of the Fokker – Planck – Kolmogorov equation. The conditions for the formation of the bimodal or unimodal probability density distribution of the Caspian Sea level fluctuations were studied. The practically important conclusion was obtained that under current conditions due to the outflow of seawater to Kara-Bogaz-Gol Bay, despite the dependence of the evaporation layer from the Caspian waters on sea level, the level probability distribution density remains unimodal.

Keywords: level of the Caspian Sea, probability density function, the Fokker – Planck – Kolmogorov equation, nonlinear hydrological system, bimodality.

Введение

Уровенный режим Каспийского моря — крупнейшего в мире внутреннего водоема на Земле — был и остается актуальным предметом гидрологических исследований на протяжении многих десятилетий. Расчет характеристик современного и будущего режима Каспия необходим для научного обеспечения проектов хозяйственного освоения моря и его побережий, особенно в связи с добычей углеводородов. Многолетние колебания уровня Каспийского моря (УКМ) имеют стохастический, вероятностный характер, что характерно также практически для всех гидрометеорологических процессов. Полное решение проблемы прогноза

многолетних колебаний уровня Каспия должно быть получено в рамках глобальной проблемы прогноза климатических изменений [2, 8, 9, 19]. На современном этапе с учетом необходимости обеспечения решения прикладных задач для расчетов характеристик УКМ приходится применять теоретико-вероятностный подход, предложенный С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем в 1940 г. и впервые опубликованный в 1946 г. [6].

Ключевым моментом в изучении многолетних колебаний УКМ как стохастического процесса является обоснование типа и параметров плотности распределения вероятности (ПРВ) уровня. Поскольку ПРВ находится на основе математической модели колебаний УКМ, особое значение приобретает полнота учета этой моделью особенностей формирования уровня моря. В наших исследованиях мы используем динамико-стохастическую модель колебаний УКМ, учитывающую стохастическую природу моделируемого процесса и динамическую составляющую, формируемую соответствующим физическим механизмом. Многолетние колебания УКМ рассматриваются как выходной процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические входные процессы — основные составляющие водного баланса водоема, речной приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса водоема.

Несомненным достоинством динамико-стохастических моделей является их физическая обоснованность, что дает достаточные основания считать смоделированный процесс адекватным реальному. Другая причина для предпочтения динамико-стохастического моделирования колебаний уровней озер перед чисто стохастическим моделированием — возможность получать оценку реакции уровней озер на изменения составляющих водного баланса. Такие изменения могут быть вызваны, в частности, влиянием климата, а также прямым техногенным воздействием на водный баланс озер — изъятиями из речного притока, прекращением и возобновлением оттока из проточных озер, изменением морфометрических характеристик озер и прочими подобными причинами.

Цель данного исследования заключается в оценке влияния обратных связей в механизме колебаний УКМ на формирование основной характеристики уровня моря — плотности распределения вероятности уровня.

Современное представление о механизме формирования многолетних колебаний УКМ

Каспийское море совместно с водным балансом естественно рассматривать как гидрологическую систему с входными и выходными процессами. К входным процессам относятся речной и подземный приток. Осадки и испарение обычно относят к входным процессам. Испарение, однако, в общем случае может состоять из двух компонент: первая, функционально зависящая от глубины (уровня) моря, относится к выходным процессам; вторая, стохастическая — к входным процессам, поскольку формируется случайным образом гидрометеорологическими условиями конкретных лет. Осадки и испарение часто объединяют в один процесс — разность между слоями испарения и осадков, называемую эффективным

(«видимым») испарением. Для краткости в дальнейшем эффективное испарение будем называть просто испарением. Выходными процессами каспийской гидрологической системы являются, во-первых, собственно колебания уровня Каспия, во-вторых, отток из моря в залив Кара-Богаз-Гол и испарение с морской акватории, функционально зависимые от уровня воды в море.

В механизме, формирующем колебания уровня моря, предполагается наличие положительных и отрицательных обратных связей, действующих прямо противоположно: отрицательная обратная связь демпфирует колебания уровня моря, положительная обратная связь усиливает.

Первая отрицательная обратная связь, образованная строго монотонно возрастающей зависимостью площади морской акватории от уровня воды в водоеме, была впервые выделена С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем [6]. Обычно демпфирующее действие этой обратной связи объясняют следующим образом. При повышении уровня воды в море, с увеличением площади акватории, объем испаряющейся воды увеличивается, а при понижении уровня вследствие уменьшения площади акватории — уменьшается. Заметим, что такое объяснение несколько неполное, поскольку зависимость площади зеркала моря от уровня действует как отрицательная обратная связь и при нулевом испарении, что возможно, например, для проточного озера. Поэтому определяющим признаком отрицательной обратной связи в данном случае выступает именно монотонно возрастающая зависимость площади зеркала водоема от уровня воды, участие же испарения не является обязательным. При немонотонной зависимости площади акватории от уровня (например, для водоемов с «нависающими» берегами типа «бакинского стаканчика»), возможно формирование на некотором интервале отметок уровня положительной обратной связи (см., например, [14, 17]).

В модели колебаний УКМ, разработанной С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем, учитывалась единственная обратная связь — отрицательная, вызванная переменностью площади зеркала моря.

Вторая отрицательная обратная связь формируется зависимостью оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня воды в море [13—15]. Вид этой зависимости в прошлом веке неоднократно и в разной степени менялся. Наиболее существенные изменения произошли в 1992 г. после разрушения дамбы, возведенной в 1980 г. в проливе, соединяющем море и залив. Произошел размыв пролива, вследствие чего его поперечное сечение увеличилось примерно в два раза. Современная оценка зависимости оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня воды в Каспии приведена на рис. 1 (кривая 1).

Из рис. 1 видно (кривая 1), что демпфирование колебаний уровня моря зависимостью оттока в залив от УКМ происходит в ограниченном диапазоне отметок — примерно от $-28,0$ до $-26,5$ м БС.

Третья обратная связь в механизме колебаний уровня Каспия — положительная — была обнаружена М.Г. Хубларяном и В.И. Найденовым [17]. Положительная обратная связь направлена на дестабилизацию уровня моря. Эта связь формируется совместным действием зависимостей слоя испарения и площади акватории от уровня моря. Впервые необходимость учета зависимости испарения от уровня

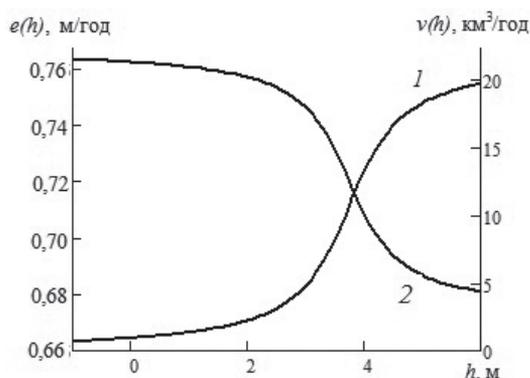


Рис. 1. Зависимости объема оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня Каспия (1) и слоя испарения с акватории Каспия от уровня моря (2).

Уровень здесь и в дальнейшем отсчитывается от отметки $-31,0$ м БС.

воды в Каспии была отмечена в монографии [7]. Экспериментально зависимость испарения с поверхности Каспия от уровня моря была установлена Г.Н. Паниным [11]. Например, в теплый период (апрель — август) испарение с мелководного Северного Каспия (средняя глубина 4,4 м) намного больше испарения со Среднего и Южного Каспия (средняя глубина равна 192 и 345 м соответственно), причем в отдельные месяцы — в несколько раз. По данным Г.Н. Панина [11, с. 76], в мае слой испарения с Северного Каспия в 2—3 раза больше, чем со Среднего и Южного Каспия, — приблизительно 100, 35 и 42 мм/мес соответственно.

В работе [17] впервые была предложена модель колебаний уровней бессточных водоемов с учетом зависимости испарения от уровня моря. Положительная обратная связь формируется на интервале отметок уровня, на котором при повышении уровня увеличение площади зеркала оказывается недостаточным для увеличения объема испарения из-за уменьшения слоя испарения с увеличением глубины водоема (см. рис. 1, кривая 2).

Таким образом, согласно современным представлениям, в механизме формирования колебаний УКМ присутствуют три обратных связи — две отрицательные и одна положительная.

Модели с единственной отрицательной обратной связью изучены достаточно подробно [10].

Влияние различных видов обратных связей на плотность распределения вероятностей уровня моря исследуем на основе применения динамико-стохастической модели колебаний УКМ.

Основные уравнения и соотношения в модели уровня режима Каспия

Многолетние колебания уровня Каспия описываются уравнением водного баланса моря:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{q(t)}{F(h)} - \frac{v(h)}{F(h)} - e(t, h), \quad (1)$$

где h — уровень воды в Каспии; $q(t) = \langle q \rangle + \tilde{q}(t)$ — суммарное поступление воды в море (речной и подземный приток — для краткости будем называть просто притоком); $\langle q \rangle$ — среднее притока; $\tilde{q}(t)$ — флуктуации притока относительно среднего, моделируемые марковской последовательностью; $v(h)$ — объем оттока морской воды из Каспия в залив Кара-Богаз-Гол; $e(t, h) = e_{Det}(h) + e_{Stoch}(t)$ — испарение с поверхности моря, $e_{Det}(h)$ — детерминистическая компонента; $e_{Stoch}(t)$ — стохастическая компонента; $F(h)$ — зависимость площади поверхности моря от уровня h ; t — время (число лет).

Использование в модели колебаний УКМ испарения в виде суммы двух компонент — стохастической и детерминистической — производится впервые.

Для реального диапазона вариаций УКМ оценка $F(h)$ близка к линейной [7, 15, 18]:

$$F(h) = a + bh, \quad (2)$$

где $a = 330 \cdot 10^9 \text{ м}^2$, $b = 14 \cdot 10^9 \text{ м}$.

Для режима оттока в залив, установившегося после разрушения в 1992 г. дамбы в проливе, соединяющем море и залив, зависимость $v(h)$ между оттоком морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня Каспия принимаем в виде монотонно неубывающей функции

$$v(h) = k \arctg[l(h - A)] + B, \quad (3)$$

где k , l , A и B — числовые коэффициенты.

Для детерминированной зависимости испарения с поверхности моря от уровня моря используем нелинейную зависимость, аналогичную (3):

$$e_{Det}(h) = m \arctg[n(h - C)] + D, \quad (4)$$

где m , n , C и D — числовые коэффициенты.

Функция (3) в отличие от функции (4) — монотонно возрастающая с увеличением h .

Зависимости 1 и 2 на рис. 2 приведены для коэффициентов $k = -0,03 \text{ м/год}$, $l = 1,5 \text{ м}^{-1}$, $A = 3,75 \text{ м}$, $B = 0,72 \text{ м/год}$, $m = 7 \text{ км}^3/\text{год}$, $n = 1,6 \text{ м}^{-1}$, $C = 7,5 \text{ м}$ и $D = 10,7 \text{ км}^3/\text{год}$.

Уравнение (1) перепишем в виде

$$\frac{dh(t)}{dt} = f(h) + g(h) \cdot \tilde{q}(t),$$

где с учетом (2) — (4)

$$f(h) = \frac{\langle q \rangle}{F(h)} - e(h) - \frac{v(h)}{F(h)}, \quad g(h) = 1/F(h).$$

Таким образом, колебания УКМ описываются нелинейным стохастическим уравнением. Исследованию свойств динамики таких систем в настоящее время уделяется большое внимание (см., например, [1, 3, 5, 16]).

Согласно [12], автокоррелированный процесс $\tilde{q}(t)$ заменяется на гауссов белый шум с коэффициентом интенсивности N_0 :

$$N_0 = 4 \int_0^{\infty} k(\tau) d\tau,$$

где $k(\tau)$ — ковариационная функция процесса $\tilde{q}(t)$.

Решение уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова для плотности вероятности $p(h)$, отвечающее динамическому уравнению (4), для стационарного режима и при граничных условиях нулевого потока описывается выражением

$$p(h) = \frac{c}{g(h)} \exp \left[\frac{2}{N_0} \int_0^h \frac{f(x)}{g^2(x)} dx \right], \quad (5)$$

где c — нормировочный коэффициент, определяемый из условия

$$\int_0^{+\infty} p(h) dh = 1.$$

Интеграл в уравнении (5) берется аналитически, однако, поскольку полученное выражение оказалось весьма громоздким, оно из-за экономии места здесь не приводится.

Кроме модели (1), для решения поставленной задачи оценки роли обратных связей в механизме колебаний УКМ, нами был применен метод имитационного моделирования колебаний УКМ.

Для этого использовалось дискретное уравнение водного баланса

$$h_t = h_{t-1} + \frac{q_{t-1}}{F_{t-1}} - e(t-1, h_{t-1}) - \frac{v(h_{t-1})}{F_{t-1}},$$

где функции $F(h_t)$, $e(t)$, и $v(h_t)$ определялись зависимостями (2), (3) и (4), соответственно; t — в этом случае дискретное время (число лет): $t = 0, 1, \dots, N$.

Суммарный приток в море моделировался марковской последовательностью

$$q_t = r_q q_{t-1} + w_t,$$

где $r_q = 0,36$ — коэффициент автокорреляции притока, w_t — белый шум с известными средним и дисперсией.

Белый шум генерировался стандартным датчиком псевдослучайных гауссовых чисел. Начальные значения уровня и притока задавались равными 3,0 м (над отметкой $-31,0$ БС) и 275 км³/год соответственно. Длина последовательностей годовых значений притока и слоя испарения (стохастической компоненты) принималась равной 10^4 , что обеспечивало необходимую точность при построении гистограмм уровня Каспия для исследуемых вариантов водного баланса моря.

Результаты моделирования плотности распределения вероятности уровня Каспия

На рис. 2 приведены ПРВ УКМ для случаев бессточного (без оттока в Кара-Богаз-Гол) и проточного (с оттоком в Кара-Богаз-Гол) Каспия.

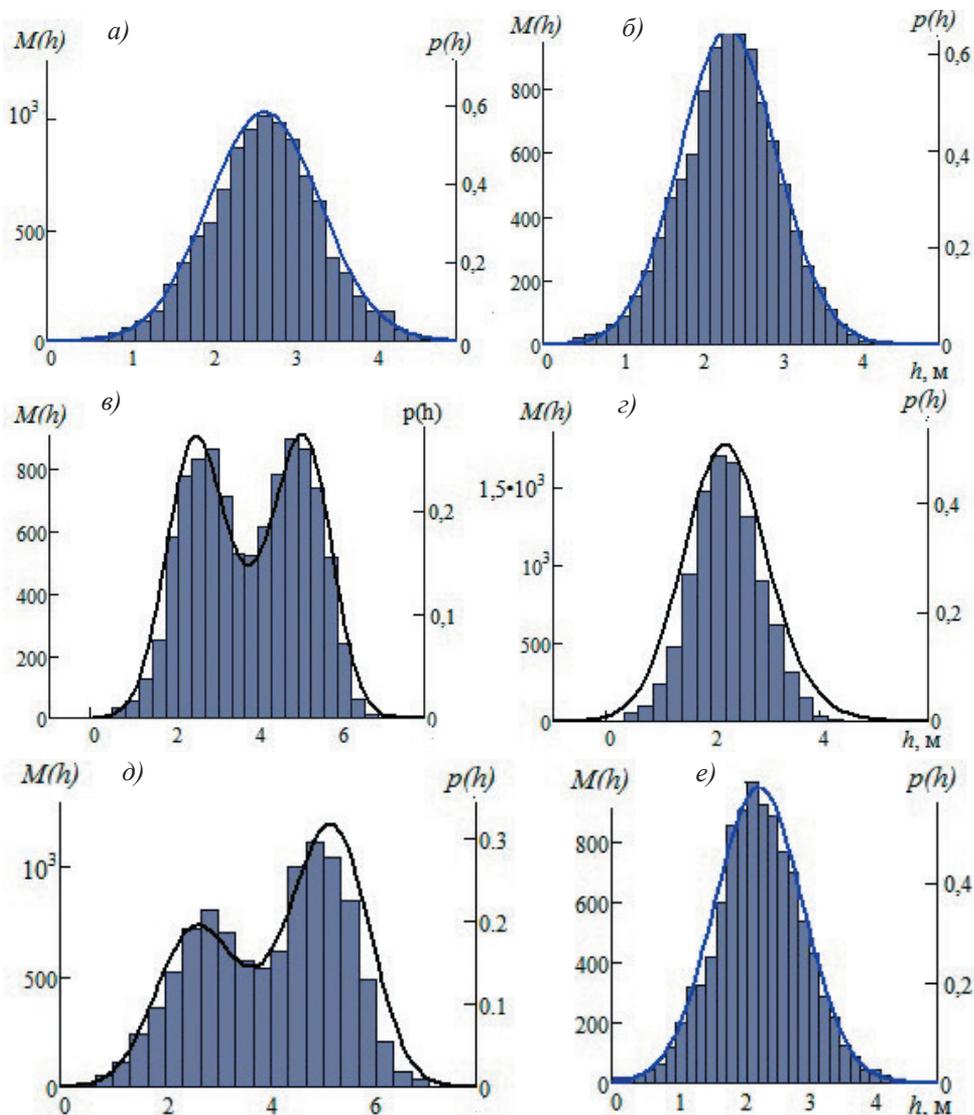


Рис. 2. Плотность распределения вероятности УКМ
для бессточного Каспия (без оттока в залив Кара-Богаз-Гол) (а, в, д)
и для модели проточного Каспия (с оттоком в залив Кара-Богаз-Гол) (б, г, е).

Варианты испарения: $e_{Stoch}(t)$ – (а и б); $e_{Det}(h)$ – (в и г); $e_{Stoch}(t) + e_{Det}(h)$ – (д и е). Столбики — результаты имитационного моделирования; кривые — результаты, отвечающие модели (1); $M(h)$ — частота.

Статистические параметры притока для вариантов расчетов принимались одинаковыми: среднее равно $275 \text{ км}^3/\text{год}$, дисперсия — $2500 (\text{км}^3/\text{год})^2$ [10]. Как следует из рис. 2, в случае действия детерминированной компоненты испарения $e_{Det}(h)$ ПРВ уровня бессточного Каспия приобретает бимодальную форму (см. рис. 2 в, д). В случае же включения еще одной отрицательной обратной связи — действия зависимости оттока в Кара-Богаз-Гол — ПРВ УКМ становится одно-модальной. В случае только стохастического испарения $e_{Stoch}(t)$ ПРВ УКМ имеет одномодальный вид независимо от проточности Каспия.

