

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

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

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

## № 65

Научно-теоретический журнал

*Издается с октября 2005 года*

*Выходит 4 раза в год*

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2021

УДК УДК 001(051.2)«540.1»  
ББК 72я5

Гидрометеорология и экология. № 65. Научно-теоретический журнал. Санкт-Петербург : РГГМУ, 2021. 142 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-корр. РАН, президент РГГМУ — *председатель совета*

**Михеев В.Л.**, канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ — *зам. председателя совета*

**Леонтьев Д.В.**, канд. юрид. наук, проректор по развитию РГГМУ, и.о. проректора по научной работе — *зам. председателя совета*

**Агафонов Г.И.**, д-р техн. наук, академик РАН, председатель совета директоров холдинговой компании «Пигмент»; **Анри де Люмле**, PhD, проф., член-корр. Французской академии наук (Франция); **Камболов М.А.**, канд. юрид. наук, вице-президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»; **Квинт В.Л.**, д-р экон. наук, проф., главный научный сотр. Центрального экономико-математического института РАН; **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.**, PhD, проф. Гамбургского ун-та (Германия) и Манчестерского ун-та (Великобритания); **Малори Жан**, PhD, профессор, почетный президент РГГМУ (Франция); **Орыщенко А.С.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, зав. кафедрой СПбПУ; **Сальников В.Г.**, д-р геогр. наук, проф., декан ф-та географии и природопользования Казахского национального университета им. Аль-Фараби; **Сильников М.В.**, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, директор Института военно-технического обучения и безопасности СПбПУ; **Тимофеева А.Г.**, канд. геогр. наук, директор Института непрерывного образования РГГМУ; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Хуакин Л.**, PhD, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Джайян (КНР).

*Редакционная коллегия:*

**Малинин В.Н.**, д-р геогр. наук, проф. — *главный редактор*

**Погорельцев А.И.**, д-р физ.-мат. наук, проф. — *зам. главного редактора*

**Кондратьев С.А.**, д-р физ.-мат. наук — *зам. главного редактора*

**Гайдукова Е.В.**, канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*

**Алексеев Г.В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Белоненко Т.В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Вильфанд Р.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Гриценко В. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Дмитриев В.В.**, д-р геогр. наук, проф.; **Иванов В.В.**, д-р физ.-мат. наук.; **Кудрявцев В.Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Лобанов В.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Мохов И.И.**, д-р физ.-мат. наук, академик РАН; **Мушкет И.И.**, д-р юрид. наук, проф.; **Перцев Н.Н.**, д-р физ.-мат. наук; **Прошутинский А.Ю.**, д-р физ.-мат. наук (США); **Румянцев В.А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН; **Рябченко В.А.**, д-р физ.-мат. наук; **Смышляев С.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Татарникова Т.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Тимофеев Ю.М.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Угрюмов А.И.**, д-р геогр. наук, проф.; **Федорова Н.Ю.**, канд. пед. наук, доцент; **Филатов Н.Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Хоссфельд Уве**, PhD, университет Йена (Германия); **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Щукин Г.Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.

Журнал является продолжением журнала «Ученые записки РГГМУ», который был основан в 2005 г. В 2010 г. он вошел в список ВАК по направлению «науки о Земле», а в январе 2020 г. переименован в журнал «Гидрометеорология и экология».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

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

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

ISSN 2713-3001

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

Журнал индексируется в системе CrossRef и 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 редколлегии: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2021

© Авторы публикаций, 2021

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

---

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

# HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

## № 65

A theoretical research journal

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

ISSN 2713-3001

St. Petersburg  
RSHU  
2021

UDC 001(051.2)«540.1»  
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 65. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2021. 142 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.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of RSHU — *Chairman*

**Mikheev V.L.**, PhD in Juridical Sciences, Associate Professor, Rector of RSHU — *Vice-Chairman*

**Leont'ev D.V.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-Rector for Development, Acting Vice-rector for Research of RSHU — *Vice-Chairman*

**Agafonov G.I.**, Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, Board Chairman of "Pigment" holding company; **Fedorov M.P.**, Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Henry de Lumley**, PhD, Professor, Corresponding Member of the Academy of Sciences, France; **Huaqing Lu**, PhD, Professor, Vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Kambo-lov M.A.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-president of the National Research Center «Kurchatov Institute»; **Kuleshov Iu.V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Vice-president of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research;

**Kvint V.L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Leal W.**, PhD, Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (UK); **Malaurie Jean**, PhD, Professor, Honorary President of RSHU, France; **Otryshchenko A.S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Salnikov V.G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of Geography and Natural Management Faculty of Al-Farabi Kazakh National University; **Silnikov M.V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Military-Technical Education and Security Institute of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Timo-feeva A.G.**, PhD in Geography, Director of the Institute of permanent education RSHU.

**Kvint V.L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Leal W.**, PhD, Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (UK); **Malaurie Jean**, PhD, Professor, Honorary President of RSHU, France; **Otryshchenko A.S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Salnikov V.G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of Geography and Natural Management Faculty of Al-Farabi Kazakh National University; **Silnikov M.V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Military-Technical Education and Security Institute of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Timo-feeva A.G.**, PhD in Geography, Director of the Institute of permanent education RSHU.

*Editors:*

**Malinin V.N.**, Grand PhD in Geography, Professor — *Editor in Chief*

**Pogoreltsev A.I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor — *Deputy Editor in Chief*

**Kondratev S.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics — *Deputy Editor in Chief*

**Gaidukova E.V.**, PhD in Engineering — *Executive editor*

**Alekseev G.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Belonenko T.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Fedorova N.Iu.**, PhD in Pedagogic Sciences, Associate Professor; **Filatov N.N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Hossfeld Uve**, PhD (University of Jena, Germany); **Ivanov V.V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V.N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Lobanov V.A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mokhov I.I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Mushket I.I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Pertsev N.N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Proshutinskiĭ A.Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Rumyantsev V.A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S.P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Tatarnikova T.M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Timofeev Iu.M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Ugryumov A.I.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shchukin G.G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R.M.**, Grand PhD in Engineering, Professor.

**Alekseev G.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Belonenko T.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Dmitriev V.V.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Fedorova N.Iu.**, PhD in Pedagogic Sciences, Associate Professor; **Filatov N.N.**, Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Gritsenko V.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Hossfeld Uve**, PhD (University of Jena, Germany); **Ivanov V.V.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Kudriavtsev V.N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Lobanov V.A.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Mokhov I.I.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Mushket I.I.**, Grand PhD in Juridical Sciences, Professor; **Pertsev N.N.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Proshutinskiĭ A.Iu.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, USA; **Rumyantsev V.A.**, Grand PhD in Geography, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; **Ryabchenko V.A.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Smyshlyaev S.P.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Tatarnikova T.M.**, Grand PhD in Engineering, Professor; **Timofeev Iu.M.**, Grand PhD in Physics and Mathematics; **Ugryumov A.I.**, Grand PhD in Geography, Professor; **Shapron B.**, PhD, leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Shchukin G.G.**, Grand PhD in Physics and Mathematics, Professor; **Vilfand R.M.**, Grand PhD in Engineering, Professor.

The Journal is continuation of the Journal "Proceedings of RSHU", founded in 2005. In 2010 it was included in the list of the Higher Attestation Commission in the field of "Earth Science", and in January 2020 it was renamed into the Journal "Gidrometeorologiya i ekologiya".

The Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Certificate III № ФЦ77-79574 of November 11, 2020.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geocology, limnology, geoinformatics, geophysics, social sciences and humanities.

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

ISSN 2713-3001

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

The Journal is indexed in the CrossRef and RSCI systems and is included in the "Russian Science Citation Index" (RSCI) database, placed on the National Electronic Library platform (<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), 2021  
© Authors of publications, 2021

## Содержание

### Обзоры

- С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, С.Д. Голосов, И.С. Зверев, К.Д. Коробченкова.* Моделирование в озераведении. Опыт ИНОЗ РАН. . . . 607

### Метеорология

- Е.М. Лившиц, В.И. Петров.* Разделение конвективных штормов. Часть I. Динамика и кинематика . . . . . 648
- А.Х. Кагермазов, Л.Т. Созаева.* Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградовых процессов с заблаговременностью до пяти суток . . . . . 671

### Океанология

- А.А. Павловский, В.И. Шамиурин.* Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России. . . . . 681

### Гидрология

- Ф.Г. Агаев, Х.Г. Асадов, Б.Л. Джафарова, И.Г. Абдуррахманова.* Построение оптимальной модели стока поверхностных вод в водоемы в сельском хозяйстве . . . . . 694

### Геоинформатика

- Н.Н. Красногорская, Е.А. Белозерова.* Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами. . . . . 702
- А.В. Бочаров, И.Н. Межеумов, П.М. Пахомов, С.Д. Хижняк, О.А. Тихомиров, С.И. Биденко, П.Н. Кравченко.* Территориальная дифференциация водных и наземных геосистем с использованием данных космических сенсоров . . 726

### Хроника

- Международная научно-практическая конференция «Дни Арктики в Санкт-Петербурге — 2021: международное научное сотрудничество в Арктике в эпоху изменения климата» . . . . . 738

## Contents

### Reviews

- S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova, S.D. Golosov, I.S. Zverev, K.D. Korobchenkova.*  
Modeling in Limnology. Experience of IL RAS ..... 607

### Meteorology

- E.M. Livshits, V.I. Petrov.* The splitting of convective storms. Part I. Dynamics  
and Kinematics ..... 648
- A.Kh. Kagermazov, L.T. Sozaeva.* Use of output data of the global model  
of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with  
lead time of up to five days. .... 671

### Oceanology

- A.A. Pavlovskii, V.I. Shamshurin.* Influence of Baltic Sea level rise on historic and  
cultural heritage of Russia ..... 681

### Hydrology

- F.G. Agayev, H.H. Asadov, B.L. Jafarova, I.G. Abdurrahmanova.* Building  
an optimal model of surface water runoff in agriculture ..... 694

### Geoinformatics

- N.N. Krasnogorskaya, E.A. Belozerova.* Development of a geographic  
information system for decision making in water resources management. .... 702
- A.V. Bocharov, I.N. Mezheumov, P.M. Pakhomov, S.D. Khizhnyak, O.A. Tikhomirov,  
S.I. Bidenko, P.N. Kravchenko.* Territorial differentiation of water and terrestrial  
geosystems using data from space sensors. .... 726

- Chronicle** ..... 738

УДК 556.55.072

doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647

**Моделирование в озераведении. Опыт ИНОЗ РАН*****С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, С.Д. Голосов,  
И.С. Зверев, К.Д. Коробченкова***

Институт озераведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, 3718470@gmail.com

Лабораторное моделирование в ИНОЗ РАН представлено гидродинамическим лабораторным комплексом для исследования процессов турбулентного вовлечения в озерах. Стохастическое моделирование проводится в направлениях совершенствования методов идентификации моделей, разработки моделей стационарных случайных процессов и их совокупности, нестационарных случайных процессов, а также стохастических моделей динамических систем. Детерминированные модели используются для описания процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем». Сформирована и успешно используется при решении практических задач детерминированно-стохастическая модельная система. Разработанные и апробированные модели открывают широкие возможности для совершенствования прогностической части государственного мониторинга крупных озер.

*Ключевые слова:* озераведение, лабораторная модель, математическая модель, модельная система, мониторинг.

**Modeling in Limnology. Experience of IL RAS*****S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova, S.D. Golosov,  
I.S. Zverev, K.D. Korobchenkova***

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences — a separate structural unit of the Federal State Budgetary Institution of Science “St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences”, St. Petersburg, Russia, 3718470@gmail.com

Modeling is an effective means of expanding the capabilities of limnology, which is a formalized representation of the available knowledge about the processes and systems being studied in various ways. Laboratory or physical modeling at the Institute of Limnology was presented by the hydrodynamic laboratory complex “Aerohydrochannel” to study turbulent entrainment processes in lakes. Mathematical models can be divided into probabilistic-statistical (stochastic) and deterministic. At the Institute stochastic modeling was carried out to improve methods for identifying models, developing models of stationary random processes and their totality, non-stationary random processes, and stochastic models of dynamic systems. Deterministic models were used to describe heat and mass transfer processes in the “catchment-watercourse-reservoir” system. Currently, a deterministic-stochastic model system has been formed and is successfully used, which includes the following components: a model of formation of runoff in a catchment, a model of removal of chemicals from a catchment and formation of a load on a reservoir, model (1D, 2D, 3D) of water movement, transport of sediments and dissolved impurities in an open channel, 1D model of thermal regime and mixing in a reservoir, 1D model of dynamics of non-conservative impurities in a reservoir, 2D model of currents and sediment transport in a shallow reservoir, 3D model of heat and mass

transfer in a reservoir, which is a model of the hydrodynamics of the inland sea, adapted to the conditions of a lake; and a stochastic weather model. The article gives the examples of using the developed models for solving the problems of assessing the state of such large water bodies as Ladoga and Chudsko-Pskovskoye lakes, Kuibyshev reservoir, as well as for predicting their possible changes under the influence of economic activity and climatic influences. The results of implementation of international projects using the created model system are presented. The developed and tested models offer wide opportunities for improving the predictive part of the state monitoring of large lakes and reservoirs.

*Keywords:* limnology, laboratory model, mathematical model, model system, monitoring.

**For citation:** *S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova, S.D. Golosov, I.S. Zverev, K.D. Korobchenkova.* Modeling in Limnology. Experience of IL RAS. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 607—647. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-607-647

## Введение

Озероведение (лимнология) — раздел гидрологии суши, изучающий континентальные водоемы — озера, водохранилища, пруды и весь комплекс протекающих в них взаимосвязанных процессов. При исследовании водоемов озероведение использует методы гидрологии, гидрографии, гидрофизики, гидрохимии, гидробиологии, геоботаники, метеорологии, геоморфологии, математики, информатики, моделирования и др. 16 декабря 1943 г. решением Президиума АН СССР в г. Ленинграде была создана Лаборатория озероведения, преобразованная в 1971 г. в Институт озероведения АН СССР. В 1991 г. Институт перешел в подчинение РАН, а в 2020 г. стал обособленным подразделением Санкт-Петербургского Федерального Исследовательского Центра РАН (ИНОЗ РАН СПб ФИЦ РАН).

Основными методами исследований, издавна используемыми в озероведении, являются полевые исследования и натурный эксперимент. Однако организация полевых экспериментальных работ на водоемах и их водосборных бассейнах обычно требует больших затрат времени и средств. Как показывает многолетняя практика, если натурные эксперименты не были подкреплены теоретическими положениями, то полученные на их основе выводы оказываются малоубедительными, нередко противоречивыми и плохо поддаются обобщению как во времени, так и в пространстве. Эффективным средством расширения возможностей озероведения является моделирование, представляющее собой формализованное представление имеющихся знаний об изучаемых процессах и системах различными способами. Использование моделей позволяет осуществить выход за пределы натурального эксперимента, во много раз сократить сроки и стоимость исследований, число занятых специалистов, повысить обоснованность принимаемых решений.

Целью настоящей публикации является обзор и анализ развития методов математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем» в Институте озероведения Российской академии наук.

## Основные направления исследований ИНОЗ РАН в области моделирования и история их развития

Если воспроизведение какого-то процесса или системы происходит в лабораторных условиях, то модель принято называть физической или лабораторной.

Если формализация изучаемого процесса проводится в виде математических выражений, то модель является математической. Институт озераедения имеет опыт создания моделей обоих перечисленных выше типов.

**Лабораторное моделирование** было представлено гидродинамическим лабораторным комплексом для исследования процессов турбулентного вовлечения в озерах «Аэрогидроканал». На лимнологической станции института в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого века сконструирована и изготовлена уникальная измерительная система, предназначенная для исследования широкого спектра гидротермодинамических процессов в водной среде. Экспериментальный комплекс позволял исследовать процессы взаимодействия атмосферы и водной подстилающей поверхности, формирования верхнего перемешанного слоя, а также процессы турбулентного вовлечения в стратифицированной водной среде. «Аэрогидроканал» представлял собой гидравлический лоток длиной более 20 м, состоящий из чередующихся прямолинейных и криволинейных участков, снабженных направляющими пластинами и сотовыми выпрямителями воздушного потока (рис. 1).

Система имеет специальные нагреватели воздушного потока, позволяющие воспроизводить различные термодинамические условия на границе раздела вода—воздух. Главная отличительная особенность «Аэрогидроканала», по сравнению с аналогичными отечественными и зарубежными установками, состояла в том, что его конструкция позволяла подавить возникающие в замкнутых каналах паразитарные вторичные циркуляции водной массы. Уникальность «Аэрогидроканала» подтверждена авторским свидетельством (рис. 2). Результаты

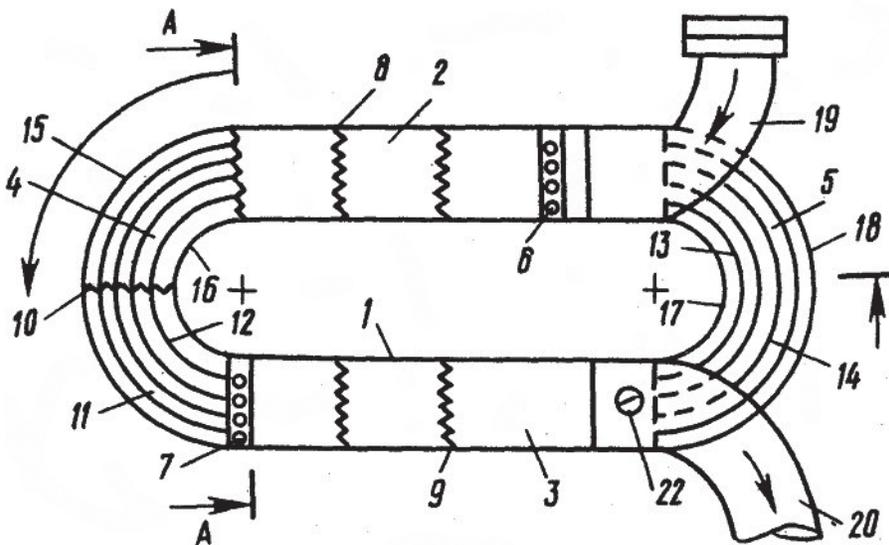


Рис. 1. Схематичное изображение установки «Аэрогидроканал».

Fig. 1. Schematic representation of the installation "Aerohydrochannel".



Рис. 2. Авторское свидетельство на установку «Аэрогидроканал».

Fig. 2. Copyright certificate for installation "Aerohydrochannel".

экспериментов на установке опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях [1, 2].

Одной из основных задач математического моделирования является проведение вычислительного эксперимента с целью «изучения, прогнозирования, оптимизации сложных многопараметрических нелинейных процессов, теоретическое и экспериментальное исследование которых традиционными методами затруднено или невозможно» [3]. По характеру исходных данных и результатов предсказания математические модели, в свою очередь, могут быть разделены на вероятностно-статистические (стохастические) и детерминистические.

**Вероятностно-статистические (стохастические) модели** основаны на статистической информации, а предсказания, полученные с их помощью, имеют вероятностный характер. Многофакторность, полицикличность, непредсказуемость изменчивости гидрометеорологических процессов приводят к необходимости рассматривать их как случайные функции временных и пространственных координат и описывать их свойства в терминах вероятностных характеристик.

На начальном этапе основное направление исследований состояло в раскрытии временных и пространственных особенностей колебаний гидрологических характеристик и выявлении их связи с характеристиками физико-географического ландшафта. На основе установленных закономерностей проведено совершенствование инженерных методов расчета стока. Были решены следующие задачи: исследована временная статистическая структура межгодовых колебаний годового речного стока, показана связь годового стока с характеристиками физико-географического ландшафта, предложены параметрические модели случайных процессов для описания и долгосрочного прогноза годового стока, создана методика расчета временных характеристик группировок годового стока, и на ее основе раскрыты закономерности пространственного распределения характеристик группировок по территории Евразии и дана им физико-географическая интерпретация. Это направление исследований в основном представлено в работе [4]. Дальнейшее развитие методов стохастического моделирования проходило по следующим направлениям.

*Совершенствование методов идентификации стохастических моделей.* Процедура стохастического моделирования подразумевает подготовительный этап, на котором по реализациям исследуемых процессов рассчитываются оценки вероятностных характеристик, необходимые для построения модели. Поэтому наряду с использованием стандартных процедур оценивания вероятностных характеристик в ИНОЗ РАН разрабатываются и совершенствуются алгоритмы их расчета, которые в наибольшей степени отражают специфику исследуемых процессов. К таким разработкам относятся следующие процедуры, необходимые для идентификации модели: алгоритм оценивания параметрического спектра по перепределенной системе уравнений Юла-Уокера; метод параметрического оценивания взаимных спектров; метод учета в спектре нечетной составляющей процесса; методическое обоснование наличия 2—3-летних и 29—30-летних циклов межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов [5]; методика оценивания параметров модели совокупности рядов наблюдений по методу наименьших квадратов [6].

*Разработка моделей стационарных случайных процессов.* За основу стационарного приближения природных процессов приняты линейные и нелинейные модели случайных процессов, позволяющие воспроизводить модельные реализации процессов с нормальным, экспоненциальным, устойчивым законами распределения их ординат. Эти модели широко известны, просто реализуются, имеют хорошо развитое алгоритмическое и программное обеспечение. Для учета характерных особенностей временных рядов гидрологических процессов предложены конкретные виды преобразования, сводящие функции распределения анализируемых реализаций к стандартным распределениям модельных процессов. Такое преобразование позволяет воспроизводить модельные реализации с произвольным законом распределения ординат и открывает широкие возможности решения научных и прикладных водохозяйственных задач. В работе [4] на основе такого подхода разработан аппарат теории случайных выбросов, позволяющий получать такие важные в народнохозяйственной практике характеристики, как величина

и длительность выбросов, среднее число выбросов за фиксированный уровень, интервалы между последовательностями выбросов и т.д., и были решены следующие задачи: исследована временная структура межгодовых колебаний годового речного стока рек, показана связь годового стока с характеристиками физико-географического ландшафта, создана методика расчета временных характеристик группировок годового стока рек, и на ее основе раскрыты закономерности пространственного распределения характеристик группировок по территориям Европы и Азии.

*Разработка моделей совокупности стационарных случайных процессов.* Большинство природных процессов обладают годовой ритмикой. Стохастической моделью годовой ритмики является модель периодически коррелированных случайных процессов. В соответствии с этой методикой ряды среднемесячных значений исследуемых процессов представляются в виде 12-мерного вектора, состоящего из 12-мерных годовых последовательностей каждого месяца. Такое представление заменяет периодически нестационарный процесс эквивалентным ему 12-мерным вектором из стационарных и стационарно связанных случайных процессов. Указанный подход применен для создания «Стохастической модели годового хода и межгодовой изменчивости водной системы уровень Ладоги — сток реки Невы». Модель использована для изучения функционирования водной системы в современном климате и для оценки ее реакции на различные варианты изменения климата. Монография [6] ориентирована на совершенствование методов и точности расчета характеристик речного стока и обеспечения запросов практики водохозяйственного водопотребления и гидрологического строительства по характеристикам водного режима рек, которые не освещены данными наблюдений. Подходящее решение этой проблемы состоит в построении региональных оценок функции обеспеченности гидрологических параметров по группе рек, обладающих определенной общностью гидрологического режима. В этой работе предложена процедура учета корреляционных связей совокупности рядов наблюдений, позволяющая повысить точность оцениваемых параметров.

*Разработка моделей нестационарных случайных процессов.* В работах ИНОЗ РАН рассмотрены приемы учета различных видов нестационарности гидрологических процессов (таких как нестационарность по математическому ожиданию, дисперсии, корреляционной функции, спектру). Для детализации общего фона межгодовой изменчивости годового стока рек целесообразно обратиться к временным рядам большой продолжительности. При этом ряды могут охватывать несколько климатических периодов. Для адекватного отражения такой нестационарности предложено использовать модели процессов дробного шума. Колебания уровня воды бессточного водоема — это пример природной нестационарности, когда длительные серии высокого или низкого стояния уровня водоема обусловлены случайными отклонениями составляющих водного баланса от их средних значений. Поэтому для изучения свойств межгодовой изменчивости уровня бессточных водоемов использованы модели процессов со стационарными приращениями. Применение этих моделей для изучения механизма формирования долгопериодных колебаний уровня Каспийского моря объяснило, почему даже

в стационарном климате уровень Каспия не имеет фиксированного среднего значения. Учет в моделях всех особенностей нестационарности позволяет адекватно отражать природу и механизмы функционирования гидрологических процессов. Выполненные по таким моделям расчеты обладают большой достоверностью и являются надежным пособием при планировании и рациональном управлении водными ресурсами [5].