Проведенные расчеты демонстрируют существенное влияние включения в механизм колебаний уровня моря детерминированной компоненты в испарении на дисперсию УКМ. Поскольку эта компонента образует положительную обратную связь в механизме колебаний УКМ, то ее действие направлено на увеличение размаха колебаний уровня моря. Наиболее выражено увеличение дисперсии УКМ при отсеченном заливе Кара-Богаз-Гол: от $0,46$ до $1,77 \text{ м}^2$. При оттоке морской воды в залив дисперсия УКМ возрастает в меньшей степени: от $0,38$ до $0,46 \text{ м}^2$. Это вполне понятно, поскольку отрицательная обратная связь, образованная зависимостью (3) оттока в залив от уровня моря, заметно нейтрализует действие положительной обратной связи, вызванной зависимостью испарения (4) от уровня моря.

Выводы

Наличие в испарении с акватории Каспия функционально зависящей от уровня компоненты необходимо учитывать при построении плотности распределения вероятности уровня моря. В случае проточного Каспия и двухкомпонентного испарения $e_{Stoch}(t) + e_{Det}(h)$ ПРВ УКМ близка к плотности нормального распределения. При этом дисперсия УКМ в общем случае отличается от ее значения, отвечающего чисто стохастическому испарению, $e_{Stoch}(t)$. Переход Каспия в режим бессточного водоема, например, при высоком уровне (выше отметки -26 м БС) может привести к бимодальности ПРВ УКМ.

Детальная разработка нелинейной модели многолетних колебаний УКМ еще предстоит. В частности, необходимо оценить диапазон отметок уровня, в котором зависимость испарения от уровня Каспия может изменяться вследствие изменений климата.

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001(№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН (в части имитационного моделирования уровня режима Каспия) и при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00215) (в части построения усовершенствованной нелинейной динамико-стохастической модели колебаний уровня Каспия).

Список литературы

1. Голицын Г.С. Статистика и динамика природных процессов и явлений / Серия «Синергетика». № 68. М.: КРАСАНД, 2013. 398 с.
2. Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В. О современном подъеме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. С.133—139.
3. Демченко П.Ф., Кислов А.В. Стохастическая динамика природных объектов. М.: ГЕОС, 2010. 189 с.
4. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 230 с.
5. Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 440 с.
6. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения статистической теории колебаний уровней естественных водоемов и их применение к исследованию режима Каспийского моря / В сб.: Труды Первого совещания по регулированию стока. М.—Л.: изд-во АН СССР, 1946. С.76—93.
7. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 157 с.
8. Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб: изд-во РГГМИ, 1994. 60 с.
9. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Гурьянов Д.В. Малопараметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современных изменений климата // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 35—49.
10. Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.
11. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 88 с.
12. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.
13. Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озер. М.: Наука, 1985. 103 с.
14. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
15. Фролов А. В. Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря // Математическое моделирование и численные методы. 2016. № 3 (11). С. 79—92.
16. Хорстемке В., Лефевр Р. Индуцированные шумом переходы / Пер. с англ. М.: Мир, 1987.— 397 с.
17. Хублярян М.Г., Найденов В.И. О тепловом механизме колебаний уровня водоемов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319, № 6. С. 1438—1444.
18. Frolov A.V. The Caspian Sea as Stochastic Reservoir / Hydrological Models for Environmental Management / Eds.: L.Gottschalk et al. Dordrecht – Boston – London: Kluwer Acad. Publishers, 2002. P. 91—108.
19. Semenov V.A., Nikitina N.G., Mokhov I.I. Atlantic Multidecadal Variability and hydrological cycle in the Caspian Sea watershed // Research Activities Atmos. Ocean. Modelling. Rep. № 43. WCRP Rep. № 10/2013. 2013. P. 7.15 — 7.16.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

Б. Т. Курбанов

Национальный центр государственных кадастров, геодезии и картографии, Республика Узбекистан, bk1948@bk.ru

Рассматриваются используемые в настоящее время методы оценки качества поверхностных вод на территории Узбекистана. Методы оценки качества поверхностных вод не соответствуют современным требованиям. Указана необходимость совершенствования методов оценки качества поверхностных вод на территории Узбекистана. Методы оценки качества поверхностных вод, предложенные в статье, основаны на использовании большего объема исходной информации, и результаты этих оценок являются более достоверными. Предложена методика оценки качества поверхностных вод с учетом класса опасности ингредиентов.

Ключевые слова: экология, гидрология, качество поверхностных вод, здоровье населения, индекс загрязнения воды.

SOME PROBLEMS OF QUALITY ASSESSMENT OF SURFACE WATERS IN THE TERRITORY OF REPUBLIC OF UZBEKISTAN

B. T. Kurbanov

National Center of State Cadastre, Geodesy and Cartography, The Republic of Uzbekistan

The article analyzes the currently used methods for assessing the quality of surface waters in Uzbekistan. The currently used method of assessing the quality of surface water does not meet modern requirements. The necessity of improving the methods for assessing the quality of surface waters in Uzbekistan is indicated. The methods for assessing the quality of surface waters proposed in the article are based on using a larger amount of initial information and the results of these assessments are more reliable. A method for assessing the quality of surface water, taking into account the hazard class of ingredients, is proposed.

Keywords: ecology, hydrology, quality of the surface water, health of the population, index of pollution of water.

Введение

Усыхание Аральского моря, произошедшее за период двух поколений, привело к беспрецедентному негативному воздействию на экологию Центральной Азии и оказало негативное воздействие всему населению региона. На обсохшем дне моря, некогда служившим природно-климатическим регулятором Приаралья, возникла песчано-соляная пустыня Аралкум площадью более 5,7 млн гектаров. Аральский кризис привел к резкому дефициту и высокой загрязненности речных вод, используемых для питьевого водоснабжения и орошения, серьезному ухудшению

здоровья населения, росту детской смертности и др. [1]. По данным ВОЗ, заболеваемость населения в мире на 50 % обусловлена именно качеством питьевой воды. В Республике Узбекистан сохраняется высокий уровень заболеваемости взрослого населения и детей. Удельная водообеспеченность в Узбекистане в связи с ростом численности населения продолжает оставаться острой проблемой. Чрезмерное загрязнение водных ресурсов, их нерациональное использование привели к сложной ситуации со снабжением питьевой водой и ее качеством. Загрязнение источников питьевого водоснабжения в Узбекистане привело к высокому уровню заболеваний печени, почек, нервной системы. Наиболее критическое положение со снабжением питьевой водой и с ростом заболеваемости, вызванным ее употреблением, приходится на Навоийскую, Хорезмскую, Сурхандарьинскую области и на Каракалпакстан [6]. Дефицит питьевого водоснабжения порой вынуждает население бросать свои дома и уезжать в более благоприятные с точки зрения питьевого водоснабжения районы страны. На рис. 1 приведен пример заброшенного селения в Сурхандарьинской области в 20 км к югу от Пачкамарского водохранилища.

В Нукусе в 100 % проб поверхностных вод и в 75 % проб из подземных источников обнаруживали вирусы, 28—75 % проб из подземных источников были нестандартны по коли-индексу, а 15—21 % проб содержали патогенные бактерии. В Хорезмской области прослеживалась связь между наличием возбудителей кишечных инфекций в водных объектах и заболеваемостью населения [1, 10]. Действующий в настоящее время в Республике Узбекистан мониторинг за водными объектами хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения требует совершенствования, так как не гарантирует эпидемической безопасности [11].

Наблюдаются ряд негативных социально-экономико-экологических проблем для жителей Приаралья, высокая детская и материнская смертность [13]. В регионе реки подвержены загрязняющему влиянию животноводческих, коммунально-бытовых, промышленных стоков и стоков коллекторно-дренажных вод. В пределах Республики в поверхностные водотоки поступают загрязненные сточные



Рис. 1. Заброшенное селение в 20 км к югу от Пачкамарского водохранилища (фото 2018 г.). Население покинуло жилища из-за отсутствия питьевого водоснабжения.



Рис. 2. Республика Узбекистан. Территории с плохим, очень плохим и чрезвычайно плохим качеством поверхностных вод (выделены сиреневым цветом).

воды более чем 5 тыс. объектов водопользователей, которые составляют примерно 20 % общего водоотведения в открытые водные объекты [14].

На рис. 2 сиреневым цветом выделены территории с плохим, очень плохим и чрезвычайно плохим качеством поверхностных вод в Узбекистане.

Вышеизложенное свидетельствует об актуальности проведения исследований по оценке качества поверхностных вод и совершенствования используемых методов. Основной целью исследования является совершенствование методов оценки степени загрязнения поверхностных вод в Узбекистане, в том числе с учетом класса опасности ингредиентов.

Методологические вопросы оценки качества поверхностных вод

Комплексная оценка качества воды по гидрохимическим показателям в Узбекистане производится по индексу загрязнения воды (ИЗВ). В основе расчета ИЗВ лежит методика, разработанная в Управлении наблюдений и контроля загрязнения окружающей среды Государственного комитета СССР по гидрометеорологии [4]. Напомним, что под предельно допустимой концентрацией (ПДК) понимается такая максимальная концентрация химических элементов и их соединений в окружающей среде, которая при повседневном влиянии в течение длительного

времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, *устанавливаемых современными методами исследований*, в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений [7]. Значения ПДК, устанавливаемые на основании экспериментальных данных о токсичности и иных приводящих обстоятельств, не одинаковы в разных странах и периодически пересматриваются на основании последних научных исследований и разработок.

Как было отмечено выше, для оценки ИЗВ используют методику, разработанную еще в советские времена [4]. По данной методике ИЗВ рассчитывается по шести гидрохимическим показателям — содержанию растворенного кислорода, БПК и четырех загрязняющих веществ, имеющих наиболее высокие по отношению к ПДК показатели. Данные четыре ингредиента выбираются из нескольких десятков, по которым проводится анализ в Узгидромете. ПДК устанавливаются из расчета, что существует некое предельное значение вредного фактора, ниже которого пребывание в данной зоне (или, например, использование продукта) совершенно безопасно и при повседневном влиянии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Исследования самого последнего времени привели к выводу об отсутствии нижних безопасных порогов (а следовательно, ПДК) при воздействии некоторых ингредиентов, в частности канцерогенов и ионизирующей радиации. Список таких ингредиентов постоянно пополняется. Любое превышение ими привычных природных фонов опасно для живых организмов, хотя бы генетически в цепи поколений [9]. Следовательно, используемые для расчета ИЗВ значения ПДК не являются истиной в последней инстанции. Значения ИЗВ по методике [4] для разных створов могут быть рассчитаны по разным ингредиентам. Данный факт вызывает определенные сомнения в сопоставимости результатов расчетов ИЗВ и оценки степени загрязнения поверхностных вод для разных створов. В этой ситуации достоверность оценок ИЗВ, по мнению автора, может быть повышена, если привлечь к анализу все ингредиенты с ПДК больше единицы:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{P_i}, \quad (1)$$

где K — концентрация ингредиентов; C_i — значение i -го ингредиента; P_i — ПДК i -го ингредиента; n — число всех ингредиентов, превышающих ПДК.

Как было отмечено выше, негативное воздействие на организм человека могут оказывать ряд ингредиентов, не превышающих ПДК, и список таких ингредиентов постоянно пополняется. Если исходить из предположения, что даже в тех случаях, когда содержание отдельных ингредиентов не превышает ПДК, они могут оказывать негативное воздействие на здоровье человека, целесообразно для анализа и оценки степени загрязнения поверхностных вод использовать все ингредиенты, по которым проводится анализ. В этом случае концентрация ингредиентов рассчитывалась по формуле

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{P_i}, \quad (2)$$

где N — число всех анализируемых ингредиентов.

В настоящее время при оценке качества поверхностных вод все чаще используется «вероятностный» подход, развиваемый ЕРА (Управлением по охране окружающей среды США) с начала 1980-х годов [7]. В этой концепции учтена возможность совместного действия вредных факторов, причем их весовые коэффициенты могут изменяться в зависимости от симбатности (мера схожести зависимостей) или аддитивности (величина, относящаяся к системе в целом, равна сумме величин, относящихся к ее составным частям) этих факторов. Такой подход исключает использование жестко фиксированных ПДК — их заменяют специальными исследованиями оценки риска, более обоснованными и информативными. В предельном случае оценка риска может дать и значения лимитов на концентрации (уровни) вредных факторов, совпадающие с ПДК.

В предлагаемой ниже методике оценки степени загрязнения поверхностных вод учитывается класс опасности через повышающие весовые коэффициенты. Напомним, что класс опасности — величина, позволяющая классифицировать вещества по уровню их вредного воздействия. При установлении этой величины опираются сразу на несколько показателей. Перечень значений и правила присвоения степени опасности определяются ГОСТом 12.1.007–76. Показатели концентраций, способных вызвать летальный исход при различных способах введения вещества в организм являются основными при определении степени опасности. Решающим считается тот показатель, который соответствует более высокому классу [2]. Например, чрезвычайно опасные вещества первого (1) класса даже в малом количестве способны вызвать летальный исход. Для человека смертельной станет пероральная доза, равная всего в 15 мг на 1 кг массы тела. В случае воздействия через кожу летальным станет количество около 100 мг на 1 кг. Предельно допустимая концентрация таких соединений в воздухе — менее 0,1 мг на 1 м³ [2].

Как было отмечено выше, на основе новейших исследований в развитых странах ПДК для различных ингредиентов периодически пересматриваются и уточняются. Необходимость пересмотра методов оценки степени загрязнения поверхностных вод отмечают многие исследователи. Об этой проблеме говорится и в Национальном докладе об использовании и охране водных ресурсов в Республике Узбекистан [14], где указана необходимость разработки современных критериев для оценки качества воды и устойчивости, связанных с водным фактором экосистем.

В работе [5] на основе анализа ряда методик по оценке качества поверхностных вод было предложено использовать метод В.В. Шабанова [12]. Основным отличием предлагаемой модели является введение показателя кратности сверхнормативного загрязнения, который, с одной стороны, характеризует загрязненность воды без учета гидрохимического фона, а с другой стороны, может определяться через составляющие водохозяйственного баланса.

По предлагаемой автором методике [3] расчет ИЗВ производится по всем ингредиентам, значения которых превышают ПДК, по формуле

$$I = K_1 K_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{P_i}, \quad (3)$$

где I — значение ИЗВ; $K_1 = 0,1n + 0,4$; K_2 — коэффициент, учитывающий степень опасности ингредиентов для здоровья человека; C_i — значение превышения ПДК концентрацией i -го ингредиента; P_i — значение ПДК; N — число ингредиентов с ПДК более единицы.

Значения коэффициента K_2 были определены с привлечением экспертов, хорошо знакомых с исследуемой проблематикой (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента K_2			
N	1—3	≥ 4	
Класс опасности	III, IV	Один ингредиент I или II класса, остальные III и IV класса	Не менее одного ингредиента I класса и одного ингредиента II класса или три ингредиента II класса, остальные III и IV класса
K_2	1,0	1,2	1,5

Примечание. N — число ингредиентов, концентрация которых превысила ПДК.

Выводы

Предлагаемые методики основаны на расчете ИЗВ по большему объему информации с учетом дополнительных параметров, в частности класса опасности ингредиентов. В опытном порядке по методикам, описываемым формулами (1) — (3), были построены карты районирования территории Узбекистана по качеству поверхностных вод.

Пример разработанной по формуле (2) гидроэкологической карты Республики Узбекистан представлен на рис. 3. Карта построена по многолетним данным на программно-технологических комплексах INTERGRAPH и ArcGIS. Исходными материалами послужили данные всех гидрометеорологических постов Республики Узбекистан за 1997—2006 гг. Общее число постов составило около 110. Это значение является приблизительным, поскольку число гидрометеорологических постов за период исследований изменялось. Районирование территории проводилось по пяти градациям загрязнения поверхностных вод — на рис. 3 каждой из них соответствует свой цвет:

- чистая (ИЗВ менее 1) — темно-зеленый,
- слабо загрязненная (1—2) — светло-зеленый,
- загрязненная (2—3) — желтый,
- сильно загрязненная (3—4) — оранжевый,
- чрезвычайно сильно загрязненная (ИЗВ более 4) — красный.

Серым тоном выделены территории, где отсутствует постоянный поверхностный сток.

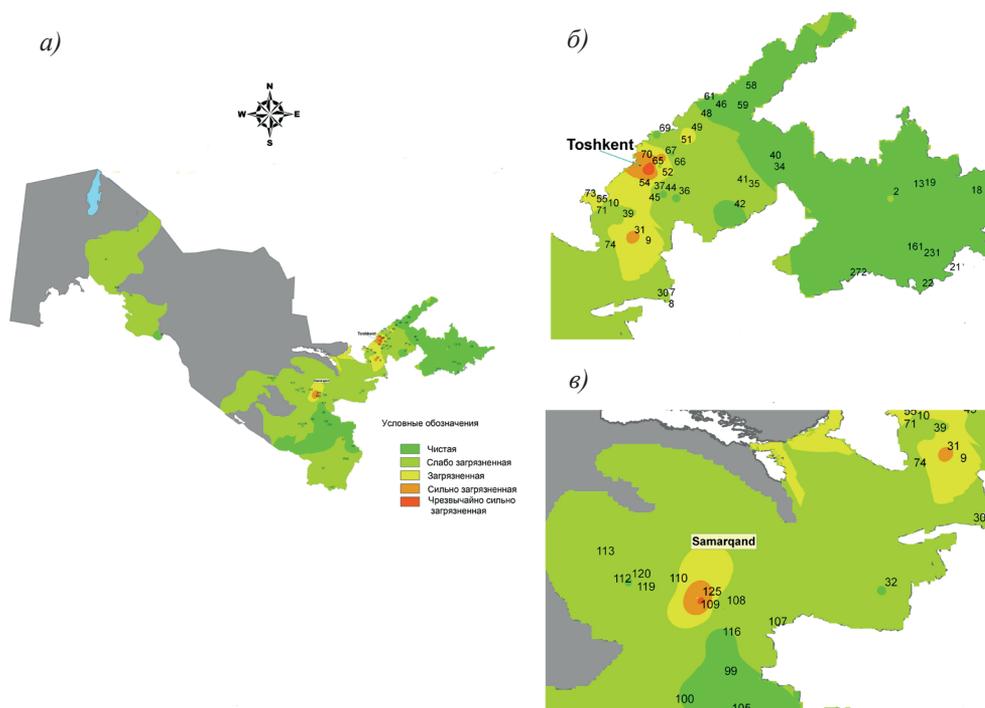


Рис. 3. Карта гидроэкологического районирования территории с выявлением наиболее проблемных территорий в густонаселенных районах.