*Разработка стохастических моделей динамических систем.* В работах ИНОЗ РАН представлены стохастические модели динамических систем с различными числами входов и выходов. Модели динамических систем с одним входом и одним выходом предназначены для оценки вклада каждой климатической составляющей на формирование изменчивости исследуемого гидрологического процесса. Модели динамических систем с несколькими входами и одним выходом необходимы для изучения формирования изменчивости гидрологического процесса под воздействием совокупности режимобразующих факторов. В общем виде решение задачи по изучению закономерностей реакции водных объектов на внешнее воздействие сводится к рассмотрению динамической системы с совокупностью воздействующих показателей на входе и совокупностью гидрологических характеристик на выходе системы. Разработанные модели применяются для изучения закономерностей функционирования водных объектов в современном климате и для оценки их реакции на изменение климата и антропогенной нагрузки [5, 7].

**Детерминистические модели** активно начали развиваться в Институте озероведения РАН с середины 1980-х гг. В 1986 г. была разработана одномерная нестационарная модель термического режима и условий перемешивания в озере, названная «ИНОЗ», которая применена для составления прогноза возможных изменений гидротермодинамического режима оз. Севан, вызванных планируемым искусственным подъемом уровня [8, 9]. В дальнейшем модель многократно усовершенствовалась и уже под названием **ТЕМIX** широко применялась для описания годового цикла термического режима разнотипных озер, расположенных в различных географических зонах умеренных широт северного полушария [10]. Модель относилась к классу одномерных нестационарных гидротермодинамических моделей и была основана на параметризации вертикального распределения температуры в водной толще и донных отложениях. В ней рассчитывались толщина верхнего перемешанного слоя водоема, потоки тепла, влажности и количества движения через свободную поверхность озера, вертикальный профиль температуры в системе вода — донные отложения, а также формирование и таяние ледяного покрова. Модель была успешно применена для описания термического режима центральной части Ладожского озера, где глубины не превышают 50 м.

Развитием модели **ТЕМIX** стала одномерная нестационарная модель озерной экосистемы [11]. Основной задачей, для решения которой создавалась модель, была оценка отклика водоема на изменения внешней и внутренней фосфорной нагрузки. Модель позволяла исследовать как отклик экосистемы озера или его части на естественный приток фосфора с водосбора, так и оценивать последствия аварийных сбросов сточных вод из коллекторов промышленных предприятий. С использованием модели были оценены последствия загрязнения Волховской

губы Ладожского озера соединениями фосфора во время аварии на Сясьском ЦБК зимой 1998—1999 гг. Результаты расчетов показали, что поступление аварийного сброса из коллектора ЦБК в водную массу и донные отложения Волховской губы с весенним паводком уже в первые летние месяцы могло бы привести к резкому ухудшению экологической обстановки в южной части Ладоги. В этом случае южная часть озера могла бы превратиться в непригодную для рекреационных целей акваторию.

В дальнейшем модель была преобразована в универсальную математическую модель гидротермодинамики озера **FLake** (Fresh-water Lake) [12]. В модели реализованы собственные результаты Института, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время модель служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды [12].

На основе модели FLake создана моделирующая система **FLakeEco** [13], с использованием которой смоделирована многолетняя динамика термического и кислородного режимов двух разнотипных озер — Мюггельзее (полимиктическое) и Хайлигензее (димиктическое), расположенных в черте г. Берлина и дан прогноз ухудшения экологического состояния этих озер на период до 2100 г. под воздействием возможных изменений регионального климата. В соответствии с результатами расчетов в обоих озерах могут резко измениться термический режим и условия перемешивания, что приведет к резкому ухудшению кислородного режима.

Несмотря на очевидные достоинства одномерных моделей (простота реализации, ясный физический смысл, лежащий в основе уравнений и др.), исследования экологического состояния Ладожского озера требовали разработки более сложной гидротермодинамической модели, которая могла бы воспроизводить термический режим и структуру течений в различных по морфометрическим параметрам районах озера. Первая версия такой модели была создана и протестирована в 1988 г. по инициативе и под руководством работавшего в Институте Л.А. Оганесяна — выдающегося специалиста по численному анализу, одного из создателей всемирно признанного метода конечных элементов. Трехмерная нестационарная модель, разработанная на основе полных уравнений термогидродинамики [14], описывает такие явления, как образование и таяние льда, динамику термического бара, формирование термоклина весной и его разрушение осенью. На основе этой модели создана трехмерная нестационарная модель экосистемы Ладожского озера [15—17]. Недостатком указанных моделей является то, что в них отсутствует учет непосредственного воздействия атмосферы на озеро. Последнее существенно ограничивает применимость моделей при решении задач

о влиянии изменчивости регионального климата на гидротермодинамику озер и их экологическое состояние. Для преодоления возникшей проблемы к озерным условиям была адаптирована математическая модель гидродинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [18]. Выбор модели был обусловлен тем, что гидротермодинамические процессы в Ладожском озере отличаются многообразием и сложностью и по этим показателям озеро можно рассматривать, скорее, как пресноводное внутреннее море, чем озеро. Вторым, решающим аргументом послужило то, что данная модель прошла успешную апробацию при моделировании гидротермодинамики Каспийского моря, являющегося характерным представителем класса внутренних морей.

Особое внимание в исследованиях Института озераведения уделялось оценке состояния Невской губы, которая после строительства Комплекса защитных сооружений СПб от наводнений (КЗС) фактически стала пресноводным водоемом, находящимся в черте города. Качество воды Невской губы определяется, главным образом, поступлением химических веществ со стоком Невы и сбросами городских очистных сооружений. В 1989—1991 г. научный коллектив сотрудников ИНОЗ РАН под руководством канд. техн. наук С.В. Грибина выполнил уникальные комплексные исследования по изучению и моделированию распространения шлейфов сточных вод Северной станции аэрации сточных вод в Невской губе [19—21]. Работа включала как экспериментальные исследования на северной части акватории Невской губы, так и лабораторное и математическое моделирование. Целью исследований являлось экспериментальное и модельное изучение шлейфа сточных вод от выпусков Северной станции аэрации (ССА) Санкт-Петербурга в Невской губе. В ходе выполнения математического моделирования показано, что водовыпуск ССА работает в режиме эжекторного насоса, который засасывает в себя и пропускает через створ шириной 200—250 м значительные объемы (140 м<sup>3</sup>/с) воды с акватории Невской губы. Это, в свою очередь, приводит к понижению водообмена вдоль побережья, образованию водоворотных структур и застойных зон как выше, так и ниже по течению. Из сказанного следует, что обвинения в адрес КЗС по поводу образования застойных зон в Невской губе не всегда соответствуют действительности.

Более общую картину распространения шлейфов сточных вод в Невской губе иллюстрируют результаты моделирования, выполненного совместно с СПб Филиалом Института океанологии РАН с использованием трехмерной гидродинамической модели [22]. По результатам моделирования сделаны следующие выводы:

— наиболее загрязненным является район у устья Невы между о. Белый и северной дамбой морского канала. Превышение прибрежных концентраций общего фосфора над фоновыми значениями здесь будет иметь место при любом ветре, за исключением южного, который способствует очищению южной части рассматриваемого района у северной дамбы морского канала. Дамба является препятствием, ограничивающим проникновение шлейфов сточных вод ЦСА к южному побережью Финского залива;

— у южного побережья Невской губы наихудшая ситуация отмечается летом при западном ветре, который приводит к возникновению пятна повышенной

концентрации в юго-восточной части Невской губы. При этом юго-восточный район акватории оказывается практически свободным от загрязнения сточными водами. Исключением являются нагонные ситуации;

— мелководная акватория у северного побережья Невской губы подвержена загрязнению сбросов ССА. Здесь неблагоприятные ситуации возникают при западном и северном ветрах;

— у северного и восточного побережий о. Котлин зоны повышенной концентрации общего фосфора наблюдаются летом при восточном и южном ветрах, а также в зимнее время. Южное побережье острова загрязнено несколько меньше;

— манипулирование затворами водопропускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в окрестности дамбы. При этом качество воды может быть улучшено (т. е. достигнуто уменьшение концентрации вредных примесей) у северного побережья Невской губы и у северного побережья о. Котлин. Добиться значительного улучшения качества воды у южного побережья Невской губы, таким образом, вряд ли возможно.

С помощью методов математического моделирования выполнено исследование формирования аварийных (ливневых) сбросов части неочищенных сточных вод основными очистными сооружениями города при выпадении интенсивных осадков, а также оценка траекторий их последующего движения по акватории Невской губы [23]. Полученные результаты показали, что ливневые сбросы сильно увеличивают концентрации примесей в окрестности водовыпусков очистных сооружений и приводят к образованию пятен повышенной концентрации, распространяющихся по акватории Невской губы (рис. 3). Характерное время существования повышенных концентраций в окрестности водовыпусков составляет от 10 ч до 1,5 сут. Пятна повышенной концентрации, двигающиеся по акватории губы под воздействием гидрометеорологических факторов, могут существовать дольше (до нескольких суток).

Методы трехмерного гидродинамического моделирования использовались также и при оценке перспективной оптимизации расположения водовыпусков муниципальных очистных сооружений ГУП «Водоканал СПб» на акватории Невской губы [24—25]. Критерием оптимального расположения выпусков в Невской губе определены локализация загрязнений в непосредственной окрестности выпусков и скорость их последующего разбавления вдали от берегов вне застойных зон. Численные эксперименты по выбору оптимального размещения водовыпусков юго-западных очистных сооружений (ЮЗОС) позволили определить наилучший вариант их расположения вблизи Морского канала, что и было реализовано на практике. Существующая гидродинамическая ситуация в этой части Невской губы в большинстве случаев приводит к тому, что сточные воды ЮЗОС распространяются в шлейфе стоков Центральной станции аэрации (ЦСА) вдали от берега и подвержены дополнительному перемешиванию в зоне морского канала проходящими судами. Кроме того, показано, что манипулирование затворами водопропускных сооружений КЗС позволяет изменять концентрацию примесей в окрестности дамбы. При этом качество воды может быть улучшено у северного побережья Невской губы и у северного побережья о. Котлин. Добиться значительного

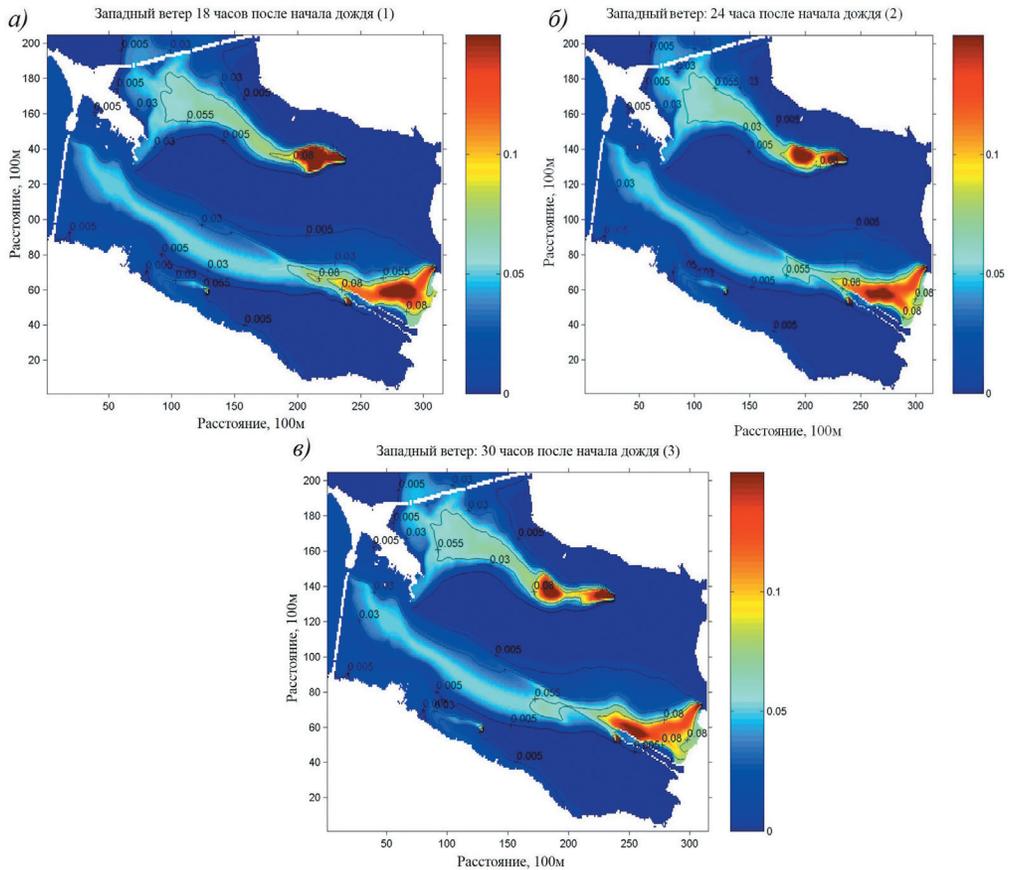


Рис. 3. Распределение поверхностной концентрации общего фосфора  $P_{\text{общ}}$  (мг/л) в Невской губе через 18 (а), 24 (б) и 30 (в) ч после начала выпадения осадков.

Летний стоково-ветровой режим при расходе Невы 2540 м<sup>3</sup>/с и западном ветре 3,5 м/с.

Fig. 3. Distribution of surface concentration of total phosphorus  $P_{\text{от}}$  (mg/l) in the Neva Bay 18 (a), 24 (б), and 30 (в) hours after the onset of precipitation.

Summer runoff-wind regime at a discharge of the Neva of 2540 m<sup>3</sup>/s and a westerly wind of 3,5 m/s.

улучшения качества воды у южного побережья Невской губы, манипулируя затворами водопропускных сооружений КЗС, по-видимому, не удастся.

С конца 80-х годов в Институте озераедения РАН получило развитие математическое моделирование процессов формирования стока, выноса с водосбора биогенных веществ, формирования внешней нагрузки на водные объекты [9, 26—28]. В большинстве случаев создание такого рода моделей завершалось их практическим внедрением и подготовкой соответствующих рекомендаций [29—30]. Разработанные модели, получившие название **ILHM** (Institute of Limnology Hydrological Model) и **ILLM** (Institute of Limnology Load Model), прошли верификацию

на ряде водосборов рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка, Шуя, Водла и др. [31—33]. По результатам выполнения проекта ЕС BaltHazAR II [34] сделан вывод, что «... модель ILLM может использоваться для расчета биогенной нагрузки на Балтийское море для неконтролируемых и частично контролируемых водосборов в Российской части водосборного бассейна». В выводах Российско-шведского проекта RusNIP II [35] говорится, что «модель ILLM наиболее удобна для использования в относительно крупных водосборах».

Одной из основных проблем, ограничивающих возможности использования моделей стока и выноса биогенных элементов и снижающих достоверность расчетов, является недостаток данных натуральных наблюдений. Решение найдено в виде стохастического генератора метеоэлементов **SWM**, обеспечивающего детерминированные модели продолжительными рядами значений осадков, температуры воздуха и др. [36].

Перспективным направлением исследований в области моделирования биогенной нагрузки на водные объекты является создание расчетных методов, ориентированных на использование данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности. Примером может служить метод приближенной оценки биогенной нагрузки на озера и их трофического статуса по данным о структуре водосбора, полученным с помощью аэрофотосъемки [37]. Безусловным достоинством таких моделей являются оперативность получения информации и возможность описания пространственной неоднородности характеристик подстилающей поверхности и акваторий. В 2015 г. данные космической съемки поверхности водосборов Финского залива и Онежского озера успешно использовались при моделировании биогенной нагрузки на указанные водоемы в рамках проектов ИНОЗ РАН «*Научно-обоснованные предложения по восстановлению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России и определение соответствия нагрузки требованиям Копенгагенской Министерской Декларации ХЕЛКОМ (2013)*» и «*Оценка диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро и разработка научно-обоснованных предложений по ее снижению*», выполненных в рамках Федеральной целевой программы «*Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012—2020 годах*».

С середины 90-х годов значительное внимание специалистов в области математического моделирования уделяется разработке и совершенствованию гидродинамического подхода к описанию течения и переноса примеси в речных руслах. Основным объектом изучения являлась р. Нева, связывающая Ладожское озеро и Невскую губу Финского залива. В практике Института использовались следующие математические модели, позволяющие решать разнообразные задачи, связанные с течениями и переносом примесей в р. Неве:

— *одномерная модель* (уравнения Сен-Венана), описывающая неустановившееся течение и перенос примеси в русле при условии осреднения характеристик потока по площади живого сечения [38], а также позволяющая проводить расчеты в разветвленной речной системе с учетом воздействия нагонных явлений;

— *двухмерная и трехмерная модели*, описывающие неустановившееся течение в русле реки, перенос растворимой примеси и взвешенных частиц и предна-

значенные для детального описания распространения загрязненных вод в русловом потоке, в том числе и в окрестностях водозаборов [39].

### Современное состояние моделирования в ИНОЗ РАН

Таким образом, в результате многолетних исследований в области моделирования сформирована и успешно используется детерминированно-стохастическая модельная система ИНОЗ РАН, ориентированная на количественную оценку процессов тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем», а также на прогнозирование последствий воздействия на водные экосистемы антропогенных и климатических факторов в условиях дефицита данных натурных наблюдений. Компоненты системы могут использоваться в любом сочетании в зависимости от условий решаемой задачи, что существенно расширяет возможности ее практического применения. На сегодняшний день в состав модельной системы входят следующие компоненты [40]:

- модель формирования стока на водосборе **ILHM** (27, 28, 31, 41, 42);
- модель выноса химических веществ с водосбора и формирования нагрузки на водный объект **ILLM** [31, 32, 43—45];
- математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле (1D, 2D, 3D) [31, 46];
- 1D модель теплового режима и перемешивания водоема **FLake** [48—52];
- 1D модель динамики неконсервативной примеси в водоеме **FLakeEco** [53];
- 2D модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме [31, 54];
- 3D модель тепло и массопереноса в водоеме — **МГВМ**, адаптированная к озерным условиям [18, 55, 56];
- стохастическая модель погоды **SWM** [31, 57].

Ниже представлены примеры использования различных компонентов разработанной модельной системы при решении задач, связанных с количественной оценкой и прогнозом тепло и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем».

Ладожское озеро площадью 17680 км<sup>2</sup>, с объемом водной массы 848 км<sup>3</sup> и суммарной площадью водосбора более 283 000 км<sup>2</sup> является крупнейшим пресноводным водоемом Европы. Водосбор Ладоги размещен в пределах России, Финляндии и Беларуси. На водосборе Ладоги расположены такие крупнейшие европейские озера, как Онежское, Сайма и Ильмень. Воды Ладожского озера практически полностью определяют сток р. Невы, который оказывает существенное воздействие на состояние и формирование вод Балтийского моря, расположенного у побережий трех стран Финского залива.

С использованием трехмерной модели гидродинамики внутреннего моря — **МГВМ**, адаптированной к использованию в озерных условиях [59], выполнены исследования термогидродинамики Ладожского и Онежского озер. В качестве исходной метеорологической информации для расчета современного среднего климатического состояния термогидродинамических процессов в озере использовались данные реанализа NCEP/NCAR [60]. В качестве сценария возможных климатических изменений был выбран MPI B2, разработанный в Институте

Макса Планка с использованием модели глобальной атмосферной циркуляции ЕСНАМ4/ОРУС3 [61]. Данный сценарий характеризуется следующими основными параметрами:

- 1) умеренный выброс парниковых газов в атмосферу;
- 2) основное потепление климата происходит в зимний период, что соответствует данным многолетних натуральных наблюдений, выполненным за последние 40—50 лет;
- 3) общие тенденции выбросов, которые обеспечиваются сценарием В2, также близки к тем, которые наблюдались в течение последних 40 лет;
- 4) температура воздуха в конце столетия может повыситься на величину до 5 °С.

Верификация модели выполнялась по данным натуральных наблюдений за распространением вод основных притоков по акватории озера и их влиянию на формирование пространственного распределения минерализации озерных вод (рис. 4) [55, 59]. Как показали численные эксперименты, модель достаточно хорошо

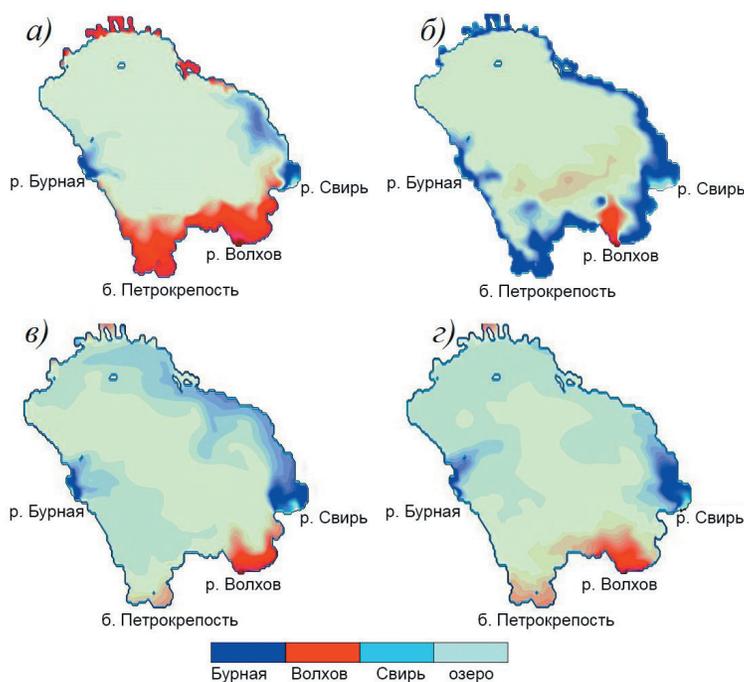


Рис. 4. Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского озера в различные сезоны «среднеклиматического» года по результатам моделирования: а) в зимний период; б) в конце ледостава; в) в летний период; з) в осенне-зимний период.

Fig. 4. Distribution of waters of the main tributaries over the water area of Lake Ladoga in different seasons of the “mid-climatic” year according to the modeling results:

- a) in winter; б) at the end of freeze-up; в) in summer; з) autumn-winter periods.

описывает главные особенности термогидродинамических процессов в озере — циркуляцию вод, положение и скорость продвижения фронта термобара.

Исследованы термический и ледовый режимы Ладожского и Онежского озер в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий (нормы для 1961—1990 гг.) для широты Ладоги, а также и при «возможных климатических изменениях на водосборе» в соответствии с климатическим сценарием МРІ В2. Численные эксперименты показали, что основное отличие при потеплении от среднеклиматического сценария начинается в первых числах ноября в южных районах озера и сказывается на скорости нарастания и таяния льда. При потеплении озеро способно полностью покрыться льдом, однако его малая толщина предопределяет ранние сроки таяния. Следует ожидать, что полное очищение озера ото льда, возможно, будет происходить на 2—3 недели раньше по сравнению со среднеклиматическим атмосферным воздействием. Раннее исчезновение ледяного покрова приведет к временному сдвигу в процессах, определяющих термический режим озера в весенне-летний период. Так, образование термобара начнется раньше на 2—3 недели, скорость его распространения по акватории озера будет выше. В результате весенне-летний термобар закончится в середине июня вместо среднеклиматической середины июля. Как следствие, летний прогрев основной водной массы начнется почти на месяц раньше, что не может не сказаться на ее температурном режиме. При потеплении практически вся акватория озера летом прогреется до 20 °С, чего не бывает при среднеклиматическом воздействии. При таком развитии событий следует ожидать, что возможные климатические изменения способны привести к существенному изменению в термогидродинамических процессах в озере и, как следствие, в функционировании водной экосистемы. Ниже приведены некоторые результаты численных экспериментов. На левых (а) панелях рисунков 5—7 представлены данные расчетов, полученные с использованием осредненных за период с 1949 по 2009 гг. метеоданных реанализа NCEP/NCAR, правых (б) — по климатическому сценарию МРІ В2. На рис. 5 проиллюстрировано начальное распределение первичной продукции (ПП) фитопланктона в озере, относящееся к 1 октября среднеклиматического года и к концу XXI в.