Были выявлены наиболее проблемные территории, требующие незамедлительных действий по устранению источников сильных загрязнений. Эти территории показаны крупным планом на рис. 3 б) (Ташкент) и 3 в) (Самарканд).

Естественно, предлагаемые методики нуждаются в дальнейших уточнениях, но в целом, по мнению автора, позволяют получить более достоверную оценку степени загрязнения поверхностных вод по сравнению с используемой в настоящее время.

Список литературы

1. Гаевая Т.Я., Писарева В.Н. Экологическая ситуация в Узбекистане, 1995 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://igpi.ru/e404.html>. Дата обращения: 02.03.19.
2. Классы опасности вредных химических веществ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vtothod.ru/klassy/klassy-opasnosti-vrednyh-himicheskikh-veshhestv-i-othodov>. Дата обращения: 03.03.19.
3. Курбанов Б.Т. и др. Способ комплексной оценки качества речных вод. Государственное патентное ведомство РУз. Предварительный патент № IDP 04390.

4. Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. М., 1988. 11 с.
5. Мягкова Н.В. Возможности совершенствования методов оценки качества воды в Республике Узбекистан [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sovershenstvovaniya-metodov-otsenki-kachestva-vody-v-respublike-uzbekistan>. Дата обращения: 12.02.19.
6. Норматова Ш.А., Аишурова М.Д., Эрматова Г.А., Хожиматов Х.О., Султонов Г.Н., Болтабоев У.А. Актуальные проблемы экологии и здоровья населения в Узбекистане [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://publikacia.net/archive/2014/5/2/60ч>. Дата обращения: 03.03.19.
7. Предельно допустимая концентрация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. Дата обращения: 02.03.19.
8. Рафиков В.А. Проблемы Аральского моря. Что дальше? /В сб.: Доклады междунар. науч. конф. «Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии», посвященной 150-летию Ташкентской научно-исследовательской геофизической обсерватории. Ташкент, 15—16 октября 2018 г. С. 377—382.
9. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
10. Фонд защиты генофонда Приаралья [Электронный ресурс]. Режим доступа: > Эволюция Аральского моря. aralgenofond.org. Дата обращения: 11.01.19.
11. Усманов И.А., Ходжаева Г.А., Мусаева А.К. К вопросу совершенствования мониторинга водных объектов в Узбекистане [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-sovershenstvovaniya-monitoringa-vodnyh-obektov-v-uzbekistane>. Дата обращения: 02.03.19.
12. Шабанов В.В., Маркин В.Н. Методика эколога-водохозяйственной оценки водных объектов. М.: ФГБОУ ВПО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 2014. 162 с.
13. Экологическая катастрофа Аральского моря [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.godmol.ru. Дата обращения: 23.01.19.
14. Uzbekistan National Report. Seminar on the role of ecosystems as water suppliers (Geneva, 13—14 December, 2004) / Национальный доклад об использовании и охране водных ресурсов в Республике Узбекистан [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nauka.x-pdf.ru/17raznoe/606568-1-seminar-the-role-ecosystems-water-suppliers-geneva-13-14-december-2004-uzbekistan-national-report-nacionalniy-d.php>. Дата обращения: 12.03.19.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНАМ УНИВЕРСИТЕТА

*Н.Н. Попов¹, В.М. Абрамов¹, В.А. Абрамов¹,
Г.Н. Ткаченко², С.В. Трунин³*

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,
drnickropov@gmail.com

² Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета

³ Государственный институт экономики, финансов, права и технологий

Излагаются результаты разработки научно-методических основ в области проектирования цифровой платформы университета для дистанционного обучения по геоинформационным дисциплинам в составе основных профессиональных образовательных программ университета. Приводятся сведения по созданию виртуальных курсов на основе цифровых технологий панорамных и интерактивных видео. Уделяется внимание анализу различных систем дистанционного обучения, обсуждаются их достоинства и недостатки. Даются рекомендации по выбору наиболее подходящей платформы для нужд университета. Рассматриваются особенности создания образовательных курсов, базирующихся на технологии панорамного видео. Приводится описание их создания и поддержки. Рассматривается один из возможных путей создания интерактивных обучающих видео на платформе YouTube с использованием конечных заставок для перехода между видеофрагментами.

Ключевые слова: цифровая платформа, дистанционное обучение, информационные технологии.

DEVELOPING A DIGITAL PLATFORM FOR DISTANCE LEARNING UNIVERSITY DISCIPLINES

*N.N. Popov¹, V.M. Abramov¹, V.A. Abramov¹,
G.N. Tkachenko², S.V. Trunin³*

¹ Russian State Hydrometeorological University

² Research & Engineering Center Electrotechnical University

³ State Institute of Economics, Finance, Law and Technology

The results of the development of scientific and methodological foundations in the design of a digital university platform for distance learning in geographic information disciplines as part of the main professional educational programs of the university are presented. Provides information on the creation of virtual courses based on digital technologies, panoramic and interactive video. Attention is paid to the analysis of various distance learning systems, their advantages and disadvantages are discussed. Recommendations on choosing the most suitable platform for the needs of the university are given. The features of creating educational courses based on the technology of panoramic video are considered. Describes their creation and support. It also describes the principle of creating interactive training videos on the YouTube platform using the final screensaver to switch between video clips.

Keywords: digital platform, distance learning, information technology.

Введение

Стремительное развитие информационных технологий приводит к серьезным методическим изменениям устоявшихся бизнес-процессов в различных областях [2, 3]. В последние пять лет способы получения образования начинают приобретать новые реализации, формируя новые концепции подачи и получения материалов. Человек в современном обществе все чаще предпочитает дистанционное обучение очному обучению в учебных центрах. Спектр применения дистанционных программ очень широк: от повышения квалификации преподавателей при Всемирной метеорологической организации до изучения теоретических основ вождения в автошколе.

Преимуществами такого подхода к преподаванию в первую очередь являются массовость, удобство и экономическая выгода. Основные финансовые затраты необходимы в момент создания курса группой высококвалифицированных специалистов и на своевременное обновление материалов, в то время как обеспечение жизнедеятельности (техническая поддержка работоспособности системы, проверка сданных работ, ведение отчетности и выдача сертификатов) может выполняться менее высокооплачиваемыми сотрудниками, что значительно снижает расходы образовательной организации. Применение систем дистанционного обучения (СДО) позволяет слушателям работать с системой в любое удобное время и с любых устройств (персональные компьютеры, планшеты, смартфоны), что позволяет пользователю более гибко планировать обучение. Более того, дистанционный курс могут одновременно проходить сотни и даже тысячи слушателей без необходимости со стороны образовательной организации обеспечивать поток необходимыми техническими средствами и учебным пространством, что значительно снижает расходы. Цель настоящей статьи состоит в описании подходов к разработке цифровой платформы университета, обеспечивающей поддержку учебного процесса по направлениям подготовки.

Обзор наиболее применяемых систем дистанционного обучения

Рассматривая проблематику дистанционного обучения, невозможно обойти вопрос о платформе, на которой будут размещаться разрабатываемые курсы. До недавнего времени самой популярной платформой была Moodle. Согласно главному сайту проекта, данную систему используют в 228 странах мира, а общее число курсов превысило 18 000 000 [5]. Разработанная в августе 2002 г. система почти не претерпела качественных изменений и выглядит на сегодняшний день устаревшей. Стоит также отметить и наличие в базовом комплекте большого числа функций, которые более ориентированы на зарубежные образовательные организации, чем на российские. Данный программный комплекс широко используется во многих вузах России и СНГ, в том числе и в РГГМУ.

Второй по популярности платформой является Sakai. Данная система установлена в РГГМУ, СПбГУ, САФУ и других российских образовательных учреждениях. Всего в мире насчитывается порядка 350 организаций, использующих данную систему для проведения дистанционного обучения [1, 6]. Так же как и

Moodle, данный программный комплекс является свободным веб-приложением с открытым кодом, что позволяет дорабатывать эти комплексы для нужд конкретной организации. В 2012 г. в РГГМУ была проведена локализация данного продукта, в рамках которой были внесены значительные правки в код комплекса. Sakai может интегрироваться с Bigbluebutton — открытым программным обеспечением для проведения веб-конференций. Главным недостатком Sakai является слабая информационная поддержка продукта, значительно замедляющая пуско-наладочные работы и поддержку работоспособности.

Обе упомянутые системы подразумевают развитую сетевую инфраструктуру и используют собственную серверную инфраструктуру образовательной организации, что приводит к необходимости их технического обслуживания силами самой организации. Однако организация может арендовать сервер с предустановленной системой Moodle у сторонней организации, занимаясь только контентом и сопровождением учебного процесса.

В качестве коммерческого решения стоит упомянуть систему iSpring, которая в основном обеспечивает потребности крупных компаний, таких как Яндекс, Сбербанк, Johnson&Johnson, Philips и др. iSpring предоставляет широкий спектр возможностей по учету деятельности студентов и формированию отчетности, а также идет в комплекте с программным комплексом iSpring Suite, позволяющем загружать в систему презентации прямо из Powerpoint. Система создания и редактирования тестов также реализована с помощью iSpring Suite. Платформа имеет версии для Android и iOS, прекрасно сопровождается, однако годовая подписка на сервис обойдется достаточно дорого.

В качестве альтернативы всем вышеперечисленным платформам может служить сервис Google Classroom, который в апреле 2017 г. стал доступен широкому кругу пользователей. Так же как и iSpring, Google Classroom работает на платформах Android и iOS, что позволяет проходить обучение с мобильных устройств. Компания Google объединила в этой СДО почти все свои сервисы, нацелив их на решение конкретных образовательных задач:

- Google Drive для создания, хранения и коллективного доступа к учебным материалам;
- Google Документы, Google Таблицы и Google Презентации для создания и демонстрации материалов;
- YouTube для просмотра видеолекций и обучающих роликов;
- Google Mail для связи и групповых рассылок;
- Google Calendar для координации расписания;
- Google Hangouts для проведения вебинаров; в базовой версии в видеоконференции могут принять участие до 10 человек, в расширенной — до 25 человек, а если использовать сервис в качестве чата, то до 150 человек.

Приглашение к участию в курсе реализовано посредством рассылки уведомляющих электронных писем или путем индивидуального подключения с указанием кода курса, который сообщает преподаватель.

Главными преимуществами данной платформы являются ее бесплатность, легкость в использовании, универсальность доступа с различных устройств и



Рис. 1. План проведения тренировочного исследования акватории.

гибкая система обратной связи [4]. Использование платформы Google Classroom снимает необходимость организации в необходимости содержания системного администратора (все процессы выполняются на серверах Google) и контент-менеджера (каждый преподаватель сам отвечает за наполнение своего курса).

Подготовка некоторых курсов, читаемых в Российском государственном гидрометеорологическом университете, отличается определенной сложностью описания процессов, выполняемых в полевых условиях (рис. 1). Чтобы показать весь цикл научного исследования — от формулировки задачи до принятия решения, необходимо описать следующие этапы: 1) сбор полевых данных, 2) обработка и анализ полученных значений, 3) построение карт распределения характеристик. Курсы, посвященные второму и третьему этапам, достаточно легко подготовить, используя, кроме необходимого специализированного программного обеспечения, установленного на компьютере преподавателя, любую программу записи экрана (например, свободно распространяемую CamStudio), микрофон и в некоторых случаях камеру для записи самого преподавателя, объясняющего отдельные разделы. Всю подготовительную работу преподаватель может провести вне университета, представив в конце записи черновой материал для обработки и оформления ответственному сотруднику.

Разработка обучающих материалов

Наиболее сложной задачей является обучение слушателей прикладным аспектам проведения измерений и работе с приборами, для чего требуется развитая практическая база. Данное обучение может быть разбито на два следующих этапа.

Подготовительный этап. Студентам предлагается пройти тренировку по работе с приборами на виртуальном тренажере. Общее представление о работе с измерительной техникой удобно отражать с помощью панорамных видео,

поддерживаемых платформой YouTube. Для производства используется специальная панорамная камера стоимостью не более 30 000 рублей, а для просмотра — как обычный компьютер (мышь изменяет положение камеры), так и очки виртуальной реальности (стоимостью до 1500 рублей), использующие телефон пользователя в качестве экрана (рис. 2).

При переходе в режим просмотра видео с помощью очков виртуальной реальности экран смартфона делится на две части, каждая из которых транслирует видео для левого и правого глаза в отдельности, создавая эффект присутствия. С примером такой экскурсии по гидрографическому судну, подготовленной авторами данной статьи, можно ознакомиться по ссылке: youtu.be/bs8M7w9iORw. Созданные по технологии Google Street View обзорные прогулки по судну позволяют студентам начать ориентироваться на борту судна без необходимости его посещения.

Процесс проведения измерений может быть представлен в виде интерактивных роликов на YouTube, где в конце каждого отрывка студенту предлагается сделать выбор дальнейших действий оператора измерительного прибора (рис. 3). Если дан корректный ответ, то видео продолжается, если студент совершил ошибку, дается объяснение.

Прикладной этап. После завершения обучающего виртуального курса студенты проходят полевую практику. Ожидается, что работа с тренажерами позволит



Рис. 2. Пример просмотра панорамного обучающего видео с помощью очков виртуальной реальности.

Изображение разделено для левого и правого глаза.



Рис. 3. Пример окончания интерактивного обучающего видео по работе с CTD-зондом, где студенту предлагается выбрать следующее действие.

значительно сократить число допущенных ошибок, а число случаев выведения из строя оборудования будет минимизировано.

Особенно актуален данный подход для студентов заочной формы обучения, не имеющих постоянного доступа к лабораторной базе университета. Также часть наиболее эффективных (с рекламной точки зрения) материалов может использоваться в качестве продвижения университета на выставках и конференциях. Стенды, оборудованные очками виртуальной реальности и позволяющие наглядно показать работу специалиста-гидрометеоролога в экспедиционных условиях, являются эффективным и доступным средством привлечения абитуриентов. Похожую технологию достаточно успешно применяет в своей практике Институт повышения квалификации Росгидромета.

Выводы

Таким образом, применяя введение в курс подготовки специалиста дистанционного обучения и технологии визуализации, можно значительно снизить расходы на подготовку технических специалистов, частично заменив дорогостоящие тренинги виртуальной имитацией, и сделать процесс обучения более наглядным и доступным. Более того, сопряженное со значительными рисками проведение полевых практик накладывает на преподавателей дополнительную ответственность за жизнь и здоровье студентов. Применение виртуальной реальности способно обозначить и предупредить потенциальные опасности.

Список литературы

1. Биккулов А.С. Опыт сочетания платформы дистанционного обучения SAKAI и социальной сети ВКонтакте для поддержки учебного процесса / В сб.: Материалы XI Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество». ИТМО, 2008. С. 22—24.
2. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48. С. 11—32.
3. Сумленный С. Останется десять университетов. Эксперт. 2013. № 48 (878).
4. eLearningIndustry [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elearningindustry.com/google-classroom-review-pros-and-cons-of-using-google-classroom-in-elearning> — Google Classroom Review: Pros And Cons Of Using Google Classroom In eLearning, 2015 (дата обращения: 15.04.19).
5. Moodle [Электронный ресурс]. Режим доступа: moodle.net/stats/?lang=ru — Moodle Statistics, 2019 (дата обращения: 18.04.19).
6. Sakai [Электронный ресурс]. Режим доступа: web.archive.org/web/20140108022526/http://www.sakaiproject.org/organization-list — Sakai Statistics, 2019 (дата обращения: 18.04.19).

ПОДГОТОВКА АСПИРАНТОВ К НАУЧНОМУ ДОКЛАДУ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ: ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ И СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

Н.Ю. Фёдорова

Российский государственный гидрометеорологический университет,
natajfedorova@rambler.ru

Рассматривается проблема формирования компетенций, необходимых для подготовки и проведения докладов на международных конференциях на английском языке. Представлен анализ наиболее часто встречающихся в текстах выступлений стилистических недочетов. Сформулированы причины их возникновения. Предлагается алгоритм организации совместной работы преподавателя и аспирантов по подготовке доклада на английском языке, в процессе которой пристальное внимание уделяется стилистическим характеристикам жанра устного доклада, его композиционной структуре, правилам оформления слайдов, а также стратегиям подготовки к выступлению.

Ключевые слова: научная презентация, аспирантура, обучение иностранному языку, английский для академических целей.

DEVELOPMENT OF POSTGRADUATE STUDENTS' ABILITY TO MAKE SCIENTIFIC PRESENTATIONS IN THE ENGLISH LANGUAGE

N.Y. Fedorova

Russian State Hydrometeorological University

The issues related to development of postgraduate students' ability to deliver scientific presentations at international conferences in the English language are considered. The author analyses the most common stylistic flaws of students' speech. The causes of these stylistic flaws are formulated. An algorithm that helps organize the process of teaching postgraduate students to make a presentation of research results is suggested. Attention is concentrated on stylistic and structural features of scientific presentations, the rules of slide design, and the strategies that students can use to prepare for their speech at a conference.

Keywords: scientific presentation, postgraduate course, foreign language teaching, English for academic purposes.

Важной задачей обучения дисциплине «Иностранный язык» в рамках программ аспирантуры является формирование у обучающихся готовности участвовать в работе международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач. Аспиранты должны научиться представлять результаты своей научной деятельности на иностранном языке: проводить доклады по теме исследования, писать аннотации статей, принимать участие в научных дискуссиях с зарубежными коллегами.

Значительное место в обучении занимает формирование компетенций, необходимых для подготовки и проведения выступлений на конференциях. В публикациях отмечается, что выступление с презентацией на английском языке обладает существенным методическим потенциалом, так как сочетает в себе развитие умений во всех видах речевой деятельности [3]. На этапе подбора материала обучающиеся развивают умения чтения, вырабатывают собственные стратегии отбора и систематизации материала. Во время подготовки доклада развиваются умения письменной речи, а в ходе выступления — умения устной речи [1]. Выступление на конференции предполагает диалог со слушателями: вопросы могут быть неожиданными, и таким образом формируется готовность к спонтанному общению на английском языке.