Наиболее продуктивными, как и следовало ожидать, являются южные мелководные районы. Здесь величины ПП колеблются в пределах от 50 до 70 гС/м<sup>2</sup>сут (рис. 6). Реакция экосистемы на возможные климатические изменения начинает проявляться уже в начале ноября, когда в южных районах образуется первый лед (рис. 7). Значения ПП в «сценарном» варианте для ноября месяца колеблются от 5 до 10 мгС/м<sup>2</sup>сут. Этот же эффект наблюдается и в середине марта. Несмотря на то, что в обоих случаях озеро практически полностью еще покрыто льдом, значения ПП из-за различий в толщине льда в среднеклиматическом варианте расчетов близки к нулю, а в «сценарном» варианте достигают 20—25 мгС/м<sup>2</sup>сут. В этом случае можно говорить о том, что возможные климатические изменения способны вызывать раннее подледное развитие водорослей. В июле, когда весенне-летний термобар заканчивается, продукционные процессы активизируются по всему озеру. В «среднеклиматическом» варианте расчетов значения ПП варьируют

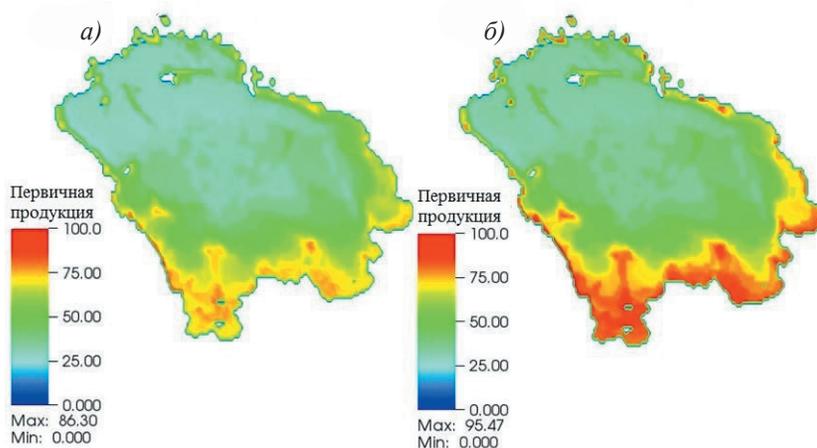


Рис. 5. Начальное распределение первичной продукции фитопланктона в Ладожском озере в октябре:

*a)* среднеклиматический год; *б)* климатический сценарий (потепление климата до 5°).

Fig. 5. The initial distribution of primary production of phytoplankton in Lake Ladoga in October:

*a)* average climatic year; *б)* climatic scenario (climate warming up to 5°).

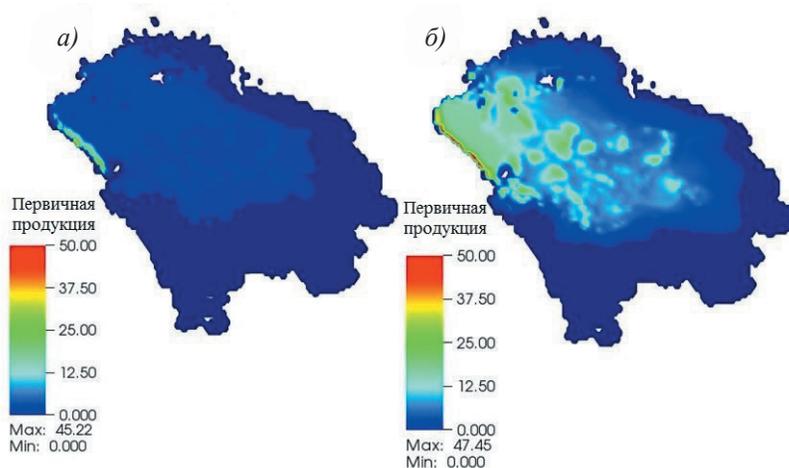


Рис. 6. Эффект раннего подледного развития фитопланктона в Ладожском озере, вызванного возможными изменениями климата:

*a)* среднеклиматический год; *б)* климатический сценарий.

Fig. 6. The effect of early under-ice development of phytoplankton in Lake Ladoga caused by possible climate changes:

*a)* mid-climatic year; *б)* climatic scenario.

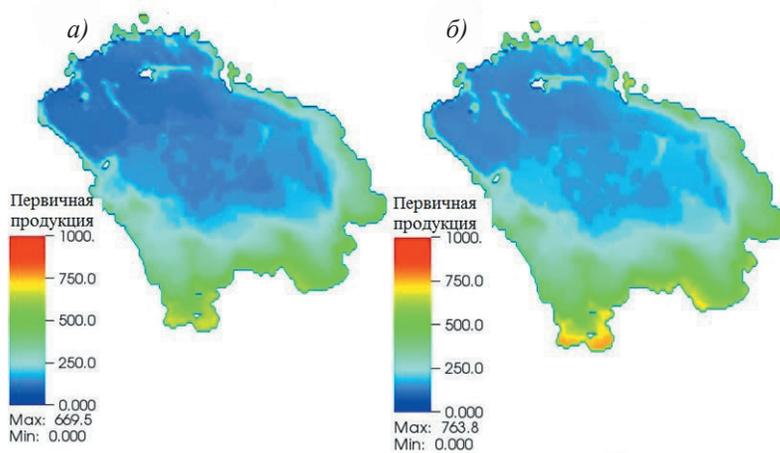


Рис. 7. Распределение первичной продукции фитопланктона по акватории Ладожского озера в середине июля:

а) среднеклиматический год; б) климатический сценарий.

Fig. 7. Distribution of primary production of phytoplankton in the aquatic area of Lake Ladoga in mid-July:

а) average climatic year; б) climatic scenario.

от 500 мгС/м<sup>2</sup>сут в бухте Петрокрепость до 150 мгС/м<sup>2</sup>сут в северо-западных районах, в «сценарном» варианте — от 700 до 200 мгС/м<sup>2</sup>сут соответственно (рис. 7).

В Онежском озере во все сезоны абсолютные значения ПП ниже по сравнению с Ладожским озером. Это объясняется тем, что температура воды в Онежском озере в периоды открытой воды ниже, чем в Ладожском. Фитопланктон Онежского озера из-за особенностей формирования цветности воды находится в состоянии «радиационного голода». Это означает, что приходящая солнечная радиация поглощается в основном частицами абиогенного происхождения в слое прозрачности. Таким образом, солнечная радиация выступает в роли лимитирующего фактора.

Концентрация взвешенных веществ является одним из принятых к мониторингу показателей качества воды практически во всех программах контроля по гидрологическим и гидрохимическим показателям многих стран [62]. «Взвешенные вещества (ВВ) являются одними из наиболее распространенных контролируемых и регламентируемых показателей качества воды» [63]. Тем не менее, наблюдения за стоком наносов на притоках Ладожского озера в рамках государственного мониторинга практически не проводились. Исключение составляют эпизодические непродолжительные измерения на гидрометрических створах на реках Олонка — г. Олонец (1953 и 1956 гг.) и Свирь — с. Мятусово (1945 и 1948 гг.).

Для количественной оценки поступления в озеро взвешенных наносов, которые являются сорбентами различных загрязняющих веществ и приводят к заилению южной мелководной акватории, были выполнены расчеты с использованием



Рис. 8. Расположение основных притоков Ладожского озера.

Fig. 8. Location of the main tributaries of Lake Ladoga.

математической модели движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в русле, входящей в состав модельной системы ИНОЗ РАН.

Схема расположения основных притоков Ладоги, для которых оценивались сток наносов и мутность воды, приведена на рис. 8. Их общая площадь водосборов составляет 248 232 км<sup>2</sup> или 88 % всей площади водосбора Ладожского озера.

Согласно результатам вычислений, приведенным в табл. 1, с основными притоками, т. е. с 88 % водосборной площади в Ладогу поступает около 380 тыс. т речных наносов в год. Если привести рассчитанное значение к общей площади водосбора, то получится, что за год в озеро поступает 432 тыс. т/год. Средний по водосбору годовой модуль стока наносов оценивается в 1,53 т/(км<sup>2</sup>×год).

Основной вклад в поступление наносов осуществляют водотоки с наибольшей водностью — Свирь, Вуокса и Волхов, на долю которых приходится 253 тыс. т/год или 59 % от общего количества наносов. Однако, на эти же водотоки приходится и наименьший годовой модуль стока наносов, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов.

Таблица 1

Параметры распределения среднесуточного расхода воды  $Q_{cp}$ , м<sup>3</sup>/с, годового стока наносов  $R_{cp}$ , т/год и мутности воды  $S_{cp}$ , мг/л для гидрометрических (г/м) створов и годового стока наносов  $R_{устье}$  для устьевых участков притоков

Parameters of distribution of average daily water discharge  $Q_{av}$ , м<sup>3</sup>/s, annual sediment runoff  $R_{av}$ , t/year and water turbidity  $S_{av}$ , mg/l for gauging sections and annual sediment runoff  $R_{mouth}$  for estuarine sections of tributaries

| Г/м створы основных 7 притоков (рек) Ладоги | $Q_{cp}$ , м <sup>3</sup> /с | $C_v$ | $C_s$ | $C_s/C_v$ | $R_{cp}$ , 10 <sup>3</sup> т/год | $S_{cp}^*$ , г/м <sup>3</sup> | $S_{медиана}^*$ , г/м <sup>3</sup> | $\sigma_{S^*}$ , г/м <sup>3</sup> | $R_{устье}^*$ , 10 <sup>3</sup> т/год | $M$ , т/(км <sup>2</sup> ×год) |
|---|------------------------------|-------|-------|-----------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Вуокса — X ГЭС                              | 545                          | 0,25  | 1,79  | 7,16      | 72,80                            | 3,73<br>(2,9)                 | 1,67                               | 2,90                              | 81,10                                 | 1,18                           |
| Янисйоки — п. Хямекоски                     | 46,6                         | 0,58  | 1,65  | 2,83      | 17,30                            | 8,4<br>(2,3)                  | 6,24                               | 23,70                             | 18,30                                 | 5,01                           |
| Видлица — с. Б. Горы                        | 13,7                         | 0,74  | 2,46  | 3,33      | 8,11                             | 11,2<br>(3,3)                 | 9,50                               | 12,90                             | 10,95                                 | 11,21                          |
| Олонка — г. Оло-нец                         | 33,5                         | 1,25  | 2,66  | 2,13      | 27,70                            | 11,5<br>(9,5)                 | 5,26                               | 13,30                             | 34,30                                 | 16,20                          |
| Свирь — XII ГЭС                             | 538                          | 0,35  | -0,63 | -1,80     | 77,60                            | 4,3<br>(4,3)                  | 4,10                               | 1,07                              | 97,60                                 | 1,16                           |
| Сясь — д. Яхново                            | 48,8                         | 1,57  | 4,53  | 2,89      | 54,30                            | 12,0<br>(6,6)                 | 4,61                               | 16,00                             | 63,90                                 | 10,30                          |
| Волхов — VI ГЭС                             | 434                          | 0,76  | 1,15  | 1,51      | 73,70                            | 4,2<br>(10,8)                 | 4,90                               | 0,65                              | 74,10                                 | 0,92                           |

\* В скобках приведены осредненные измеренные значения мутности воды по данным наблюдений ИНОЗ РАН в период 2011—2019 гг.

Анализ результатов расчета годового модуля стока наносов показал хорошее соответствие полученных значений условиям формирования выноса твердого вещества на водосборе характеристикам слагающих его почво-грунтов. Восточная часть водосбора Ладожского озера (бассейны рек Свирь, Олонка и Видлица) расположена на южном склоне Балтийского щита, рельеф которого характеризуется чередованием скалистых гряд и межрядовых понижений, заполненных глинами, суглинками и супесями [64]. Благоприятные для размыва почвы этой территории определяют сравнительно высокие значения годового модуля стока наносов. Южная часть водосбора (бассейны рек Волхов и Сясь) расположена на Русской плите. Из-за сельскохозяйственного освоения земель и легкоразмываемых почвообразующих грунтов значения годового модуля стока наносов рек также достаточно высоки для северо-западного региона и для р. Сясь достигают 10 т/(км<sup>2</sup>×год).