Кроме того, доклад, который обучающиеся делают на занятии по английскому языку, является своеобразной репетицией будущих публичных выступлений, в том числе защиты диссертации. Подобная репетиция позволяет научиться четко и ясно формулировать решаемую в ходе исследования проблему, а также ключевую идею, которая лежит в основе предлагаемого решения и составляет новизну и значимость работы. Любые неточности или недостаточные четкость и ясность формулировок выявляются при попытке передать их устно на английском языке.

Электронная презентация, сопровождающая доклад и призванная сделать его интересным и запоминающимся, должна способствовать лучшему пониманию представляемой информации. В литературе сформулированы основные характеристики эффективного доклада с презентацией, то есть доклада, который слушатели запомнят и который убедит их в значимости результатов научной работы выступающего. В число характеристик успешного выступления включаются: четкая структура доклада, визуализация информации при помощи слайдов, краткость текста слайдов, оптимальная для слушателя координация информации на слайдах и текста речи, деление доклада на смысловые блоки и использование сигнальных средств при переходе от одного аспекта к другому, наглядная демонстрация актуальности решаемой проблемы [5, 6, 8, 9].

Следует учитывать, что высокий уровень сложности и новизны представляемого в научном докладе материала, сложность структуры текста сами по себе могут стать причиной провала выступления. Структура предложений, их связь между собой в каждом отдельном фрагменте, выбор речевых средств выражения идей, последовательность и логика изложения фактов, могут способствовать или препятствовать эффективной коммуникации. Поэтому стилистические и риторические характеристики научного доклада требуют от автора пристального внимания и целенаправленной работы над текстом.

Научный доклад рекомендуется строить по общепринятой в научном сообществе схеме. Стереотипность текста, то есть его подчиненность характерным для однотипных ситуаций моделям организации, ускоряет коммуникативный процесс [4]. Если слушатели заранее знают, какой аспект и в какой момент доклада будет освещен, они воспримут информацию более полно. Композиционно-смысловая структура научного текста обусловлена логикой научной познавательной деятельности [2]. Рекомендуемая структура научного доклада состоит из следующих

блоков: приветствие; постановка проблемы и обоснование ее актуальности; обзор существующих научных концепций; цель, гипотеза, методы, результаты, возможные ограничения и погрешности; обсуждение. Кроме того, хорошей традицией является выражение благодарности всем лицам и организациям, которые участвовали или способствовали выполнению работы.

Основная часть разделяется на более мелкие блоки, каждый из которых сопровождается отдельным слайдом. В своей монографии В.Е. Чернявская вводит понятие композиционно-прагматического сегмента (КПС). Каждый КПС выполняет четко поставленную задачу, например определить цель исследования или представить описание используемых методов [7]. Чернявская отмечает, что для каждого композиционно-прагматического сегмента можно выделить набор клишированных фраз, которые помогают выполнить коммуникативную его задачу. Хотя в указанной работе исследовались характеристики жанра научной статьи, данный подход применим и к устному докладу: преподаватель составляет список композиционно-прагматических сегментов, которые обычно включаются в доклад, кратко определяет коммуникативную задачу каждого из них, предлагает обучающимся соответствующие задаче клишированные конструкции, объясняет их функцию. Например, для формулировки результатов исследования: *our findings show / prove; we conclude that*.

Каждый сегмент сопровождается слайдом. Основная мысль в виде краткого тезиса помещается в верхней части слайда в соответствии со схемой «объект — предикат». Иначе рекомендуется оформлять последний слайд с выводами: в поле «заголовок слайда» помещается предмет доклада, а в поле «текст слайда» — основные тезисы, относящиеся к предмету доклада, но не более четырех позиций.

Как показывает опыт, обучающиеся обычно используют стратегии подготовки доклада, которые с их точки зрения позволят сэкономить время и при этом максимально полно отразить все аспекты исследования и четко структурировать информацию. Неожиданно для авторов используемые ими приемы работы часто приводят к прямо противоположному результату.

Во многих случаях в качестве исходного материала аспиранты используют введение к своей диссертации и скрупулёзно переводят его на английский язык, сохраняя стилистику. На слайды переносится весь текст. Другой вариант: берется статья, написанная для журнала, и разбивается на фрагменты. Фрагменты текста помещаются на слайды.

У данной стратегии есть положительные стороны. Подчеркнем, во-первых, психологический фактор. Усвоенный за годы обучения опыт подсказывает: вначале должен быть письменный текст. Использование на первом этапе опоры в виде письменного текста придает уверенности, позволяет преодолеть боязнь публичных выступлений. К плюсам данной стратегии можно отнести также относительную легкость структурирования доклада: все необходимые информационные блоки (актуальность, цель, методы, результаты, возможные ограничения и погрешности) присутствуют и излагаются логично и последовательно.

Основной недостаток презентации, подготовленной с применением обсуждаемого нами подхода, состоит в том, что в докладе сохраняются стилистические

особенности письменной речи (избыточное число второстепенных членов предложения, причастные обороты, сложноподчиненные предложения, страдательный залог). Кроме того, текст на слайдах получается объемный, не учитываются особенности восприятия и правила составления модульного текста.

Целью нашего исследования был анализ наиболее типичных стилистических недостатков докладов аспирантов, которые они представляли в ходе проведения моделируемой ситуации «Конференция» на занятиях по английскому языку.

Первая проблема — это использование второстепенных членов предложения между подлежащим и сказуемым, что, как отмечается в литературе, затрудняет понимание смысла предложения [9]. Приведем типичный пример.

Issues of information security at the present stage are considered as priority in government structures and scientific institutions.

В данном предложении выделено обстоятельство времени, которое расположено между подлежащим и сказуемым. Оно не является необходимым для понимания смысла предложения и поэтому должно быть исключено.

Вторая особенность, которая характерна для письменного текста, это вводные фразы. Многие из них являются своего рода клише и часто употребляются в русскоязычных научных статьях в качестве средств связности. Однако в устной речи существует правило: важная информация должна сообщаться сразу, в начале предложения. Поэтому вводные фразы следует использовать с осторожностью. Например, в предложении ниже переведенная с русского языка фраза «несмотря на это, невозможно не заметить, что...» (полужирный шрифт) затрудняет восприятие смысла высказывания.

Despite this, it is impossible not to notice that the process of ensuring information security is often haphazard.

Очевидно, что автор высказывания пытался акцентировать проблему с помощью выделенной фразы. Предложим другой вариант формулировки, которая сохраняет ту же интенцию автора.

The process of ensuring information security is often haphazard. This fact should not be ignored.

Рассмотрим еще один пример, который содержит перевод вводной клишированной фразы «учитывая все вышесказанное». Кроме того, поскольку в тексте выступления структура «подлежащее — глагол в роли сказуемого» воспринимается слушателями быстрее других структур, подчеркнутый фрагмент следует изменить.

Taking into account all the above, there is a need to continue the study of heat exchange and improve the previously obtained results.

Перефразируем данное высказывание более коротко, используя глагол вместо существительного «need».

So, we need to continue the study of heat exchange and improve the previously obtained results.

Вследствие переноса фрагментов текста из статьи в устный доклад возникает еще одна ошибка. Предложение, приведённое ниже, было включено в ту часть выступления, где обосновывалась актуальность исследования.

*This is a consequence of the **inadequacy** of the information security model to the software and hardware environment*

В данном случае следует использовать глагол с семантикой, подчеркивающей несовершенство традиционно используемой модели, что в дальнейшем позволит усилить впечатление слушателей от предлагаемого докладчиком решения, подчеркнет значимость результатов.

*The reason is that the information security model of the software **does not suit** the hardware environment perfectly.*

Кроме того, следует обращать внимание на перевод словосочетаний, содержащих существительные в родительном падеже, что часто встречается в научном стиле речи. Например, «изучение обмена теплом поверхности Ладожского озера с атмосферой...». При дословном переводе получается: «*The study **of** the exchange **of** heat **of** the surface **of** Lake Ladoga with the atmosphere ...*». В данном случае можно порекомендовать автору составить предложение с использованием коротких словосочетаний «*heat exchange*», «*Lake Ladoga surface*».

Еще одна особенность письменного текста – это обилие причастных и депричастных оборотов, сложноподчиненных предложений. В устном докладе число таких элементов должно быть сведено к минимуму. Длинные предложения разделяются на несколько. Приведем пример.

В конце 1990-х годов было проведено лимническое районирование глубин Ладожского озера, необходимое для изучения физико-химических и биологических процессов, которые протекают в озере.

Limnic zoning of the Lake Ladoga depths was carried out in the late 1990s. It was necessary to study the physicochemical and biological processes in the lake.

Приведенные стилистические недостатки усложняют и изложение, и понимание доклада, что подтверждается двумя фактами. Во-первых, в этих фрагментах интонация выступающего становилась более монотонной и неуверенной, как если бы эти фрагменты обучающимся было трудно заучить наизусть. Во-вторых, слушатели не понимали смысл данных предложений, просили вернуться к этим фрагментам, хотя слушали очень внимательно.

Методика обучения аспирантов умениям подготовки научного доклада с презентацией может допускать использование ими письменных текстов в качестве базы для дальнейшей работы. Однако прежде, чем начать подготовку к докладу, обучающиеся должны быть ознакомлены с тем, что следует включить в доклад и как выглядят правильно оформленные слайды. Кроме того, они должны осознать, что статья и доклад — разные жанры речи и в них используются разные стилистические приемы.

Если обучающийся предлагает в качестве исходного материала свою статью, ее следует разделить на отдельные композиционно-прагматические сегменты. В каждом выделяются один или несколько ключевых аспектов, позволяющих представить значимость результатов исследований наиболее убедительно и наглядно. Все второстепенное исключается. Ключевые идеи перефразируются. Каждый фрагмент последовательно разрабатывается обучающимся в отдельный промежуток времени.

На занятиях проводятся мини-презентации, состоящие из отдельных смысловых блоков. Обучающиеся должны начать «слушать себя со стороны» и сознательно контролировать, как они строят предложения, какие речевые средства используют, как расставляют интонационные акценты, паузы. Когда обучающийся излагает свой доклад полностью, акцентировать его внимание на этих аспектах сложнее, поэтому рекомендуется репетировать каждый фрагмент отдельно.

В настоящей статье представлен краткий анализ наиболее типичных стилистических ошибок, которые являются следствием того, что аспиранты начинают подготовку доклада, опираясь на уже написанную статью. В результате устное выступление сохраняет характерные особенности письменной речи. Предлагаемая методика формирования компетенций, необходимых для подготовки доклада на английском языке, допускает возможность использования обучающимися уже усвоенных ими ранее стратегий планирования презентации. Работа над докладом выстраивается таким образом, чтобы скорректировать отрицательные результаты применения этих стратегий, используя их положительные стороны.

Список литературы

1. *Архангельская А.И., Дектерев С.Б.* Использование методики как средства формирования профессиональной языковой компетенции в условиях разноуровневой подготовки студентов в неязыковых вузах / В сб.: Научная дискуссия: вопросы педагогики и психологии. Материалы XLVII Международной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы педагогики и психологии». № 2 (47), ч. 2. М.: Интернаука, 2016. С. 84—88.
2. *Баженова Е.А.* Специфика смысловой структуры научного текста и его композиции / В кн.: Стилюстика научного текста (общие параметры). Т. 2, ч. 1. Пермь: изд-во Пермского ун-та, 1996. С. 158—235.
3. *Герасимова И.Г.* Разработка рабочих программ и использование современных технологий в обучении иностранному языку будущих магистров в неязыковом вузе // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2016. № 5 (59), ч.2. С. 183—186. / Филологические науки. Вопросы теории и практики., № 5, Т 2, 2016. С 183 - 186. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25775295> (дата обращения: 09.12.2018).
4. *Каменская О.Л.* Лингвистика на пороге XXI века / В сб.: Лингвистические маргиналии. Научные труды МЛГУ. 1996. Вып. 432. С. 13—21.
5. *Митина Ю.В.* О методологии оценивания учебных электронных презентаций на иностранном языке / В сб.: Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке. Труды XI Санкт-Петербургского конгресса. СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 195—196.
6. *Н.Ю. Фёдорова, Н.В. Игнатьева, Ю.В. Митина.* Методика обучения составлению доклада по специальности на иностранном языке и подготовке мультимедийной презентации / В сб.: Профессионально-ориентированное обучение языкам: реальность и перспективы. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 20—21 февраля 2018 г. СПб: изд-во СПбГЭУ, 2018. С. 183—189 [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34984539> (дата обращения: 09.03.2019).
7. *Чернявская В.Е.* Интерпретация научного текста / Теоретическое учебное пособие. СПб: Наука, 2004. 127 с.
8. *Alley M.* The Craft of Scientific Presentations: Critical Steps to Succeed and Critical Errors to Avoid. 2nd ed. Springer, 2013.
9. *M. Saville-Troike.* The Ethnography of Communication. An Introduction. Blackwell Publishing, 2003.

ОБ ИСТОЧНИКАХ МЕТАФОРИЗАЦИИ В АНГЛИЙСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ЛЕКСИКЕ

Ф.М. Ярмухамедова

Российский государственный гидрометеорологический университет,
kafedra_inyaz@rshu.ru

Рассматриваются метафорические единицы семантической группы «метеорология» в английском языке. В соответствии с классификацией А.П. Чудинова метафоры категоризованы по сфере источника происхождения. При этом выделены и проанализированы четыре типа метафоры: антропоморфная, природоморфная, социоморфная и артефактная метафоры. Описаны фреймы, структурирующие каждую метафору. Выявлено преобладание артефактных и антропоморфных метафор, проведен анализ данного явления.

Ключевые слова: метафора, метеорологическая лексика, английский язык, антропоморфная метафора, природоморфная метафора, социоморфная метафора, артефактная метафора.

SOURCES OF METAPHORIZATION IN ENGLISH METEOROLOGICAL VOCABULARY

F.M. Yarmukhamedova

Russian State Hydrometeorological University

The metaphorical units of the semantic group “meteorology” in the English language are considered. Following A.P. Chudinov’s classification, metaphors have been classified into four types according to their origin source. The following metaphors have been identified and analyzed: anthropomorphic, zoomorphic and phytomorphic, sociomorphic and artifactual. The conceptual frames structuring each metaphor type have been described. The prevalence of artifactual and anthropomorphic metaphors has been revealed and analyzed.

Keywords: metaphor, meteorological vocabulary, the English language, anthropomorphic metaphor, zoomorphic metaphor, phytomorphic metaphor, sociomorphic metaphor, artifactual metaphor.

В настоящей статье рассматриваются источники метафоризации и употребление метафорических единиц для обозначения природных явлений, объектов и процессов семантической группы «метеорология» в английском языке.

Изучению метеорологической лексики посвящено достаточно много научных исследований. Это объясняется тем, что метеоявления относятся к среде обитания человека. В ряде научных работ метеолексика рассматривается в сопоставительном аспекте двух языков [4, 5, 10], среди которых, в частности, можно выделить исследования, посвященные сравнительному анализу метеорологической лексики в английском и русском языках [1, 7—9, 13—15]. В статье В.Б. Богоявленского дан обзор исследований семантического поля «погодные условия» за 20 лет начиная с 80-х годов прошлого столетия [2].

В то же время метафора и процесс метафоризации неоднократно становились предметом ряда исследований. Однако до сих пор не получил системного

описания такой значимый фрагмент метафорической картины мира, как метеорологическая сфера. Всего лишь в нескольких диссертационных исследованиях изучается «метеорологическая метафора» в русском и немецком языках [6, 12, 16, 17], однако в них не рассматривается употребление метафоры в метеорологической лексике. Что касается английского языка, то исследования в этой области практически отсутствуют; исключение составляют попытки автора настоящей статьи классифицировать метафоры, выявленные в семантическом поле «метеорология», в зависимости от источника происхождения [19].

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется тем, что, с одной стороны, метафора является важной частью языкового фонда и нуждается в дальнейшем изучении, а с другой стороны, отсутствуют научные работы, посвященные изучению метафоры в английской метеорологической лексике. В то же время последняя представляет собой одну из важных тематических групп, поскольку номинирует явления и процессы, с которыми ежедневно сталкивается каждый человек.

Объектом исследования являются английские лексико-фразеологические метафорические единицы, входящие в тематическую группу «метеорология», отобранные методом сплошной выборки из Англо-русского метеорологического словаря И.П. Гейбер [3]. В качестве дополнительных источников привлекались электронные словари: International Cloud Atlas [23] и British Weather Terms [21]. Общее число выявленных метафорических единиц составило 174.

Анализ отобранных единиц позволил объединить метафоры согласно классификации А.П. Чудинова, которая признана отечественными лингвистами в качестве основания для категоризации различных метафор по сфере источника на следующие типы [18]: 1) *антропоморфная* — подразумевает моделирование реальности на основе подобия человеческому телу, разуму, чертам характера; 2) *природоморфная* — моделирует картину мира на основе концептов окружающей природы; 3) *социоморфная* — реализует концепты социальной действительности; 4) *артефактная* — отражает результаты деятельности труда человека.

Артефактные метафорические единицы составляют самую большую группу — 91 метафора. Они называют метеонимы-метафоры, в состав которых входит слово-компонент из *бытовой* (предметной) лексики. Источником метафоризации метеорологической лексики, как показал анализ, чаще всего являются такие понятийные сферы, как «дом», «одежда и аксессуары», «драгоценные камни и украшения».

Внутри сферы «Дом» (73 метафоры) можно выделить фрейм «конструкция дома». Составляющие здания — потолок, стена, окно, столб, крыша и другие компоненты — переосмысливаются в метеорологической лексеме-метафоре, образуя новые номинации: *ceiling unit* (нижняя граница облака), различные виды облаков: *cloud wall*, *chimney cloud*; *ceiling and visibility unit* (отсутствие облачности и хорошая видимость), *window* (просвет в облаках), *sun / light pillar* (солнечный столб); *moon pillar* (лунный столб); *sand pillar*, а иногда даже и *sand devil* (песчаный трюмб / вихрь).

К подобным фразеологизмам можно отнести и те, в которых встречается компонент «башня»: *cloud tower* (башня облака); *turret* (башенка облака), а также и целая «улица»: *cloud street* (облачная улица). Примечательно, что названия природных явлений удивительным образом точно передают визуальное впечатление, которое они производят. Кучевое облако с большим вертикальным развитием, изолированно растущее на фоне более низких облаков, действительно напоминает средневековую башню *cloud tower*, а ряды узких параллельных облаков напоминают городскую улицу с многосторонним движением *cloud street*. По аналогии центральную часть США, где наиболее часто происходят торнадо, именуют *tornado alley*.