Чудско-Псковское озеро — четвертый по величине пресноводный водоем Европы и крупнейший Европейский трансграничный водоем, расположенный на границе между Россией и Эстонией [28, 65, 66]. Площадь озера составляет 3555 км<sup>2</sup>, водосбора — 44000 км<sup>2</sup>, из которой 26 % находится в Эстонии, 67 — в России и 7 — в Латвии. Наиболее крупный приток — р. Великая с площадью водосбора 25200 км<sup>2</sup> или 58 % общей площади водосбора. В настоящее время особое беспокойство вызывает процесс эвтрофирования водоема, сопровождающийся «цветением» воды и ухудшением ее качества. Важнейшим фактором, определяющим интенсивность эвтрофирования Чудско-Псковского озера, является обеспеченность водной массы биогенными элементами, прежде всего, фосфором.

Выполнены исследования по оценке биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро с использованием методов моделирования. Задействована система моделей **SWM + ILMH + ILLM**. Итогом моделирования в данном случае является набор кривых распределения и их параметров (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения) для суточных слоев осадков, среднемесячных слоев стока и среднегодового выноса биогенных веществ с российской части водосбора Чудско-Псковского озера в условиях современного климата. Результаты расчетов стока и выноса биогенных веществ с водосбора представлены в табл. 2. Здесь приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока с водосбора, средние значения нагрузки общим фосфором и общим азотом (400 тР/год, 8549 тN/год) и ее природной составляющей (269 тР/год, 3573 тN/год) на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора. Представлены также их средние квадратичные отклонения, а также значения, рассчитанные для многоводных (обеспеченностью 1 и 5 %) и маловодных (обеспеченностью 95 и 99 %) лет. Нетрудно видеть, что изменчивость стока в зависимости от метеорологических параметров более существенна по сравнению с изменчивостью биогенной нагрузки. Сказанное объясняется тем, что не все источники биогенной нагрузки напрямую зависят от водности года.

Таблица 2

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока  $H$ , рассредоточенной и природной составляющих биогенной нагрузки ( $LP_{np}$ ,  $LN_{np}$  и  $LP_{nat}$ ,  $LN_{nat}$ ) на Чудско-Псковское озеро с российской части водосбора (Среднее —  $X_{cp}$ , среднее квадратичное отклонение —  $\sigma$ , значения обеспеченностью 1, 5, 25, 75, 95 и 99 % —  $X_{\%}$ )

Distribution parameters of the calculated annual runoff layers  $H$ , non-point and natural components of the nutrient load ( $LP_{np}$ ,  $LN_{np}$  and  $LP_{nat}$ ,  $LN_{nat}$ ) on Lake Chudsko-Pskovskoye from the Russian part of the catchment (Mean —  $X_{av}$ , standard deviation —  $\sigma$ , abundance values 1, 5, 25, 75, 95 and 99 % —  $X_{\%}$ )

|                    | $X_{cp}$ | $\sigma$ | $X_{1\%}$ | $X_{5\%}$ | $X_{25\%}$ | $X_{75\%}$ | $X_{95\%}$ | $X_{99\%}$ |
|--------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| $H$ , мм/год       | 242      | 57,00    | 375       | 336       | 281        | 204        | 148        | 110        |
| $LP_{np}$ , т/год  | 400      | 81,52    | 590       | 535       | 455        | 345        | 265        | 210        |
| $LP_{nat}$ , т/год | 269      | 50,67    | 387       | 353       | 303        | 235        | 185        | 151        |
| $LN_{np}$ , т/год  | 8549     | 2013,00  | 13239     | 11870     | 9898       | 7200       | 5228       | 3859       |
| $LN_{nat}$ , т/год | 3573     | 841,00   | 5533      | 4961      | 4136       | 3010       | 2185       | 1613       |

Проведен расчет по оценке перспектив снижения фосфорной нагрузки за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в сельскохозяйственное производство на российской части водосбора Чудско-Псковского озера. Нагрузка, сформированная на полях сельскохозяйственных предприятий, оценивалась по методу, предложенному специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [67]. Расчеты выполнялись, исходя из содержания общего фосфора в пахотном слое почвы, доз внесения минеральных и органических удобрений на поля сельхозпредприятия и их усвоения сельхозкультурами, а также происхождения и механического состава почв. Учитывались современные практикуемые в Псковской области технологии содержания животных и системы удаления навоза. Результатом расчетов явилась прогностическая оценка снижения фосфорной нагрузки на 10,7 т/год за счет внедрения НДТ.

Как следует из результатов 3D моделирования, формирование полей течений в Чудско-Псковской озерной системе характерно для больших мелководных озер умеренных широт (рис. 9 а). В подледный период течения в обоих озерах в основном носят бароклинный характер, обусловленный неравномерным распределением плотности воды по пространству. Максимальные скорости невелики — в основном до 1,5—2 см/с в наиболее мелководных прибрежных районах. С окончанием периода ледостава в апреле—мае основным влияющим на течения фактором становится ветер. В озерах (особенно в Чудском) наблюдается частая смена антициклонической циркуляции на циклоническую и наоборот. Скорости при этом возрастают до 5—6 см/с. Характер течений и их скорости остаются таковыми в течение всего периода открытой воды до начала ледостава, когда основным фактором, определяющим циркуляцию водных масс, снова становится бароклинность, вызванная неравномерным по пространству теплообменом между водной массой и донными отложениями. Пространственное распределение фосфора в Псковском озере определяется двумя процессами — циркуляцией водной массы в Чудском озере и «разбавляющим» влиянием стока р. Великой (рис. 9 б). Эти процессы прослеживаются в течение всего года. Первый процесс проявляется в том, что более холодная, а, следовательно, более плотная вода Чудского озера блокирует водообмен с Псковским озером с севера. Кроме того, концентрация фосфора в Чудском озере меньше, чем в Псковском, поэтому в зоне смешения двух водных масс на границе озер наблюдается уменьшение концентрации фосфора в Псковской водной массе. Второй процесс проявляется в том, что концентрация фосфора в воде р. Великой также меньше, чем в центральной части Псковского озера. Поэтому в течение всего года в юго-восточной части Псковского озера наблюдаются минимальные концентрации фосфора. В таких условиях максимальные концентрации фосфора в Псковском озере сосредоточены в центральной и особенно в западной части акватории. Пространственное распределение фосфора в Чудском озере носит выраженный зональный характер. Максимальные значения наблюдаются в южной части озера в зоне смешения с водной массой Псковского озера, минимальные — в северной.

В период ледостава взмучивание донных отложений практически отсутствует. Это объясняется тем, что в отсутствие волнения напряжение трения

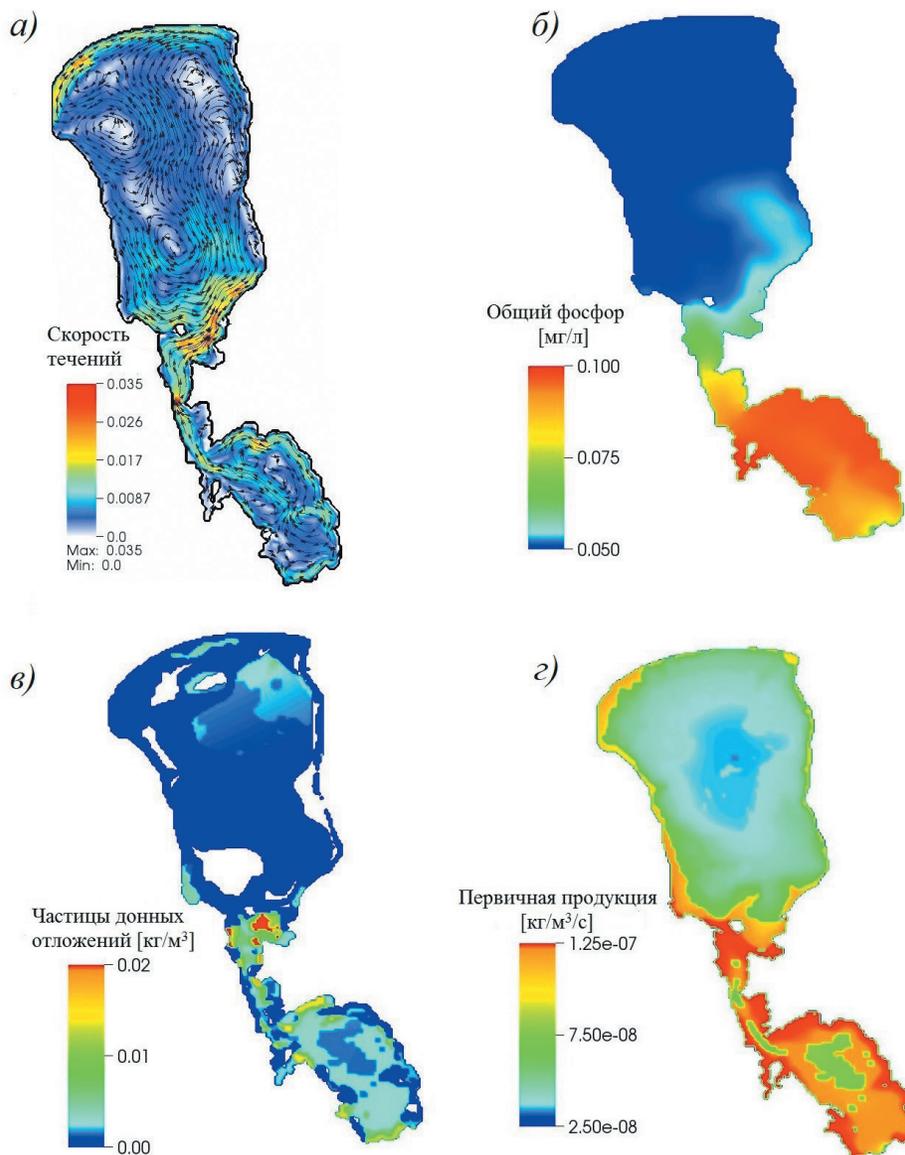


Рис. 9. Результаты 3D моделирования Чудско-Псковской озерной системы:

- а) поле скоростей течений в середине апреля;
- б) пространственное распределение концентрации общего фосфора в середине июля;
- в) пространственное распределение концентрации частиц донных отложений в середине июля;
- з) пространственное распределение первичной продукции фитопланктона в середине июля.

Fig. 9. Results of 3D modeling of Lake Chudsko-Pskovskoye:

- a) field of current velocities in mid-April; б) spatial distribution of total phosphorus concentration in mid-July; в) spatial distribution of the concentration of bottom sediment particles in mid-July;
- z) spatial distribution of the primary production of phytoplankton in mid-July.

в придонной области, создаваемое бароклинными течениями, не достигает критического значения, необходимого для отрыва частиц донных отложений от поверхности. В период открытой воды процесс ресуспензии верхнего слоя донных отложений протекает активно, обеспечивая поступление биогенных веществ во всех формах в придонную область, откуда они переносятся в водную массу посредством турбулентных вихрей и течений. Взмучивание активно начинает развиваться в мае в Псковском озере, тогда как водная масса Чудского озера в это время еще устойчиво стратифицирована после схода ледового покрова. Наиболее активно ресуспензия донных осадков протекает в летний период, когда оба озера достаточно часто перемешиваются до дна (рис. 9 в). В период осеннего охлаждения процесс ресуспензии теряет свою интенсивность. Особенно это заметно в Чудском озере. С установлением в первой половине ноября ледового покрова взмучивание донных осадков в Псковском озере прекращается. В Чудском озере ресуспензия также протекает до начала периода ледостава.

Процессы первичного продуцирования в Чудско-Псковском озере так же, как и ресуспензия, лимитируются продолжительностью ледостава. Лимитирование ПП обусловлено недостатком фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), которая полностью либо отражается, либо поглощается снежно-ледовым покровом в зимний период. Сразу после вскрытия Псковского озера резко возрастает поток ФАР на поверхность озера. В условиях отсутствия биогенного лимитирования в нем начинает активно развиваться фитопланктон. В Чудском озере процессы ПП протекают с гораздо меньшей интенсивностью, а на севере озера интенсивность фотосинтеза близка к нулю. В летние месяцы свой вклад в интенсификацию ПП вносит прогрев водных масс обоих озер. Фотосинтез водорослей возрастает практически на порядок величины по сравнению с весенним периодом (рис. 9 з). Характер пространственного распределения ПП меняется. К максимальным значениям фотосинтеза в Псковском озере добавляются зоны с фотосинтезом такой же интенсивности в прибрежных районах Чудского озера. До конца лета характер пространственного распределения ПП не меняется. В осенний период в связи с естественным уменьшением прихода ФАР интенсивность фотосинтеза закономерно снижается и практически сводится к нулевым значениям к началу периода ледостава.

Выполнены расчеты сезонной динамики биогенной нагрузки как на всю Чудско-Псковскую озерную систему, так и на Чудское и Псковское озера в отдельности. В расчетах использовались данные об основных потоках вещества в пограничной зоне осадков—вода, оцененных на основе данных натурных наблюдений в 2013 и 2017 гг. Алгоритм расчета состоял из нескольких этапов:

1. В озерах определялись площади со схожими типами донных отложений.
2. Для каждого типа донных отложений оценивались (по справочной литературе) физико-химические свойства, включая плотность, когезию и критические значения напряжения трения отрыва частиц от дна.
3. Для каждого типа донных отложений по модели рассчитывались в виде потока значения ресуспензии, для чего в модели предусмотрена соответствующая процедура.

4. По данным натурных наблюдений определялась суммарная доля биогенных веществ во взвеси.

5. На последнем этапе путем интегрирования по времени и площади рассчитывались абсолютные значения внутренней биогенной нагрузки.

Результаты расчетов внутренней фосфорной нагрузки представлены на рис. 10. Характер временной динамики нагрузки свидетельствует о том, что гидродинамические процессы являются важнейшим фактором формирования внутренней биогенной нагрузки на Чудско-Псковское озеро. Биогенная нагрузка минимальна в зимний период, когда гидродинамические процессы протекают подо льдом с минимальной интенсивностью, в период открытой воды, когда ветровое

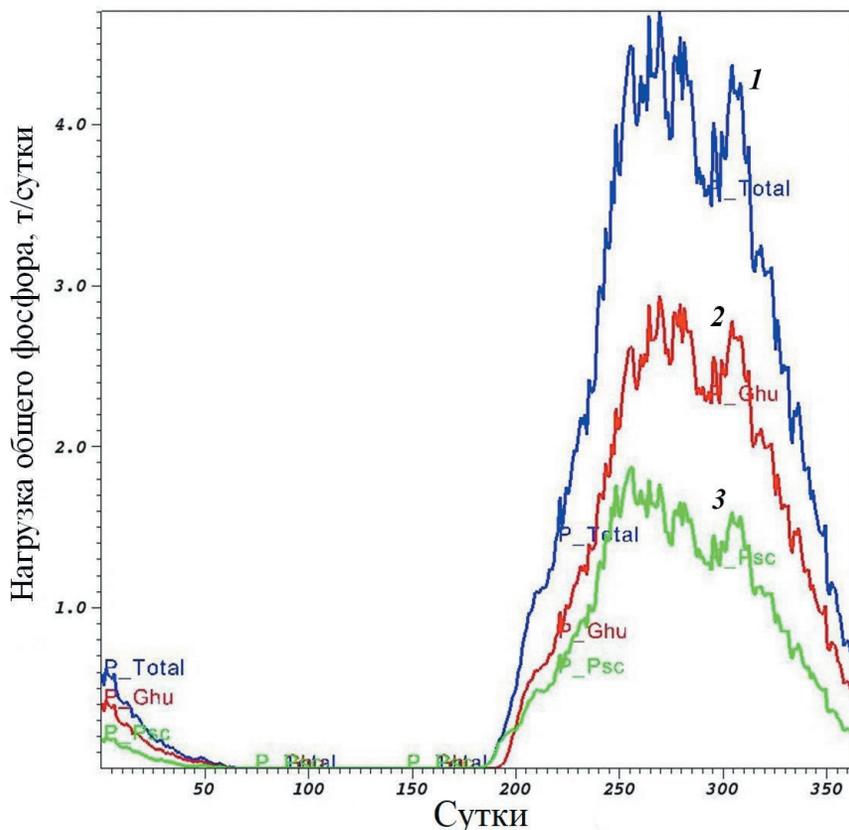


Рис. 10. Сезонная динамика внутренней фосфорной нагрузки на Чудско-Псковское озеро в течение среднеклиматического года (1), Чудское озеро (2) и Псковское озеро (3).

Примечание: начальная дата по оси X — 01 октября.

Fig. 10. Seasonal dynamics of the internal phosphorus load on Lake Chudsko-Pskovskoye during a mid-climatic year (1), Lake Chudskoye (2) and Lake Pskovskoye (3).

Note: the start date on the X-axis is 01 October.

и волновое воздействие на поверхность донных отложений резко возрастает, внутренняя биогенная нагрузка принимает свои максимальные значения. В табл. 3 приведены полученные в ходе расчетов значения годовой суммарной фосфорной и азотной нагрузок на Чудско-Псковскую озерную систему. Там же для сравнения помещены оценки биогенной нагрузки, полученные по данным натурных наблюдений 2017 г.

Таблица 3

Расчетные значения внутренней биогенной нагрузки  
на Чудско-Псковскую озерную систему  
Estimated values of the internal nutrient load on Lake Chudsko-Pskovskoye

|                                 | Фосфор<br>(т/год) | Азот<br>(т/год) | Данные натурных наблюдений |              |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------------|--------------|
|                                 |                   |                 | Фосфор (т/год)             | Азот (т/год) |
| Чудское озеро                   | 550               | 5843            | 695                        | 6763         |
| Псковское озеро                 | 375               | 3563            | 377                        | 3027         |
| Суммарная нагрузка              | 925               | 9406            | 1072                       | 9790         |
| Внешняя нагрузка, 2001—2015 гг. | 641               | 16779           |                            |              |

Как видно из табл. 3, расчетные количественные оценки внутренней фосфорной и азотной биогенной нагрузки достаточно близки к оценкам, полученным по данным прямых натурных измерений. При этом внутренняя нагрузка по фосфору значительно превосходит внешнюю нагрузку. По азоту внутренняя нагрузка составляет более 50 % от внешней нагрузки.

Для оценки влияния изменений внешней нагрузки на экологическое состояние озера выполнены численные эксперименты по возможному снижению содержания биогенных элементов в стоке основного притока озера — р. Великой. Из результатов расчетов следует, что снижение концентрации общих форм фосфора и азота в стоке р. Великой на 10 % по сравнению с современными значениями способно привести к снижению суммарной (внутренней + внешней) нагрузки на Чудско-Псковское озеро на 1,5 % для фосфорной нагрузки и на 0,95 % для азотной по отношению к рассчитанным среднееголетним значениям. Тем не менее, снижение внешней биогенной нагрузки является безальтернативным способом улучшения экологического состояния озера, однако быстрого деэвтрофирования ожидать не стоит, поскольку восстановление соответствия трофического уровня донных отложений трофическому уровню водной массы происходит со значительным временным запаздыванием.

Исследования приоритетного проекта «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и приоритетным проектам, протокол от 30.08.2017 № 9) были направлены на разработку и реализацию мероприятий, одной из целей которых является сохранение и улучшение качества воды и гидроэкологического состояния водохранилищ Волжско-Камского каскада. В рамках выполнения проекта ИНОЗ РАН выполнил оценку биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище, сформированной на левобережной и правобережной частях водосбора в современных

условиях [68]. Рассчитанные с использованием модели **ILHM + ILLM** значения суммарной нагрузки на водохранилище составили 1637 тР/год и 36531 тN/год для условий средней водности. При этом вклад левобережной части — около 69 % от значения суммарной нагрузки (таблицы 4 и 5).

Таблица 4

Средняя многолетняя биогенная нагрузка на Куйбышевское водохранилище с правобережной части водосбора (площадь — 30878 км<sup>2</sup>, средний слой стока 74 мм/год)

Average long-term nutrient load on the Kuibyshev reservoir from the right-bank part of the catchment (area — 30878 km<sup>2</sup>, average runoff layer 74 mm/year)

|   | Фосфор | Азот    |
|---|--------|---------|
| Нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)                                | 515,3  | 11141,4 |
| Природная (фоновая) составляющая (т/год)                                      | 29,4   | 685,0   |
| Диффузная (антропогенная) составляющая, включая атмосферные выпадения (т/год) | 484,4  | 10427,4 |
| Модуль выноса (кг/км <sup>2</sup> год)  | 16,7   | 360,8   |

Таблица 5

Средняя многолетняя биогенная нагрузка на Куйбышевское водохранилище с левобережной части водосбора (площадь — 60207 км<sup>2</sup>, средний слой стока 125 мм/год)

Average long-term nutrient load on the Kuibyshev reservoir from the left-bank part of the drainage basin (area — 60207 km<sup>2</sup>, average runoff layer 125 mm/year)

|   | Фосфор | Азот    |
|---|--------|---------|
| Нагрузка на Куйбышевское водохранилище (т/год)                                | 1121,8 | 25389,7 |
| Природная (фоновая) составляющая (т/год)                                      | 104,0  | 2732,9  |
| Диффузная (антропогенная) составляющая, включая атмосферные выпадения (т/год) | 984,0  | 21243,8 |
| Модуль выноса (кг/км <sup>2</sup> год)  | 18,6   | 421,7   |

Проведено выделение фоновой (природной) и диффузной (антропогенной) составляющих нагрузки. Вклад диффузной составляющей в общую биогенную нагрузку на водохранилище со стороны водосбора весьма велик (84—94 % от значения суммарной нагрузки). В ходе оценки сельскохозяйственной нагрузки на водосбор показано, что внедрение в сельскохозяйственную практику наилучших доступных технологий (НДТ) не приведет к существенному снижению биогенной нагрузки на водохранилище. Причиной может служить тот факт, что на большей части изучаемой территории дозы внесения питательных веществ с органическими и минеральными удобрениями в последние годы ниже среднего выноса азота и фосфора с урожаем.

На рис. 11 представлена блок-схема 3D модели, которая использовалась для расчетов гидрофизических и химико-биологических параметров Куйбышевского водохранилища [56, 69].

В качестве исходной метеорологической информации для расчетов по модели использовались данные реанализа NCEP/NCAR. Показано, что модель позволяет

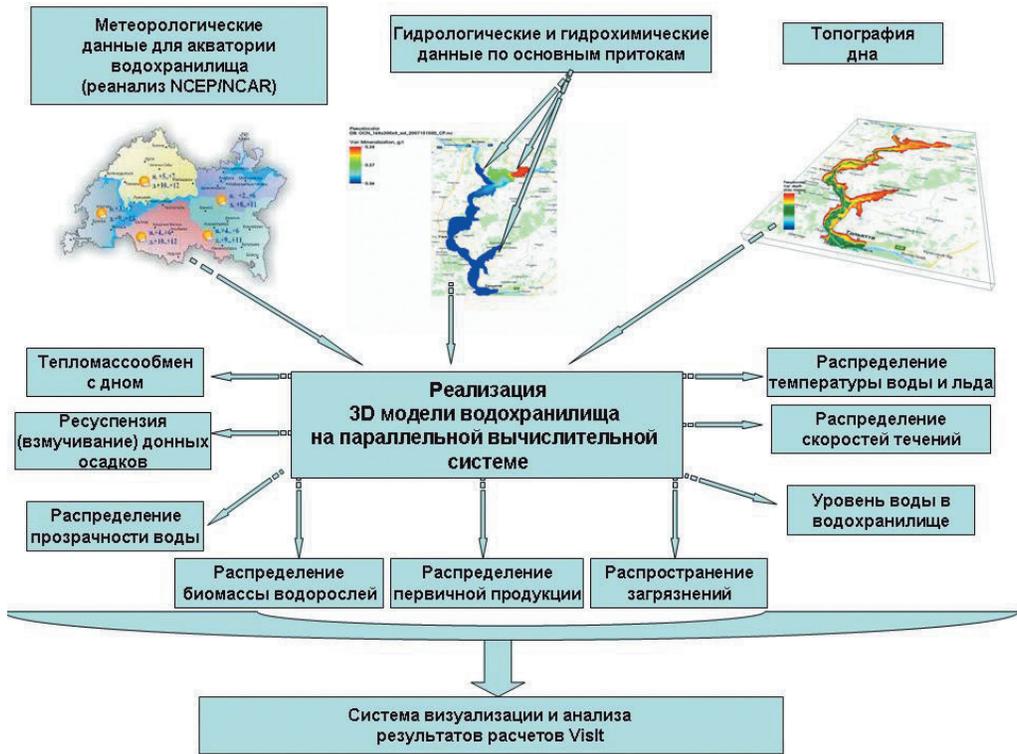


Рис. 11. Блок-схема 3D модели экосистемы Куйбышевского водохранилища.