Далее, к сфере «дом» были также отнесены фреймы, связанные с предметами, наполняющими пространство дома. Это «предметы обихода»: *brush discharge*, *key forecast* (опорный прогноз), *dumb-bell depressions*, *skyhook* (метеозонд), *air envelope* (воздушный слой), *bucket thermometer*, *comb nephoscope*, *wet bulb*, *weather-glass*, *dangerous semicircle*, *lunar cross* (лунный крест), *solar cross/sun cross* (солнечный крест), *helm wind* (вид холодного ветра); «постельные принадлежности и ткани»: *sheet lightning* (сплошная молния), *cotton clouds* («ватные» облака); «кухонная утварь»: *funnel cloud* (облако-воронка), *forked lightning* (разветвленная молния).

Одежда и аксессуары — 14 метафор. К группе артефактных метафор была отнесена метеолексика, связанная с метафорическим переосмыслением названий элементов одежды человека, таких как *cap*, *scarf*, *belt*, *sleeve*, *ribbon*, *sock*. Перенос при этом осуществляется на основе признака внешней формы и месторасположения: *storm/wind belt* (пояс бурь/пояс ветров), *scarf cap* (облачная шапка), *wind sock* или *sleeve* (ветровой конус), *ribbon* (ленточная молния).

Драгоценные камни и украшения — четыре метафоры. Природные атмосферные явления всегда привлекали внимание людей, не только пугая их (торнадо, ураган, смерч), но и завораживая своей красотой, напоминая прекрасные драгоценные камни и украшения. Мелкие ледяные кристаллы называли *diamond dust* (алмазная пыль); переливающиеся полярные стратосферные облака — *mother-of-pearl clouds* (жемчужные облака), а четочную молнию — *pearl necklace* (перламутровое ожерелье) или *beaded lightning* (молния-бусы), так как она представляла собой последовательность светящихся относительно небольших сферических образований, иногда наблюдающихся в атмосфере.

Антропоморфные (соматические) метафоры занимают большое место в метафорической метеорологической лексике английского языка и представляют собой вторую по численности группу — 41 метафорическая единица. В их основе, согласно классификации А.П. Чудинова, лежат понятийные сферы «части тела человека», «родство», «болезнь, смерть».

Физиологическая метафора восходит к сфере «части тела человека» и насчитывает 33 единицы. В лексике любого языка в качестве источника антропоморфных метафор широко используется соматика человека. Соматизмы (от древнегреческого слова «soma» — тело) — это номинации, исходным значением которых являются названия частей тела и органов человека. В нашем случае наблюдается

метафорический перенос соматических названий, связанных с физическим строением человека, на метеонимы по принципу аналогии¹. Встречаются названия как тела (*body of air* — масса воздуха), так и головы (*thunderhead* — грозовой фронт, *rainhead* — слой атмосферных осадков), шеи (*neck*) и лица (*windward face* — навстречная сторона). Однако большей частью это все-таки части лица — язык, глаза, рот, нос, зубы.

Особенно много в английском языке соматизмов с компонентом «язык», когда говорят о части массы воздуха, вклинивающейся в основную массу. Видимо, во всех этих случаях ассоциация с языком диктуется его формой, напоминающей клин, который врезается в основную воздушную массу. Причем «язык» (то есть масса воздуха) может быть холодным (*tongue of cold air*) и даже ледяным (*ice tongue*), а также теплым (*tongue of warm air*), влажным (*moist tongue*) и сухим (*dry tongue*).

Также выявлено несколько соматизмов с компонентом «глаз» для обозначения вида ветра: *eye of the storm*, *bull's eye* (глаз бури или урагана — область прояснения и штиля в центре бури/урагана), *ox's eye* («бычий глаз»). Центральная область тропического циклона диаметром в несколько километров с очень слабым ветром и ясным небом, окруженная со всех сторон облаками в виде громадного амфитеатра, видимо, напоминала в древности людям «глаз», отсюда и названия приведенных выше терминов, а также и связанные с ними *eye work* (глазомерная съемка) и *eye sounding* (зондирование в глазу бури).

Метафоризация — исторически развивающийся и изменяющийся процесс. На одном этапе языкового развития могут преобладать одни образные средства и приемы метафорического словоупотребления, другому этапу присущи совершенно иные возможности метафоризации. Например, морской термин для указания направления ветра *eye of the wind* в старину называли *teeth of the gale*, используя таким образом разные части лица для обозначения одного и того же природного явления.

Метафора родства. В этой группе были выявлены всего три метафоры, в состав которых входят компоненты, обозначающие членов семьи: *mother cloud* (материнское облако), *parent cloud* (первый циклон серии), *old wives' summer* (золотая осень).

Морбиальная метафора. Это лексика, образно обозначающая болезни, страдания, увечья, войну, смерть. Она представлена в метеолексике пятью метафорами: *dead motion* (сильный встречный ветер), *dead-air region* (мертвая зона в потоке воздуха), «*blind*» *forecast* («слепой» прогноз), *shooting-star* (метеор), *sickly / unhealthy climate* (нездоровый климат).

¹ Следует отметить, что некоторые авторы при изучении антропоморфной метеорологической лексики слово «соматический» использовали не только для обозначения биологического аспекта существования человека, но и для представления его социального облика, то есть предметов, тесно связанных с физиологическим аспектом существования человека, таких как одежда, головные уборы, а также других аксессуаров, составляющих его образ. В частности, А.Р. Манина исходя из этого определения к группе антропоморфных метафор отнесла метеолексику, связанную с метафорическим переосмыслением названий элементов одежды человека [11]. Автору же представляется более убедительной классификация А.П. Чудинова, который отнес одежду и аксессуары к артефактной метафоре, в рамках которой она и рассматривается в данной работе.

Итак, мы видим, что человек воспринимал явления природы как живой организм, напоминающий его самого как внешне, так и внутренне. Именно это представление о природе как о чем-то одушевленном, ее олицетворение приводило к созданию соматических метафор. При этом в данной семантической группе преобладают образы, связанные с метафорическим использованием наименований частей человеческого тела, его органов.

Социоморфная метафора — 21 единица. К данному типу метафор относятся метеорологические лексемы и фразеологизмы, связанные с социальной сферой, с жизнью человека в социуме. Анализ позволил выявить три подгруппы сфер-источников, которые были условно названы военной метафора, метафора со сферой-источником «профессия», мифологическая и фольклорная метафоры.

Военная метафора охватывает всё, что связано с военными, насильственными действиями. Таких набралось всего пять. *Shooting star* — так образно называют метеор; *cloud regime* — режим облаков; *three o'clock wind* говорят военные о ветре, дующем справа под прямым углом к направлению стрельбы, а о таком же ветре, но дующем слева, говорят *nine-o'clock wind*. Здесь метафорический перенос основан на расположении цифр 3 и 9 на циферблате часов. А небо с перистыми изолированными облаками известно как *emissary sky* (эмиссарское небо); так его называют потому, что это образование часто является одним из первых признаков приближения тропического циклона, то есть осуществляет функцию, напоминающую в какой-то степени функцию эмиссара, выполняющего секретное поручение.

Кстати, в разделе «Морбиальная метафора» рассмотрены метафоры с компонентом *dead*, которые с тем же успехом можно отнести и сюда.

Метафора со сферой-источником «профессия» — пять единиц. Шквал с мокрым снегом американцы называют *barber*, а восходящее движение воздуха — *barber pole* («столбик парикмахера»), так как оно напоминает спиралевидный красно-белый рисунок на вывесках парикмахерских в США. *Cape doctor* — это местное название для сильного сухого юго-восточного ветра, который дует на южноафриканском побережье с весны до конца лета. Он известен как «мыс Доктор», поскольку местные жители убеждены в том, что этот ветер очищает Кейптаун от загрязнений и эпидемий.

Пыльный вихрь американцы называют *dancing dervish* («танцующий дервиш») — он на самом деле похож на танцующего человека в длинных развевающихся одеждах. Холодный северный ветер со шквалом и градом в Англии по невыясненной причине называют *northern nanny*.

Мифологическая и фольклорная метафора — 11 единиц. Названия некоторых метафорических единиц для обозначения метеорологических терминов берут начало в мифологических, фольклорных, религиозных произведениях. Морской смерч наводил ужас на моряков, и они называли его *dragon*. Известно, что мифологический дракон символизирует собой испытание, которое надо пройти.

Пыльные бури у англичан — это *dust-devil*. Само название «пылевой дьявол» предполагает ассоциацию с чем-то сверхъестественным, связанным с арабским

термином «джинн», который «создает себя из воздуха». А изменения электростатического поля атмосферы во время пыльной бури считали связанными с происками дьявола, отсюда и их название — *dust-devil effect*.

Самую северную широту, на которой Солнце в полдень может подняться в зенит, называют *Tropic of Cancer* (тропик Рака). Название тропика Рака произошло от созвездия Рака, в которое две тысячи лет назад «входило» Солнце в момент летнего солнцестояния. Южный эквивалент тропика Рака — *Tropic of Capricorn* (тропик Козерога).

Своеобразные образования на поверхности снеговых и фирновых полей в виде наклонных игл или пирамид высотой до шести метров в высокогорьях тропиков и субтропиков, издали производящие впечатление толпы коленопреклоненных монахов, называют *penitent snow* («кающийся» снег). Термин «кающийся снег» предложен немецким художником и альпинистом Рудольфом Решрейтером (*Rudolf Reschreiter*), впервые описавшим и изобразившим этот феномен. Наклонные зубцы напоминали ему кающихся с наклоненной головой и склоненной спиной. Название «кающиеся» («пенитентес») произошло от одноименного названия высоких головных уборов с заостренным верхом, которые носили братья религиозных орденов в процессиях покаяния во время испанской святой недели.

Дождевое облако имеет два названия: *rain cloud* (описательное) и *nimbus* (метафорическое). Происхождение последнего слова связывают с латинским «облако» (XVII век), первоначально означавшим «яркое облако, окружающее бога». Позднее оно приняло значение «ореол, нимб» (около 1730 г.) и только с 1803 г. (время появления первой классификации облаков) стало употребляться в метеорологии для обозначения дождевого облака.

Полярное сияние — изумительное по своей красоте природное явление — носит название *Aurora* в честь прекрасной богини утренней зари в древнеримской мифологии Авроры.

Сырой пронизывающий северо-восточный ветер, при котором температура понижается до точки замерзания, носит имя популярного героя средневековых английских народных баллад, благородного предводителя лесных разбойников — *Robin Hood wind*. Согласно легенде, Робин Гуд заявлял, что может вынести любой холод за исключением такого, какой приносит с собой пронизывающий сырой ветер [20].

Indian summer — так называют период теплой сухой погоды в Европе и Северной Америке в начале осени, «бабье лето». А в английском фольклоре это чудесное время носит и другие названия — *St. Luke's summer*, если оно приходится на октябрь, в честь святого Луки, который родился 18 октября, или *St. Martin's summer*, если оно приходится на ноябрь, так как 11 ноября во многих странах отмечается День святого Мартина. Во времена У. Шекспира эти теплые дни называли также и *All Saints' summer* («лето всех святых»)

Природоморфная метафора — 21 единица. Данный тип метафоры связан, как это видно из названия, с метафорическим переносом названий природных лексем на метеонимы. Традиционно различают живую природу (мир живых существ и растений) и природу неживую (ландшафт, стихии и др.). К этому типу

принадлежат зооморфная метафора, фитоморфная метафора и метафора со сферой-источником «неживая природа». В этом разделе рассмотрены только метафоры, связанные с живой природой.

Зооморфная метафора — 16 единиц, выделена на основании понятийной сферы «мир животных», включает фреймы «животные», «птицы», «рыбы», «низшие животные» и «части тела животных». В первую очередь это фразеологизмы с компонентом названия распространенного домашнего животного, а именно собака (*sundog* — паргелий), корова (*cow quaker, cow storm*), лошадь (*horse latitude anticyclone*), кошка (*cat's paw, cat's nose*).

Происхождение лексемы *sundog* остается неясным. Все остальные перечисленные термины — названия различных ветров. К примеру, *cow quaker* называют один из циклонов в Англии в связи с тем, что этот ветер начинает дуть в мае, то есть после того как погода позволяет выгонять коров на пастбище. В Канаде *cow storm* («коровья» буря) — это ветер, дующий с острова Эллесмер (Ellesmere) такой силы, что о нем говорят *to blow the horns off the cows* (сдувать у коров рога).

Антициклон на широте штилевого пояса называют *horse latitude anticyclone*. Согласно одному из объяснений, антициклон назван так потому, что он господствует в зоне так называемых «конских широт», где обычно наблюдается штиль. Парусным судам, перевозящим лошадей в Вест-Индию, часто приходилось выбрасывать лошадей за борт из-за нехватки воды, связанной с невозможностью плыть во время затишья [22]. К «лошадиной» метафоре можно добавить и *white horses* (белые гребни бурунов).

«Собачьими» американцы называют самые жаркие летние дни (*dog days*). А весенний возврат холодов ассоциируется с хладнокровной лягушкой (*frog storm*), небо в «барашках» — с макрелью (*mackerel-sky*), а флюгер — с петухом (*weathercock*). Небольшой снегопад весной в Англии — это *lambing storm / lamb storm* («барашковая буря»). Видимо, парящие в воздухе снежинки напоминали сельским жителям пушистую белую шерсть молодых барашков.

В ходе исследования были выявлены и метеофразеологизмы с компонентом «часть тела животного». Горизонтальное облако, напоминающее по форме хвост (*tail*), так и называют *tail cloud*. Слово *tail* обыгрывается в нескольких метафорах: *fishtail wind* (сильный ветер, дующий в разных направлениях), *beaver tail cloud* (облако в виде хвоста бобра), *inflow stinger* (облако, имеющее форму жала). Легкую рябь на воде называют *cat's paw*.

Фитоморфная метафора восходит к понятийной сфере «мир растений¹». Таких метафор отобрано совсем немного, всего пять: *wind rose* (роза ветров); *mushroom cloud* (грибовидное облако как антропогенного, так и природного происхождения); *cauliflower cloud* (пышное кучевое облако, напоминающее цветную капусту); *plum rains* («сливовые» дожди, берущие начало от японского сезона дождей ранним летом, когда поспевают сливы); *blackthorn winter* (зима «терновника» — в сельской Англии период холодной погоды в начале апреля, который часто

¹ В данном контексте к фитоморфным метафорам отнесена и метафора с компонентом «гриб» (*mushroom*).

совпадает с обильным цветением терновника в живых изгородях; его мелкие белые цветки распускаются до появления листьев и напоминают снег или иней, покрывающий окрестные поля).

Таким образом, изучение метеорологической лексики показало довольно широкое применение в этой области метафоризации, которая является одним из важных источников пополнения терминов в метеорологической отрасли.

Типы метафор и их количественное соотношение приведены в таблице.

Таблица

Типы и количественное соотношение метафор

Артефактные (91)			Антропоморфные (41)			Социоморфные (21)			Природоморфные (21)	
Дом	Одежда и аксессуары	Драгоценные камни и украшения	Физиологическая	Родство	Морбиальная	Милитарная	Профессия	Мифология и фольклор	Зооморфная	Фитоморфная
73	14	4	33	3	5	5	5	11	16	5

Из таблицы видно, что источники метафор разнообразны, но практически всегда связаны с человеком, его деятельностью, окружающими его предметами и природой. Наибольшую по числу и разнообразию метафор группу составляют артефактные метафоры. Большое разнообразие артефактных терминов-метафор вполне объяснимо: существование человека в мире окружающей его действительности сопряжено с активным взаимодействием с различными артефактами материальной культуры. Находя сходство в форме, цветовой окраске, размерах, местоположении между артефактами и различными природными явлениями и объектами, человек осуществлял метафорический перенос свойств этих артефактов на природные явления окружающей действительности.

Далее следует антропоморфная метафора. Анализ антропоморфной метафоры свидетельствует об отождествлении явлений природы с характеристиками человека, когда свойства человека переносятся на природные явления и объекты и последние «одушевляются». Социоморфные метафоры вместе с антропоморфными составляют 62 единицы. Это наглядно демонстрирует тот факт, что метафоры, образованные в результате метафорического переноса названий характеристик человека в физиологическом и социальном аспектах, относятся к наиболее востребованным в английской языковой картине мира, представленной семантической группой «метеорология».

Преобладание названий домашних животных в природоморфной метафорической лексике наглядно демонстрирует, какую большую роль играли эти животные в жизни человека. Перенос названий животных и растений на метеобъекты и явления свидетельствует о близости и взаимосвязанности человека и природы.

Метеорологическая лексика английского языка отражает практику освоения англичанами окружающего мира. Наблюдая за окружающей средой, активно участвуя в ее познании и преобразовании, человек дает названия и описывает наблюдаемые им природные явления и объекты через призму собственного повседневного опыта, обогащая тем самым метеорологическую лексику яркими и точными синонимами-метафорами. Интересно, что человеческое сознание способно находить образную ассоциацию даже между далекими друг от друга понятиями. На протяжении истории метафорическая картина мира меняется, появляются новые краски, ассоциации, сравнения для одного и того же явления, поэтому своевременные выявление и анализ этих изменений представляются важными и необходимыми.

Метафора помогает понять, как человек представляет себе понятийную сферу — источник метафорических названий метеоявлений и объектов, а также как он далее структурирует эту сферу, выделяя в ней самое важное и отбрасывая второстепенные, на его взгляд, детали, давая эмотивную оценку ее элементов.

Использование метафоры, метафорического эпитета при описании метеоров, гидрометеоров и метеоявлений представляет большой интерес, так как помогает понять, как люди воспринимали природные явления и объекты, с чем их ассоциировали, и в конце концов позволяет определить происхождение того или иного метеорологического термина, открывая в то же время пути для номинации новых метеообъектов или явлений. Изучение метафоры в метеолексике не только обогащает наши знания о метеорологической терминологии, но и выявляет особенности лингвистического и национального характера.

Следует подчеркнуть, что настоящее исследование не исчерпывает всего содержания рассматриваемой проблемы. Представляется, что результаты настоящей работы открывают перспективы для дальнейшего исследования метафоры в английской и русской метеорологической лексике.

Список литературы

1. Баранова Е.В. Лингвокультурологическая специфика фразеологических единиц лексико-семантических полей «космос» и «атмосфера Земли» в английском и русском языках / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Пятигорск, изд. Гос. лингв. ун-та, 2013. 29 с.
2. Богоявленская В.Б. Исследования семантического поля «погодные условия» за последние 20 лет // В сб.: Тест, контекст, интерконтекст. Материалы Межд. научной конф. «XIII Виноградские чтения». М., МГПУ, ВивидАрт, 2014. С. 75—80.
3. Гейбер И.П. Англо-русский метеорологический словарь. Л: Гидрометеиздат, 1969. 448 с.
4. Домбровская М.В. Концепт «дождь» как компонент национальной картины мира (на материале французского и русского языков) / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Барнаул, изд. Алт. гос. ун-та, 2006. 20 с.
5. Полякова Н.В. Метеорологическая лексика селькупского и русского языков в сопоставительном аспекте // Вестник ТГПУ (TSPU Bulletin), 2016. № 10 (175). С. 94—97.
6. Кондратьева О.Н. Метеорологическая метафора как способ концептуализации внутреннего мира человека / В сб.: Когнитивные исследования языка. Тамбов: Изд. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2012. Вып. 13. С. 252—263.
7. Кузнецова О.И. Семантическая относительность лексических единиц тематической группы «атмосферные осадки» в английском и русском языках (сопоставительный анализ) / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Краснодар, 2002.

8. *Лавренова О.А.* Параметры выявления национальной специфики одноименных лексико-семантических полей: на материале русского и английского лексико-семантических полей «Атмосферные осадки» / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Воронеж, изд. Воронеж. гос. ун-та, 2010.
9. *Лазарева М.А.* Сопоставительный анализ метеорологической лексики английского и русского языков / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. М., 2000.
10. *Лю Я.* Метеорологическая лексика и фразеология в русском и китайском языках: лингвокультурологический аспект / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Уфа, изд. Башкир. гос. ун-та, 2012.
11. *Манина А.Р.* Соматический аспект антропоморфной метафоризации (на материале английской нефтегазовой терминосистемы) / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Уфа, изд. Башкир. гос. ун-та, 2018. 23 с.
12. *Ныгметова Б.Д.* Метеорологическая метафора в русском и немецком языках (на материале метеопрогнозов) / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Павлодар, изд. Павлодар. гос. ун-та, 2010.
13. *Перфильева Н.Ю.* Специфика вербализации концепта «погода» средствами русского и английского языков / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Тверь, изд. Твер. гос. ун-та, 2008.
14. *Портнихина Н.А.* Национальная специфика семантического развития слова (на материале наименований природных явлений и небесных тел в русском и английском языках) / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Воронеж, 2011. 24 с.
15. *Сильченко А.И.* Сравнительный анализ готских и древнеанглийских существительных, обозначающих метеорологические явления / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Барнаул, изд. Алтайской гос. пед. академии. 2011. 21 с.
16. *Чан Тхи Т.Х.* Метеорологическая метафора в русской языковой картине мира / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Воронеж, изд. Воронеж. гос. ун-та, 2011.
17. *Чудакова Н.М.* Концептуальная область «Неживая природа» как источник метафорической экспансии в дискурсе российских средств массовой информации (2000—2004 гг.) / Автореф. дис. ... канд. филол. наук. Екатеринбург, изд. Уральского гос. пед. ун-та, 2005.
18. *Чудинов А.П.* Россия в метафорическом зеркале: когнитивное исследование политической метафоры (1991—2000) / Екатеринбург, 2001. 238 с.
19. *Ярмухамедова Ф.М.* Английская метеорологическая лексика: источники метафоризации / в сб.: Тезисы Всерос. науч.-практ. конф. «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». СПб: изд-во РГГМУ, 2019. С. 746—748.
20. *Brewer E.C.* Dictionary of Phrase and Fable. 1898. Режим доступа: <https://www.bartleby.com/81/14396.html>
21. *British Weather Terms.* Режим доступа: <https://www.weatheronline.co.uk/reports/wxfacts/British-Weather-Terms.htm>.
22. *Collins Free Online English Dictionary.* Режим доступа: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/horse-latitudes>
23. International Cloud Atlas [Электронный ресурс]: Международный атлас облаков /World meteorological organization, 2017. Режим доступа: <https://cloudatlas.wmo.int/glossary.html>.

**ВОЗМОЖНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИИ
В УПРАВЛЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ*****В.Н. Бокков***

Центр геофизических прогнозов «Градиент», viktor.bokov333@gmail.com

В последние годы проведены исследования метеорологических процессов, отражающих экзогенный вклад в сейсмичность Земли. Атмосферные процессы являются триггером возникновения землетрясений; подготовка последних обусловлена тектоническими и эндогенными процессами в земной коре. Выявленные связи позволяют успешно исследовать проблемы сейсмичности в межгодовом и сезонном диапазонах временной изменчивости на основе метеорологических данных. Для прогноза сейсмических событий было предложено использовать атмосферно-циркуляционный предвестник землетрясений.

Ключевые слова: атмосферные процессы, триггер, связи атмосферы и сейсмичности.

**METEOROLOGY CAPABILITIES
IN SEISMIC RISKS MANAGEMENT*****V.N. Bokov***

Center for Geophysical Forecasts "Gradient"

In recent years studies have been conducted on meteorological processes reflecting an exogenous contribution to the Earth seismicity. Atmospheric processes are the trigger of earthquakes; preparation of the latter is due to tectonic and endogenous processes in the earth's crust. The identification of the relationship allows us to successfully investigate the problem of seismicity in the inter-annual and seasonal temporal variability ranges on the basis of meteorological data. For the forecast of seismic events was proposed to use the atmospheric-circulation precursor of earthquakes.

Keywords: atmospheric processes, trigger, atmospheric and seismic relations.

Введение

Научные направления метеорология и сейсмология, на первый взгляд, имеют мало общего — пожалуй, лишь то, что оба направления входят в глобальную геофизику. Сейсмология — наука о распространении сейсмических волн в недрах Земли, землетрясениях и связанных с ними явлениях. Она находится на стыке многих наук — геологии, геофизики, физики, химии, биологии, истории и др. Однако, проводя исследования совместно с метеорологическими процессами, сейсмологи в основном ограничиваются использованием данных синхронных метеорологических наблюдений на одной — трех метеостанциях. Как правило, сейсмологи относят метеорологические процессы к помехам, которые искажают результаты их исследований. Поэтому в развитии модельных представлений о физике и механике разрушения земной коры, которое началось в XX веке, идеям

воздействия атмосферных процессов на сейсмичность места не нашлось. Справедливости ради следует подчеркнуть, что основатели сейсмологии [9, 13] признавали воздействие атмосферы на сейсмичность, но эти идеи не были подхвачены их последователями.

Перечислим ряд проблем сейсмологии, которые до сих пор не решены. Сейсмология «начинается» тогда, когда происходит значительное сейсмическое событие и с помощью возникающих сейсмических волн изучается внутреннее строение Земли. Процесс подготовки сейсмических событий для сейсмологов пока не понятен, как не определены и механизмы их подготовки. В основе практически всех моделей лежали идеи локализованного процесса подготовки каждого мощного землетрясения (ЗТ) и затухающего с расстоянием характера проявления предвестников этого ЗТ. При разработке моделей превалировали идеи физики и механики разрушения монолитных образцов. В моделях не конкретизировались движущие силы, рассматривались только силы тектонической природы без анализа природы режима слабой сейсмичности и повторяемости ЗТ в одних и тех же разрушенных местах разломов.

Дальнейшее развитие представлений о природе возникновения ЗТ до конца прошлого века шло по пути анализа, детализации и переноса данных лабораторных моделей разрушения на геологическую среду [14]. В данных моделях представления подготовки разрушения монолитных образцов переносили на условия земной коры, подготовку ЗТ связывали с долговременной эволюцией процессов трещинообразования от микроскопического до крупного масштаба (более километра). В некоторых моделях учитывалось наличие подземных вод, формирующих поровое давление и оказывающих влияние на объемное напряженное состояние подземной среды. Подобные модели различались детализацией процесса подготовки ЗТ, не внося дополнительного понимания в происходящие процессы и природу действующих сил [14].

Исследования по выявлению механизма очага ЗТ ведутся уже не один десяток лет. В основном эти исследования основываются на теории сплошных сред и механики разрушений, что в общем позволяет оценить механизм разрушения пород в очаге ЗТ [26]. Однако в качестве физических явлений, инициирующих определенный тип механизма очага подготовки ЗТ, рассматривают только тектонические и эндогенные процессы [28]. Роль экзогенных процессов исследована очень слабо. Изучая сейсмологический режим, временные и пространственные закономерности в сейсмоактивных районах Земли, сейсмологи часто не могут найти причины, обуславливающие временную изменчивость сильных сейсмических событий. Например, сезонная изменчивость мощных ЗТ до сих пор слабо изучена сейсмологами. Связано это с отсутствием в тектонике, эндогенных процессах, вращении Земли и других природных процессах [11, 12, 15, 22] физических причин, «ответственных» за внутригодовую изменчивость сейсмичности. Анализ межгодовой изменчивости сейсмических процессов основывается на исследовании временных рядов землетрясений различной магнитуды [27, 29, 35], а в качестве одной из основных причин межгодовой изменчивости рассматривают солнечную активность [35]. Тем не менее долгосрочные прогнозы сейсмологов

часто не позволяют точно оценить временной интервал, в котором произойдет сильное ЗТ.

Не все сейсмологи проводили исследования в традиционном для сейсмологии русле. Так, например, известный сейсмолог А.Д. Сытинский посвятил много лет исследованиям связей солнечной активности и атмосферы с сейсмичностью Земли [32—34]. Его революционные исследования в то время почти не воспринимались сейсмологами, поскольку им было не до атмосферы — с процессами внутри земной коры до сих пор сложно разобраться. Однако практические результаты А.Д. Сытинского, который составлял среднесрочные прогнозы (на два-три месяца) сейсмических событий на определенной территории, подтвердили влияние атмосферных процессов на сейсмичность Земли [34]. Существенно продвинувшись в понимании подготовки сейсмических событий позволяет учет атмосферных процессов [2—8, 32—34].

Кратко перечисленные проблемы сейсмологии в исследованиях сейсмичности Земли, сейсмические риски могут быть решены с помощью подходов, отражённых в настоящей статье. Цель данной работы состоит в освещении роли метеорологии при решении части задач сейсмологии. В частности, краткосрочный прогноз землетрясений невозможно составить без участия метеорологов.

Роль атмосферных процессов в подготовке сейсмических событий

Анализ многочисленных случаев изменения атмосферной циркуляции, предшествующего сильным землетрясениям, позволил установить триггерные эффекты, способствующие возникновению сейсмических событий [4]. Смещения сопряженных циклона и антициклона приводят к колебаниям земной коры и возникновению волн Лява [30]. Атмосферные триггерные эффекты обусловлены быстрой сменой атмосферных вихрей противоположного знака в районе активных разломов, что приводит к резкому увеличению тангенциальных напряжений на разломе и возникновению землетрясений [4]. Для прогноза сейсмических событий в работах [4—7] было предложено использовать атмосферно-циркуляционный предвестник землетрясений. Под атмосферно-циркуляционным предвестником (АЦП) для фиксированного эпицентра землетрясения понимается такое изменение атмосферной циркуляции, при котором в данном эпицентре периодически инициируются новые землетрясения. Периодичность возникновения ЗТ зависит от степени «готовности» горных пород к разрушению [16, 28].

В многочисленных исследованиях геофизики постоянно выявляют влияние атмосферных процессов на поверхность земной коры. Однако, поскольку они не проводят пространственный анализ атмосферных процессов и их внимание сосредоточено на процессах, происходящих в земной коре, они и не воспринимают связи атмосферы с наблюдаемыми процессами. При этом сейсмологическая интерпретация наблюдаемых процессов часто носит предположительный характер. Так, при исследовании аварий трубопроводов на территории РФ показано, что аномалии региональных современных движений земной коры наблюдаются в относительно узких переходных зонах на границах блоковых структур [19].

В пределах таких зон выявлены аномальные смещения земной поверхности, амплитуда которых превышает на один-два порядка движения в смежных объемах среды. Кроме тектонических движений, наблюдаются и короткопериодные движения с более высокой скоростью смещения и периодом, равным месяцам, а иногда даже часам [19]. Эти относительные подвижки имеют периодический характер, который, по нашему мнению, связан с синоптической изменчивостью атмосферных процессов. При этом поверхность испытывает знакопеременные деформации, т.е. пучения до 215 мм сменяются оседаниями до 400 мм [19], которые, по мнению автора, определяются циклонами и антициклонами соответственно [4]. Указанные сведения лишь подчеркивают роль атмосферных процессов в увеличении интенсивности вертикальных движений на границах геоблоков. Практически все подобные геофизические исследования не сопоставляются с сопутствующими атмосферными процессами, и поэтому, как правило, сейсмологическая интерпретация подобных резких движений затруднена.

Процесс подготовки сейсмических событий и механизмы их подготовки логично рассмотреть с позиций влияния атмосферных нагрузок, волн и наклонов на геоблоки в зонах разломов. Самым распространенным механизмом подготовки землетрясений является механизм, названный автором механизмом «раскачки». Назван он так в связи с тем, что сопряженные циклоны и антициклоны, которые находятся по разные стороны разлома и последовательно сменяют друг друга, обеспечивают опускание или поднятие, колебания и наклоны геоблоков с разных сторон разлома, т.е. «раскачивают» геоблоки.

Можно предположить, что процесс подготовки землетрясения происходит следующим образом. Предположим, что произошло мощное землетрясение с магнитудой $M = 7$. После землетрясения в зоне разлома зацепы (выступы) между геоблоками сохраняются и укрепляются в горных породах последующими временными сериями афтершоков. Прекращение афтершоков свидетельствует о том, что зацепы (выступы) между геоблоками заняли устойчивое положение. При таком положении между геоблоками нет трещин, способных спровоцировать соскальзывание зацепов или выступов. Поэтому в течение нескольких месяцев, лет и даже десятилетий сильного землетрясения в данном месте не происходит. Однако за этот период времени геоблоки постоянно подвергаются ряду воздействий. На поверхность геоблоков в районе расположения разлома постоянно действуют переменные барические нагрузки. В результате наклонов и вертикальных движений геоблоков в разломе образуются микротрещины, которые моментально заполняются газовыми и водными флюидами. За этот период времени происходят медленные тектонические движения и «работают» эндогенные процессы, создавая напряжения на геоблоках. Одновременно на нижней границе геоблоков в зоне разлома под влиянием ее прогибов также образуются мелкие трещины.

Под влиянием давления магмы и высокой температуры мелкие трещины заполняются газовыми флюидами и со временем расширяются и растут в направлении к поверхности коры. Подтверждением этого процесса являются серии землетрясений, возникающих перед активизацией вулканов. Под влиянием перечисленных факторов мелкие трещины в верхней части коры постепенно расширяются

и с течением некоторого времени обеспечивают газовую и водную «смазку» для соскальзывания выступа. В конце концов наступает время, когда флюиды подготавливают трещины необходимой ширины, и зацеп оказывается в состоянии неустойчивости. Это состояние может сопровождаться форшоками, различными геофизическими предвестниками (выделение литосферных газов, появление геосейсмических шумов и т.п.) и продолжается до тех пор, пока в атмосфере не образуется типичный для данного района АЦП. Этот АЦП и инициирует подготовленное землетрясение. Предложенный процесс подготовки сейсмических событий относится к коровым землетрясениям.

Иницирование механизма очага землетрясения

Сейсмологи считают, что для прогнозирования ЗТ необходимо знать механизм возникновения очага ЗТ. Механизм очага описывает неупругие деформации, возникающие в области очага ЗТ (подвижку) и генерирующие упругие сейсмические волны. Механизм очага определяет ориентацию разрыва и направление подвижки, а также ориентацию главных осей напряжения сжатия и растяжения в пространстве. Исследования по выявлению механизма возникновения ЗТ ведутся уже не один десяток лет. В основном эти исследования основываются на теории сплошных сред и механики разрушений, что в общем позволяет оценить механизм разрушения пород в момент возникновения землетрясений. Однако в качестве физических явлений, обуславливающих подготовку того или иного типа очага ЗТ, рассматривают только тектонические и эндогенные процессы. Поэтому сейсмологи по-прежнему не могут разобраться в механизме образования первичной дизъюнкции, обуславливающей различные типы движения: сдвиги, взбросы и сбросы.

Традиционно считается, что механизм очага коровых ЗТ формируется в глубинах земной коры, и поэтому ответственными за тип механизма очага ЗТ «назначены» тектоника и эндогенные процессы [16, 28, 29, 31]. Имеющиеся данные повторных геодезических измерений в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений убедительно показывают, что процесс подготовки очага корового землетрясения затрагивает и земную поверхность [25]. Исследования последних трех лет показали, что атмосферные процессы являются не только триггерами землетрясений, но и, возможно, инициируют механизм возникновения очага землетрясений [8].

Использование стереограмм (рис. 1) при картировании сейсмических событий позволяет наглядно оценить тип фокальных механизмов землетрясений, произошедших на данной территории за определенный период времени. В качестве примера на рис. 2 приведена карта очагов землетрясений со стереограммами, характеризующими тип подвижек. Анализ стереограмм показывает, что практически в одной точке разлома могут образовываться различные типы подвижек — это видно из рис. 2.

В качестве одной из основных причин, по которой сейсмологи приняли парадигму о непрогнозируемости ЗТ, является хаотичность возникновения ЗТ [17].



Рис. 1. Стереогаммы, соответствующие очагам сейсмического явления.

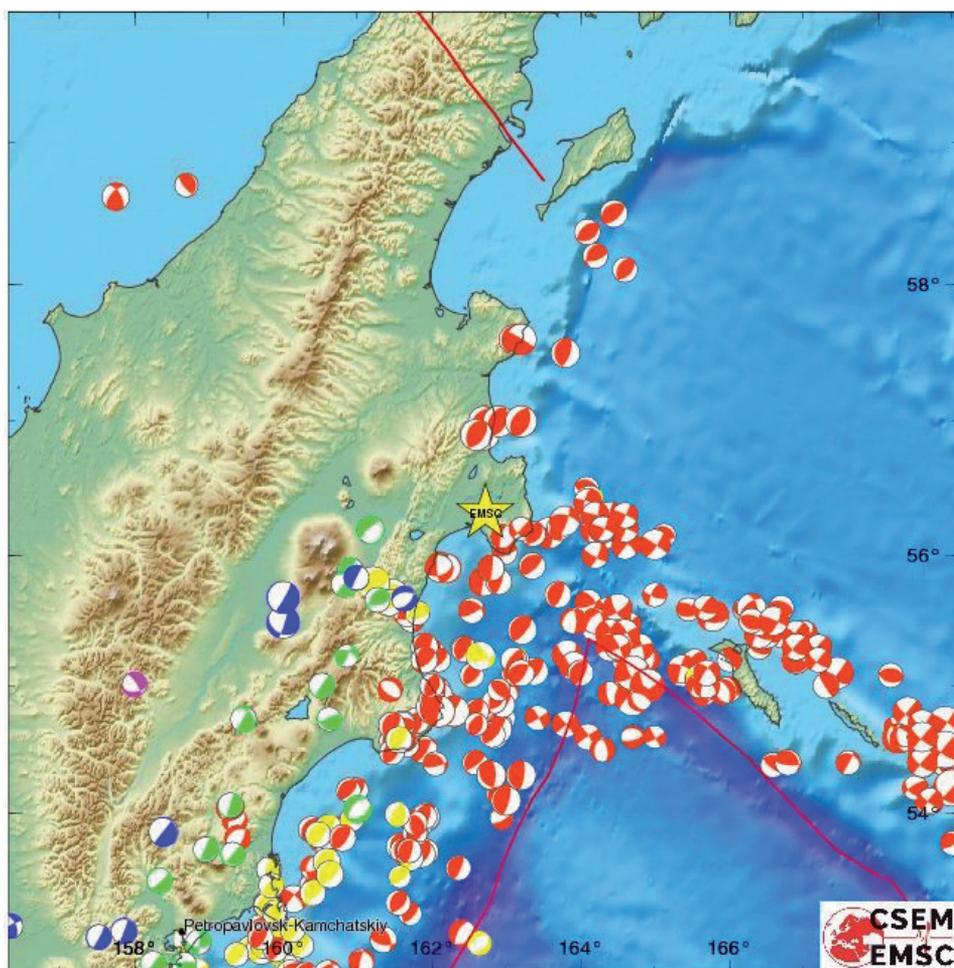


Рис. 2. Эпицентры землетрясений в районе Камчатки и стереогаммы фокальных механизмов очагов землетрясений.

Атмосфере свойствен динамический хаос, и возникновение различных атмосферных объектов (циклонов, антициклонов, ложбин, перемычек и т.п.) можно отнести к странным аттракторам [23].

Формирование АЦП происходит на основе пространственно-временной изменчивости странных аттракторов. В зависимости от пространственно-временных изменений странных аттракторов возможно определить возникновение в точке бифуркации того или иного типа механизма очага землетрясений. Так, на рис. 3 приведена типичная схема инициирования механизма очага по типу подвижки — взброс. Применение подобных схем позволяют наглядно пояснить сейсмологам причины инициирования первичной дизъюнкции в очаге ЗТ.

Из рис. 3 *а* видно, что над очагом ЗТ (в точке бифуркации) наблюдается область пониженного атмосферного давления. В этой области земная поверхность приподнимается, что приводит к растяжению земных пород, расширению трещин, увеличению водных флюидов и эманации литосферных газов. В смежных районах наблюдаются два вихря с повышенным атмосферным давлением. Через сутки (см. рис. 3 *б*), т. е. очень быстро, территорию над очагом ЗТ заняла область повышенного атмосферного давления, что привело к резкому сжатию пород, к соскальзыванию зацепа в теле разлома и, соответственно, к ЗТ.

Типичная схема формирования странных аттракторов, иницирующих первичную дизъюнцию в очаге по типу подвижки — сброс, является противоположно зеркальной схемам, представленных на рис. 3. Несколько более сложными являются схемы для типов с правосторонним и левосторонними подвижками, но и они обусловлены типичными формированием пространственно-временного изменения странных аттракторов в атмосфере. Анализ изменения атмосферной циркуляции, который выявляет формирование АЦП, позволяет определить и возникновение того или иного типа механизма очага землетрясений.

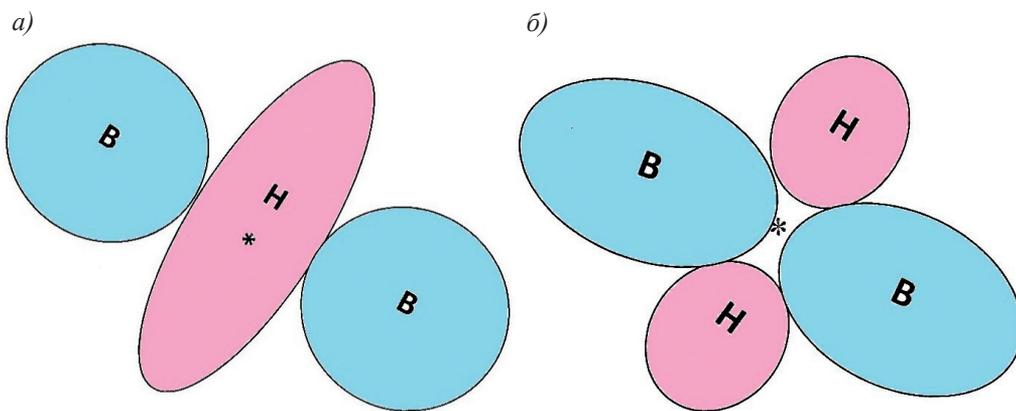


Рис. 3. Пространственное расположение странных аттракторов: начальный (*а*) и заключительный (*б*) этапы формирования очага по типу подвижки — взброс.

Звездочкой отмечен очаг ЗТ.

Роль метеорологических процессов в оценке сейсмических рисков

Нашу теорию, которую мы используем при прогнозе ЗТ [2—8, 32—34], подтверждают результаты недавних исследований геологов и сейсмологов под руководством академика С.В. Гольдина [10, 20, 21]. Группой ученых рассматривался вопрос о местах сосредоточения землетрясений в изменяющейся напряженно-деформированной среде. В работах О.А. Кучай [20, 21] привлекались данные о механизмах очагов землетрясений с $M > 4,6$, произошедших в сейсмоактивных регионах Земли с 1976 г. по март 2010 г. Исследовались разрывы в очагах ряда сильных землетрясений в пределах условной границы, разделяющей положительные и отрицательные значения деформаций в поле широтной, меридиональной и вертикальной компонент сейсмических деформаций. Исследования показали, что вспарывание разрывов при ряде сильнейших землетрясений инициируется на границе изолинии нулевой деформации, полученной при расчете сейсмической деформации по данным механизмов очагов предшествующих землетрясений. Подобные выводы получены и по данным GPS. Результаты представительных исследований различных научных направлений привели к одинаковому результату, что указывает на достоверность используемой нами теории. Однако указанные исследования геологов и сейсмологов не решают проблему прогноза ЗТ, особенно краткосрочного.

В настоящее время преобладающее большинство сейсмологов не считают возможным краткосрочный прогноз землетрясений. Так, в сентябре 2012 г. в ходе 33-й Генеральной ассамблеи Европейской сейсмологической комиссии (Москва) генеральный секретарь Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли П. Сухадолк признал, что в ближайшее время прорывных решений в сейсмологии не ожидается. Отмечалось, что ни один из более чем 600 известных предвестников и никакой их набор не гарантируют предсказания землетрясений, которые случаются и без предвестников. Уверенно указать место, время и мощность катаклизма не удастся. Надежды на предсказания возлагаются лишь там, где сильные землетрясения происходят с некоторой периодичностью [17].

В ряде исследований, посвященных прогностическим разработкам, сейсмологи подтверждают влияние внешних сил (экзогенных процессов) на сейсмические события. Например, многолетние исследования и прогностические разработки на основе гидрогеодинамического предвестника, выполненные на Дальнем Востоке, на Сахалине, показали, что «...краткосрочные предвестники проявляются однотипно, и их возникновение не зависит ни от места землетрясения, ни от глубины очага, ни от силы удара. Следовательно, они вызваны не геологическими причинами, а изменением физических условий в приповерхностном слое накануне сейсмического события...» [30]. Проведенные в РГГМУ исследования [4—8], основанные на изучении связей между атмосферными процессами и сейсмичностью, убедительно показали соответствие приведенным выше наблюдениям.

Многолетние исследования позволили предположить, что изменения физических условий в приповерхностном слое земной коры происходят под влиянием изменений атмосферного давления и изменений уровня водной поверхности [2, 6]. В

свою очередь, неприливные изменения уровня водной поверхности определяются в основном атмосферной циркуляцией. В обзоре [14] был поставлен вопрос о том, «... что не позволяет решить проблему прогноза, хотя во многих регионах созданы долговременно и непрерывно работающие системы мониторинга. Иллюстрацией действующей ситуации является пропуск Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г., хотя условия для мониторинга были уникальны. Фокальная зона находится от сети мониторинга на расстоянии 100—200 км. Это зона постоянной сейсмической опасности, и ее мониторинг осуществлялся непрерывно и долговременно...». Этот очередной случай внезапного для сейсмологов сильнейшего землетрясения при непрерывном мониторинге геофизических процессов снова указывает на отсутствие учета факторов не только в сейсмологических процессах, но и других — внешних. Однако это землетрясение, как и множество других, было предсказано на основе мониторинга изменений атмосферной циркуляции [5]. Именно быстрые смещения атмосферных вихрей, распределяющие воздушные массы на пространстве земной поверхности, приводят к росту напряжений и деформаций в земной коре.

Деформации, возникающие под влиянием атмосферной циркуляции, могут обуславливать появление различного рода геофизических предвестников. В работах [6—7] исследованы синхронные изменения атмосферной циркуляции и данные измерений геофизических предвестников, которые широко используются для прогноза ЗТ. К таким предвестникам относят геоакустические шумы, эмиссию радона, изменение уровня подземных вод, деформацию и наклоны земной коры. Больше всего сейсмологов беспокоит тот факт, что в некоторых случаях при появлении апробированных предвестников землетрясения не происходят, а при их отсутствии — возникают. При этом ведется мониторинг как первичных, так и вторичных предвестников. Однако без учета экзогенных процессов разобраться в причинах этого феномена еще долго не удастся. Связано это с тем, что деформации,

возникающие под влиянием атмосферной циркуляции, обуславливают усиление различного рода геофизических предвестников, которые часто считают проявлением интенсивности тектонических или эндогенных процессов.

В качестве примера, показывающего состоятельность геофизических предвестников в прогностических целях при условии анализа изменчивости атмосферных процессов, рассмотрим результаты мониторинга содержания почвенного радона (^{222}Rn). Используемые геофизические данные приведены в работе [18], посвященной исследованию динамики концентрации почвенного радона (^{222}Rn) на территории Прикаспийского сейсмоактивного региона Туркменистана.



Рис. 4. Географическое расположение пунктов измерений Хазар и Кум-Даг.

Регион характеризуется сложным геолого-тектоническим строением, отличается высоким уровнем тектонической и сейсмической активности недр, грязевулканической деятельностью и другими явлениями, природа которых обусловлена деформационными процессами [18]. Географическое расположение двух пунктов измерений радона — Хазар и Кум-Даг — представлено на рис. 4. Аномальные изменения наблюдаемых параметров отмечались, когда в районе исследования произошло землетрясение энергетического класса $K = 10 \dots 11$.

На рис. 5 *a* представлены изменения концентрации подпочвенного радона в пункте Кум-Даг с 20 по 31 августа 2010 г. В регионе наблюдения 27 августа ($K = 11,2$) и 28 августа ($K = 10,9$) произошли сейсмические события. Из рисунка видно, что за несколько дней до сейсмического события наблюдалось повышение

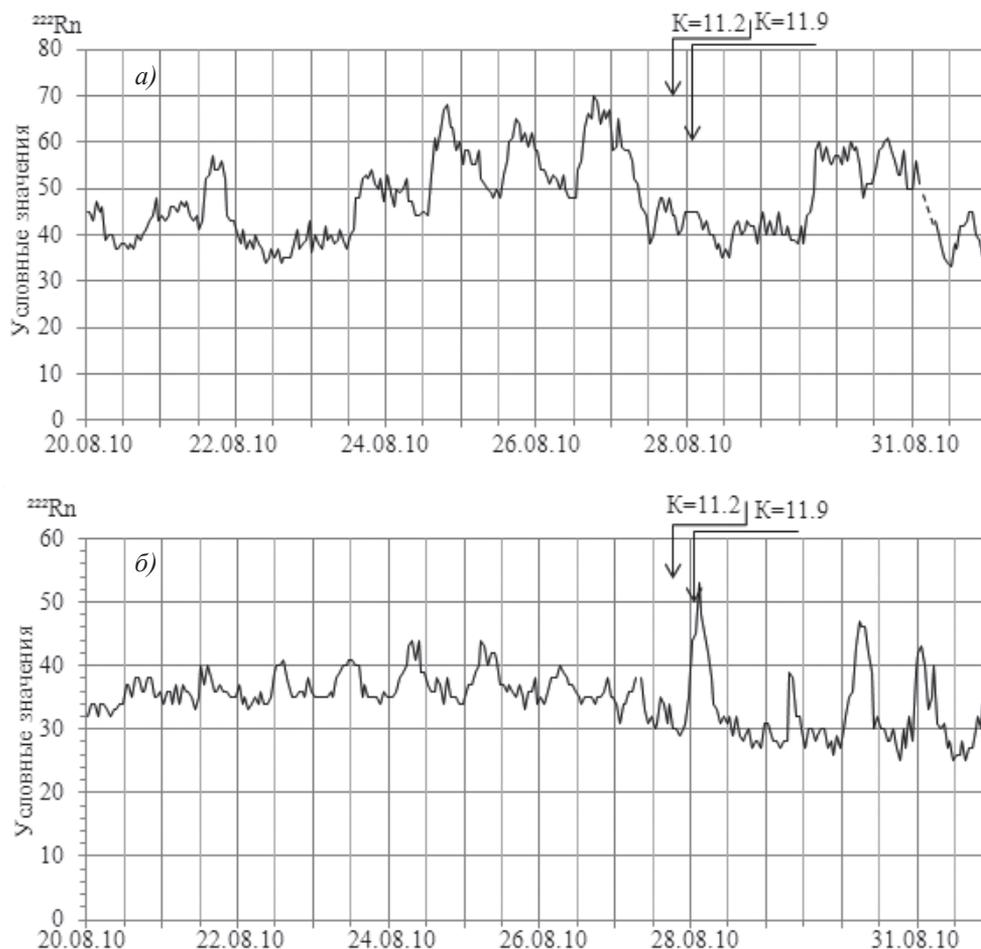


Рис. 5. Изменения концентрации (условные значения) подпочвенного радона в пунктах Кум-Даг (*a*) и Хазар (*б*) с 20 по 31 августа 2010 г.

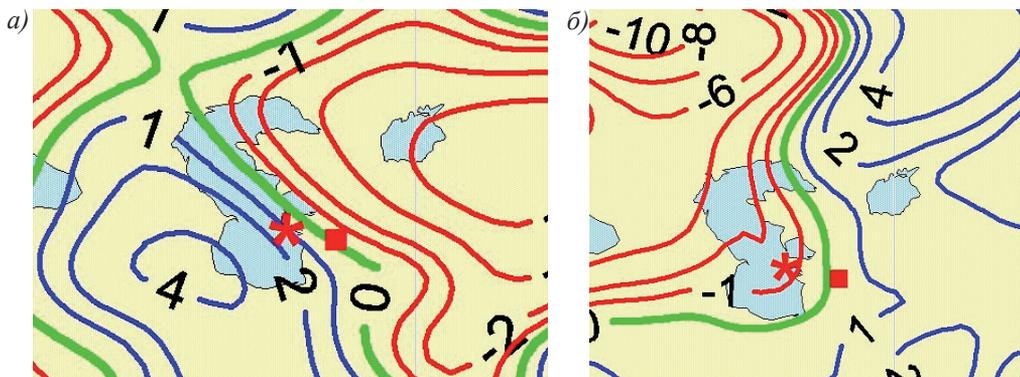


Рис. 6. Поле барических нагрузок 25 августа 2010 г. (а) и 28 августа 2010 г. (б).

содержания газа, а его амплитуда испытывала значительные колебания, что было связано с уменьшением барических нагрузок (рис. 6 а) в восточной части региона. Непосредственно перед землетрясениями концентрация радона понизилась до прежних значений и амплитуда колебаний также уменьшилась, что было обусловлено ростом барических нагрузок в восточной части региона (см. рис. 6 б).

На рис. 5 б представлены изменения концентрации почвенного радона в пункте Хазар с 20 по 31 августа 2010 г. Из рисунка отчетливо видно, что перед сейсмическими событиями, 27 и 28 августа 2010 г., временной ход концентрации радона относительно стабилен. Не наблюдается резкого увеличения интенсивности эманацій радона, что связано с уменьшением барических нагрузок (см. рис. 6 а) в западной части региона. Нарушение регулярности хода концентрации радона в почвенном воздухе отмечались непосредственно после сейсмических событий, т.е. после смещения линии нулевой деформации к востоку. Резкое изменение амплитуды колебаний после сейсмических событий связано с увеличением барических нагрузок в западной части региона (см. рис. 6 б).

Приведенный пример совместного анализа косвенных предвестников и изменения атмосферной циркуляции в очередной раз показал, что интенсивность и возникновение рассмотренных предвестников тесно связаны с барическими изменениями. Под воздействием барических нагрузок интенсивность предвестников увеличивается, и это указывает на вероятность возникновения землетрясения. Случаи, когда усиливаются предвестники, а землетрясения не происходит, вероятно, связаны с отсутствием в это время триггера — АЦП, характерного для данного сейсмического района. Этого и не понимают сейсмологи, поскольку не учитывают роль экзогенных процессов. Также сейсмологам не ясно, почему при отсутствии апробированных предвестников возникают землетрясения. Исследований на эту тему у сейсмологов практически нет.

В последние десять лет интерес к прогнозу землетрясений снова возрос. После мощного землетрясения в китайской провинции Сычуань в 2013 г. правительством КНР было решено вложить в прогноз сейсмических явлений более 300 млн долларов [37]. Для наиболее опасных районов страны будет создана сеть

из 5000 станций наблюдений, цель которых — раннее предупреждение о сильном землетрясении. Однако события в Японии показывают, что многочисленные пункты сейсмологических и геофизических измерений не помогли предсказать событие 2011 г., как и ряд других.

Сейчас благодаря интерферометрическим радиолокационным станциям с синтезированной аппаратурой InSAR ученые-геофизики могут получать глобальную картину. Новый подход предусматривает развертывание радиолокационных устройств на спутниках и использование сравнительных изображений, полученных через определенный интервал времени, для визуализации общего движения поверхности Земли. Данные таких измерений характеризуются чрезвычайно высокой точностью, вплоть до нескольких миллиметров [36].

Даже имея в арсенале мониторинга такую точную систему наблюдений, сейсмологи не смогут составлять краткосрочные прогнозы ЗТ. Любые наблюдения за изменением процессов на поверхности земной коры очень полезны, но они не содержат прогностической составляющей, что сводит на нет возможность эффективного прогноза. Особенно сложно сейсмологам предсказать дату и мощность ЗТ. Только метеорологическая информация содержит прогностическую составляющую, и только по ней можно за двое-трое суток (с достоверность прогноза не менее 75 %) определить формирование триггера, инициирующего ЗТ.

Связь внутригодовой изменчивости атмосферных процессов и сейсмичности

Исследование сезонной изменчивости сейсмичности еще не получило признания у сейсмологов, поскольку причины внутригодовой изменчивости было неясны. Единого мнения о внутригодовом распределении сильных ЗТ с магнитудой $M \geq 5,5$ среди сейсмологов нет. В ряде работ сезонный ход сильных ЗТ даже отрицается [15]. Это связано с тем, что сейсмологи не видят других физических причин, обуславливающих сезонную изменчивость ЗТ, кроме изменчивости сезонного хода скорости вращения Земли [1, 11, 12] и приливных воздействий с периодичностью движения Земли по орбите [22]. Сейсмическая активность показала наличие связи сезонной изменчивости с приливным воздействием только для слабых и умеренных сейсмических явлений. Сезонная изменчивость сильных ЗТ до сих пор достоверно не определена.

Исследования влияния атмосферной циркуляции в синоптическом диапазоне изменчивости показали, что ЗТ инициируются быстрыми процессами смещений сопряженных циклонов и антициклонов. Подобные процессы имеют хорошо выраженную внутригодовую изменчивость. Следовательно, сезонная изменчивость атмосферной циркуляции должна коррелировать с сезонной изменчивостью сильных ЗТ. Результаты подобных исследований представлены в работе [3]. Исследования подтвердили наличие тесной связи сезонной изменчивости атмосферной циркуляции с сезонной изменчивостью сильных ЗТ для различных сейсмоактивных регионов Земли. Исследование связей сезонной изменчивости сильных ЗТ очень важно и в связи с выбором АЦП.

Связь межгодовой изменчивости атмосферных процессов и сейсмичности

В большинстве публикаций межгодовую изменчивость сейсмичности связывают с изменчивостью солнечной активности [35]. Дальнейшие исследования [32, 34] показали, что солнечная активность воздействует и на атмосферу, а циркуляция атмосферы влияет на сейсмичность. Действительно, совместный анализ синхронных временных рядов форм циркуляции атмосферы Вангенгейма — Гирса и сильных ЗТ в диапазоне межгодовой изменчивости показал их согласованность. Типизация атмосферных процессов Вангенгейма — Гирса содержит «гомологи», в которых присутствуют траектории циклонов и антициклонов, что отражает их подвижность и характеризует триггерные эффекты атмосферных вихрей. Совместный анализ временной изменчивости меридиональных форм циркуляции атмосферы с числом ЗТ с $M \geq 7$, а также с числом ЗТ с $M > 8$ показал хорошо выраженную согласованность временного хода и статистически значимую корреляцию [2].

Методы долгосрочных прогнозов сильных ЗТ основываются на их временной зависимости и вероятности проявления во времени. Климатические прогнозы циркуляции атмосферы, основанные на типизации Вангенгейма — Гирса позволяют определить периоды преобладания меридиональных форм циркуляции, и, следовательно, уточнить интервал времени прогноза с вероятностью разрушительных ЗТ. Поэтому для повышения точности среднесрочных и долгосрочных прогнозов землетрясений сейсмологам можно рекомендовать учитывать межгодовую изменчивость циркуляции атмосферы.

Заключение

Современная сейсмология до сих пор не может составлять краткосрочные прогнозы с указанием точного места, даты и силы ЗТ. По мнению сейсмологов, причины возникновения ЗТ изучены недостаточно, поскольку процессы, происходящие внутри земной коры, не доступны для визуального исследования и процесс возникновения ЗТ еще долго будет оставаться теоретическим природным явлением. Однако даже длительные и успешные исследования процессов, происходящих в земных недрах, не позволят решить проблему краткосрочных прогнозов ЗТ, и связано это с тем, что триггером ЗТ являются атмосферные процессы. Поэтому без совместного использования атмосферно-циркуляционных и геофизических предвестников получить более точные краткосрочные прогнозы ЗТ не удастся, о чем свидетельствуют многолетние сейсмологические разработки и метеорологические исследования [2—8]. Чтобы решить задачу краткосрочного прогноза ЗТ, необходимы дальнейшие совместные исследования метеорологов, геофизиков и сейсмологов.

Более того, причина возникновения механизма очага ЗТ различного типа подвижек традиционными методами не решается десятилетиями. Применение технологий, основанных на данных о полях атмосферного давления, приблизило решение этой проблемы. Пространственно-временной анализ атмосферной циркуляции в синоптическом диапазоне позволил установить, что инициирование

типа механизма очага ЗТ происходит в зависимости от смены пространственного расположения атмосферных вихрей разного знака [4]. Взаимное пространственное расположение циклонов и антициклонов и его резкое изменение в течение одних-двух суток позволяет уверенно выявить и спрогнозировать механизм очага — сброс или взброс, левосторонние или правосторонние сдвиги [8].

Интенсивность геофизических предвестников ЗТ увеличивается под воздействием барических нагрузок, и это указывает на вероятность возникновения землетрясения. Случаи, когда усиливаются предвестники, а ЗТ не происходят, связаны с отсутствием в это время триггера — АЦП, характерного для данного сейсмического района. Это сложно понять сейсмологам, поскольку они не учитывают роль экзогенных процессов. Также сейсмологам не ясно, почему при отсутствии апробированных предвестников возникают землетрясения. Исследований на эту тему у сейсмологов практически нет.

Метеорология может решить часть задач сейсмологии в межгодовом диапазоне изменчивости и, особенно, в сезонном ходе сильных ЗТ. Так, в результате выявления физических причин, инициирующих сильные ЗТ, в частности внутригодовой изменчивости подвижных циклонов и антициклонов, удалось установить существование сезонной изменчивости мощных ЗТ.

Список литературы

1. Барсуков О.М., Шаманин С.В. Сезонные изменения сейсмичности и скорости вращения Земли // Доклады РАН. 2001. Т. 379, № 1. С. 99—100.
2. Боков В.Н. Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции // Ученые записки РГГМУ. 2008. № 6. С. 139—147.
3. Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 89—100.
4. Боков В.Н., Гутшабаиш Е.Ш., Потиха Л.З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 173—184.
5. Боков В.Н. Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и Жизнь. № 9. 2011. С. 49—59.
6. Боков В.Н. О связи геофизических предвестников с краткосрочным прогнозом землетрясений / В сб.: Актуальные проблемы современной сейсмологии. Труды Междунар. конф., посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г. А. Мавлянова АНРУз, 12—14 октября 2016 г. С. 214—220.
7. Боков В.Н. Влияние экзогенных процессов на аномалии поверхностной температуры земной коры — предвестников землетрясений / В сб.: Актуальные проблемы современной сейсмологии. Труды Междунар. конф., посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г. А. Мавлянова АНРУз, 12—14 октября 2016 г. С. 208—214.
8. Боков В.Н., Лебедев С.В. Экзогенные процессы и сейсмичность / В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы IV Всерос. конф. с международным участием. Москва, 6—9 июня 2017 г. / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2017. С. 379—386.
9. Голицын Б.Б. Лекции по сейсмометрии // СПб: Типогр. императорской АН, 1912. 486 с.
10. Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика. 2008. № 11. С. 5—13.
11. Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О корреляции графиков угловой скорости вращения Земли и модуля ее временной производной с частотой землетрясений в зависимости от их магнитуды // Физика Земли. 1994. № 10. С. 33—38.
12. Гохберг М.Б. и др. О механизме модуляции количества сильных землетрясений и частоты вращения Земли // Доклады РАН. Геофизика. 1995. Т. 341, № 3. С. 813—815.

13. Гутенберг Б. Основы сейсмологии. М.—Л.: ОНТИ. 1935. 146 с.
14. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 4. С. 378—315.
15. Децереvская Е.В., Сидорин А.Я. Ложная годовая периодичность землетрясений, обусловленная сезонными изменениями помех // Доклады РАН. 2005. Т.400, № 6. С.798—802.
16. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
17. Завьялов А.Д. 33-я генеральная ассамблея Европейской сейсмологической комиссии (Россия, Москва, 19—24 августа 2012 г.) и 9-я Международная молодежная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» 33-й ГА ЕСК (Россия, Обнинск, 25—30 августа 2012 г.) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 3. С. 69—76.
18. Ишанкулиев Дж., Сарыева Г.Ч., Азимов К.П., Азимова Н.К. Динамика уровня подземных вод, концентрации подпочвенного радона и молекулярного водорода в прикаспийском сейсмоактивном регионе Туркменистана / В сб.: Актуальные проблемы современной сейсмологии. Материалы междунар. Конф., посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АНРУз, 12—14 октября 2016 г. С. 234—241.
19. Копылов И.С. Научно-методические основы геоэкологических исследований нефтегазоносных регионов и оценки геологической безопасности городов и объектов с применением дистанционных методов / Афтореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Пермь, 2014.
20. Кучай О.А. Особенности проявления сильных землетрясений в поле сеймотектонических деформаций // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1, № 3. С. 285—296.
21. Кучай О.А., Бушенкова Н.А. Мезанизмы очагов землетрясений Центральной Азии // Физическая мезомезаника. 2009. Т. 12, № 1. С. 17—24.
22. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А. Внутригодовая повторяемость активизации сейсмического процесса для Тихоокеанского региона // Доклады РАН. 2005. Т. 403, № 4. С. 534—540.
23. Лоренц Э. Детерминированное неперидическое движение / В кн.: Странные аттракторы. М., 1981. С. 88—116.
24. Монахов Ф.И., Хантаев А.М., Сапрыгин С.М. Новые данные о гидрогеодинамическом эффекте, предшествующем землетрясениям // Известия АН СССР. Физика Земли. 1980. № 1. С. 105—107.
25. Певнев А.К. Прогноз землетрясений — место геодезического мониторинга в его решении // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 23. С. 105—116.
26. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясения // Доклады РАН. 2005. Т. 400, № 3. С. 372—377.
27. Рогожин Е.А., Куланин Н.В. О долгосрочной периодичности сейсмической активности Кавказско-Восточного-Анатолийского региона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 2. С. 23—29.
28. Рогожин Е.А. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений — основа реального сейсмического прогноза. М., 2011. 368 с.
29. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
30. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука, 2001. 375 с.
31. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники // М.: Наука, 2003. 270 с.
32. Сытинский А.Д., Боков В.Н., Оборин А.Д. Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43, № 1. С. 136—142.
33. Сытинский А.Д. О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 2. С.132—134.
34. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 100 с.
35. Шестопалов И.П., Харин Е.П. Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности // Геофизический журнал. 2006. Т. 28, № 4. С. 59—70.
36. Электронный ресурс: <http://gearmix.ru/archives/37847>
37. Электронный ресурс: <https://www.epochtimes.ru/kitaj-sozdast-sistemu-ekstrennogoopoveshheniya-o-zemletryaseniyah-99035049/#/>

ПАМЯТИ ВЕРЫ ГЕОРГИЕВНЫ ГУТНИЧЕНКО (1952—2019)



20 марта 2019 г. на 67-м году жизни скончалась доцент кафедры прикладной и системной экологии Вера Георгиевна Гутниченко.

После окончания в 1974 г. с отличием гидрологического факультета Ленинградского гидрометеорологического института Вера Георгиевна осталась работать в институте в должности инженера научно-исследовательского сектора. В 1976 г. она поступила в аспирантуру и в 1980 г. успешно защитила кандидатскую диссертацию. Она активно занималась научно-исследовательской работой, руководила экспедициями на БАМе и Алтае.

Научные интересы Веры Георгиевны были связаны с вопросами прогнозирования и расчетов речного стока, математического моделирования гидрологических процессов, статистического анализа временных рядов, а также с использованием современных информационных и компьютерных технологий в геоэкологии. Она является автором более 50 научных и учебно-методических публикаций.

В 1994 г. В.Г. Гутниченко принимала активное участие в организации в РГГМУ факультета Экологии и физики природной среды. До 1998 г. она являлась председателем методической комиссии этого факультета. Разработала и читала лекционный курс «Прикладные программные системы в экологии», проводила занятия

по дисциплинам «Методы обработки и анализа геоэкологической информации», «Банки и базы данных в геоэкологии», руководила курсовыми, выпускными и дипломными работами студентов, а также магистерскими диссертациями. Начиная с 1999 г. руководила учебно-производственной практикой студентов на острове Валаам и на реке Охте. Постоянно участвовала в научно-исследовательской работе, являясь координатором российских и международных грантов и проектов кафедры. Начиная с 2000 г. участвовала в организации и проведении пяти международных конференций «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» в качестве ученого секретаря оргкомитета. В течение последних 12 лет являлась членом Ученого совета факультета, а также Государственных экзаменационных и аттестационных комиссий.

Вся жизнь Веры Георгиевны была связана с университетом. Будем ее помнить и чтить память о ней.

Друзья, коллеги, ученики

Сведения об авторах

- Абрамов Валерий Михайлович*, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры морских информационных систем, Российский государственный гидрометеорологический университет, val.abramov@mail.ru
- Абрамов Виктор Александрович*, заместитель директора СЦНИТ, Российский государственный гидрометеорологический университет, v.abramov@rshu.ru
- Александров Виктор Яковлевич*, канд. геогр. наук, доцент военной кафедры, Российский государственный гидрометеорологический университет, meteovik1@mail.ru.
- Боков Виктор Николаевич*, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, Центр геофизических прогнозов «Градиент», viktor.bokov333@gmail.com
- Восканян Карина Левановна*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, kvosia@mail.ru
- Горошкова Наталья Ивановна*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальных исследований, Государственный гидрологический институт, goroshnat@yandex0.ru
- Ершова Александра Александровна*, канд. геогр. наук, доцент, начальник Управления научных и инновационных исследований, Российский государственный гидрометеорологический университет, ershova@rshu.ru
- Жданова Екатерина Юрьевна*, канд. геогр. наук, научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ekaterinazhdanova214@gmail.com
- Зеленцов Вячеслав Алексеевич*, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, v.a.zelentsov@gmail.com
- Коваль Андрей Владиславович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, кафедра физики атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, a.v.koval@spbu.ru
- Коржиков Александр Яковлевич*, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, akotjikov@mail.ru
- Крюкова Светлана Викторовна*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, krukos@rambler.ru
- Кузнецов Анатолий Дмитриевич*, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, kuznetsov1946@inbox.ru

- Курбанов Бахтиёр Тохтаевич*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Национальный центр государственных кадастров, геодезии и картографии Госкомземгеодезкадистра, bk1948@bk.ru
- Лобанов Владимир Алексеевич*, д-р техн. наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, lobanov@EL6309.spb.edu
- Малинин Валерий Николаевич*, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО — МОК и охраны природных вод, Российский государственный гидрометеорологический университет, malinin@rshu.ru
- Михеев Валерий Леонидович*, канд. юрид. наук, доцент, ректор Российского государственного гидрометеорологического университета, rector@rshu.ru
- Мушкет Иван Ильич*, д-р юрид. наук, профессор, проректор по научной работе, Российский государственный гидрометеорологический университет, i.mushket@rshu.ru
- Нестеров Евгений Самойлович*, д-р геогр. наук, главный научный сотрудник, отдел морских гидрологических прогнозов, Гидрометцентр России, nesterov@mecom.ru
- Палкин Иван Иванович*, канд. воен. наук, доцент, первый проректор, Российский государственный гидрометеорологический университет, palkin@rshu.ru
- Пилипенко Анастасия Владимировна*, аспирант, кафедра гидрологии суши, Российский государственный гидрометеорологический университет, pilipenko.an.12@gmail.com
- Пиманов Илья Юрьевич*, младший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, pimen@list.ru
- Пономаренко Мария Руслановна*, младший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, pntny@yandex.ru
- Попов Николай Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности, Российский государственный гидрометеорологический университет, drnickpopov@gmail.com
- Потрясаев Семен Алексеевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, spotryasaev@gmail.com
- Сероухова Ольга Станиславовна*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, serouhova@inbox.ru
- Симакина Татьяна Евгеньевна*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, tatiana.simakina@gmail.com

- Ткаченко Георгий Николаевич*, главный конструктор проекта, АО «НИЦ СПб ЭГУ», tkachenko.georgiy@nicetu.spb.ru
- Трунин Сергей Викторович*, аспирант, Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, truninsv@gmail.com
- Фёдорова Наталия Юрьевна*, канд. пед. наук, доцент, зав. кафедрой иностранных языков, Российский государственный гидрометеорологический университет, natajfedorova@rambler.ru
- Фролов Анатолий Васильевич*, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории глобальной гидрологии, Институт водных проблем РАН, anatolyfrolov@yandex.ru
- Чурюлин Евгений Викторович*, аспирант, кафедра гидрологии суши, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, evgenyuchur@gmail.com
- Шумакова Елена Михайловна*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория охраны окружающей среды, Институт водных проблем РАН, Spectr56@gmail.com
- Ярмухамедова Флора Махмудовна*, канд. техн. наук, доцент кафедры иностранных языков, Российский государственный гидрометеорологический университет, kafedra_inyaz@rshu.ru

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 55

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Начальник РИО А.В. Ляхтейнен
Технический редактор М.В. Иванова

Подписано в печать 28.06.2019. Формат 70×100 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,63. Тираж 500 экз. Заказ № 798.
РГГМУ, 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