Fig. 11. Block diagram of a 3D model of the ecosystem of the Kuibyshev reservoir.

воспроизводить пространственно-временную неоднородность распределения гидрофизических и химико-биологических параметров в Куйбышевском водохранилище. В частности, результаты расчетов позволили сделать вывод о том, что во время теплого периода на акватории формируются максимальные значения биомассы водорослей в мелководных хорошо прогретых плесах водохранилища. Так как Куйбышевское водохранилище является эвтрофным водоемом, то при отсутствии лимитирования развития фитопланктона биогенными элементами особое влияние оказывают другие факторы, включая температуру воды. Особенно это относится к Черемшанскому заливу, который считается наиболее продуктивным районом водохранилища (рис. 12)

Одной из целей Российско-Финляндского проекта SEVIRA является оценка стока и выноса биогенных элементов с водосборов малых трансграничных рек, формирующих биогенную нагрузку на Финский залив Балтийского моря, а также прогноз возможных изменений гидрологического режима рек и нагрузки на Балтику в результате возможных климатических изменений и антропогенных воздействий. Один из объектов исследования — р. Rakkolanjoki / Селезневка с площадью водосбора 621,2 км<sup>2</sup> (рис. 13 а).



Рис. 12. Пространственное распределение общей биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в середине лета.

Fig. 12. Spatial distribution of the total phytoplankton biomass in the Kuibyshev reservoir in mid-summer.

Результаты расчетов по модели **ПЛМ+ПЛМ** (рис. 13 б) показали, что реализация в трансграничном регионе экологически благополучного сценария выброса в атмосферу парниковых газов RCP2.6 может привести в 2100 г. к снижению стока с изучаемого водосбора на 4,47 % по отношению к периоду 2006—2016 гг. и соответствующему снижению биогенной нагрузки на Выборгский залив Балтийского моря со стороны р. Селезневки на 5,19 % по фосфору и 5,06 % по азоту. Максимальный выброс парниковых газов в соответствии со сценарием RCP8.5 в перспективе вызовет возрастание стока до 24,1 % и выноса фосфора и азота на 28,1 и 26,1 % соответственно. Полученные прогнозные оценки предоставлены администрациям населенных пунктов, расположенных как на финской, так и на российской частях водосбора р. Rakkolanjoki / Селезневки.

Международный проект **EnvitOX** рассматривает риски, связанные с возможным попаданием токсичных веществ в водозаборы Санкт-Петербурга, расположенные в р. Неве, а затем в Невскую губу Финского залива, фактически являющуюся пресноводным водоемом. Одним из потенциальных источников загрязнения является полигон хранения высокотоксичных отходов I—V классов опасности

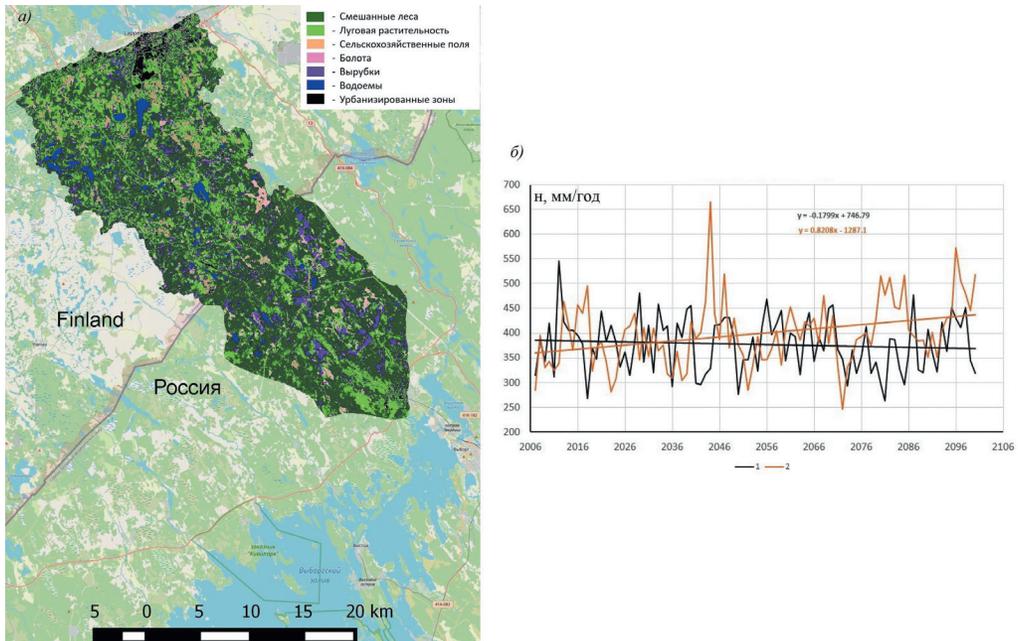


Рис. 13. Схема водосбора реки Rakkolanjoki / Селезневки площадью 621,2 км<sup>2</sup> (а) и результаты расчета стока, мм/год (б) в соответствии со сценарием RCP2.6 (1) и (2).

Fig. 13. Scheme of the catchment area of the Rakkolanjoki/Seleznevka River with an area of 621.2 km<sup>2</sup> (a) and the results of calculating the runoff, mm/year (b) in accordance with the RCP2.6 scenarios (1) and (2).

«Красный Бор», расположенный в 30 км от Петербурга и в 15 км от устья р. Ижоры, через которую возможны поступления аварийного сброса с полигона. Это единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится около 2 млн т токсичных отходов, которые свозились с 1969 г. с территории всей России и даже из Прибалтики. При возникновении аварийной ситуации на полигоне токсичные стоки могут попасть в р. Ижора, а затем в Неву в 7 км выше водозаборов Санкт-Петербурга (рис. 14).

Расчеты проводились для трех наиболее вероятных сценариев развития аварийной ситуации на полигоне, которые были определены на основе многолетних натуральных исследований на самом полигоне и окружающей его территории:

— *Сценарий 1.* Перелив содержимого карт-хранилищ токсичных отходов через верхнюю кромку обваловки вследствие интенсивных осадков, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. Превышение уровня содержимого над обваловкой возможно в открытых картах полигона. Объем токсикантов, который может поступить из поверхностного слоя содержимого карт в обводной или внутренний дренажный каналы при теоретически возможном превышении уровня на 0,10 м, составит 794 м<sup>3</sup> за 96 ч.

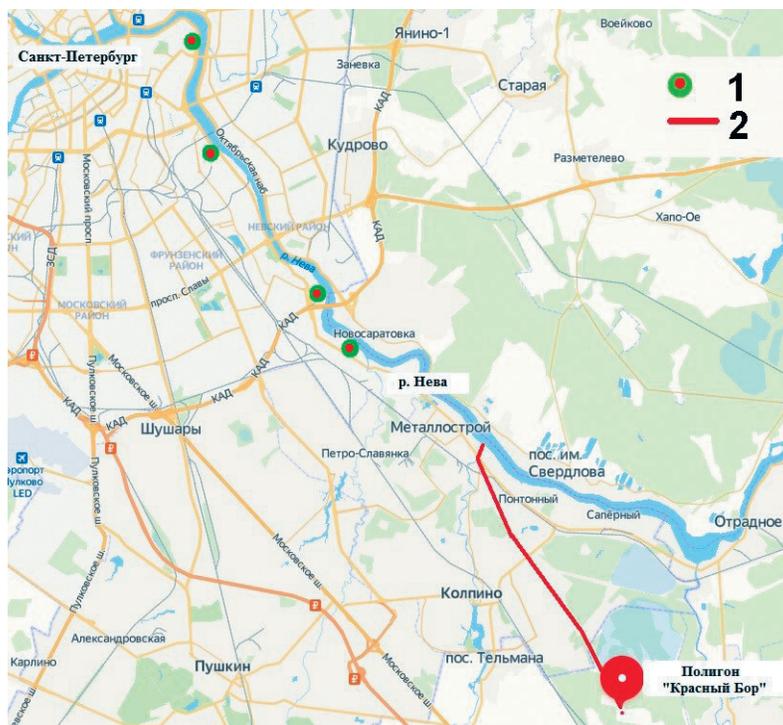


Рис. 14. Схема расположения полигона «Красный Бор»:

- 1 — пункты водозабора Санкт-Петербурга;  
 2 — маршрут распространения возможного аварийного сброса до русла Невы.

Fig. 14. Layout of the Krasny Bor landfill:

- 1 — water intake points in St. Petersburg,  
 2 — the route of distribution of a possible emergency discharge to the Neva river bed.

— *Сценарий 2.* Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие интенсивных осадков в весенний период, отдельно или в совокупности с повышенным снегозапасом на поверхности карт. В данном сценарии предполагается, что разрушение обваловки может быть только в условиях перелива. Глубина разрушения обваловки является параметром расчета. Время действия фактора риска — до 100 ч. Остальные исходные условия соответствуют предыдущему сценарию. Суммарный сброс —  $7940 \text{ м}^3$  за 100 ч.

— *Сценарий 3.* Разрушение обваловки карт-хранилищ токсичных отходов вследствие возникновения чрезвычайной ситуации (теракт, взрыв, цунами и пр.) вплоть до полного разрушения обваловки до уровня поверхности почвы на рассматриваемых картах. Остальные исходные условия соответствуют предыдущим сценариям. Суммарный сброс —  $176985 \text{ м}^3$  за 100 ч.

На рис. 15 приведены результаты расчетов степени разбавления загрязняющих веществ, поступивших в гидрографическую сеть водосбора Невы в соответствии

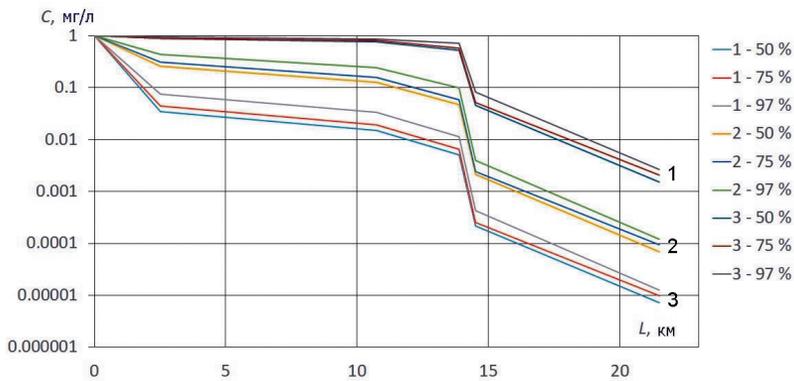


Рис. 15. Результаты расчетов степени разбавления загрязняющих веществ на участках трассы возможного распространения аварийного сброса по сценариям 1, 2 и 3 до ближайшего городского водозабора при водности 50, 75 и 97 % обеспеченности.

Fig. 15. The results of calculations of the degree of dilution of pollutants in the sections of the route of possible distribution of emergency discharges according to scenarios 1, 2 and 3 to the nearest municipal water intake at water availability of 50, 75 and 97 % of availability.

с приведенными сценариями аварийного сброса с полигона, для магистрального канала, ручья Большой Ижорец, рек Большая Ижорка, Ижора и затем до ближайшего городского водозабора Северной водопроводной станции (СВС) на р. Неве при расходах воды разной обеспеченности. В качестве исходной концентрации сброса была принята единичная концентрация вещества. Для русла Невы, кроме распространения растворенной примеси, выполнялся расчет транспорта взвешенных частиц, поступивших со стоком Ижоры и являющихся потенциальным носителем сорбированных на них токсикантов. Характерной особенностью процесса переноса взвешенных и растворенных примесей основным течением Невы является то, что воды притока прижимаются к берегу и распространяются вдоль него при минимальном перемешивании с водными массами основного потока.

Показано, что наиболее неблагоприятная ситуация с разбавлением наблюдается при реализации третьего сценария возможного аварийного сброса с полигона, возникшего в результате полного разрушения обваловки карт-хранилищ токсичных отходов. Снижение водности также негативно сказывается на степени разбавления. Результаты расчетов, представленных на рис. 15, могут быть пересчитаны в любые реальные значения концентрации, так как представлены в долях единицы. Взвешенные частицы, попадающие в русло Невы со стоком Ижоры, не представляют непосредственной угрозы для водозаборов, так как до них не доходят.

В условиях средней водности аварийный сброс с полигона достигнет ближайшего городского водозабора примерно через 18 ч. Снижение водности приводит к возрастанию времени добегающего. Таким образом, имеется определенный запас времени для принятия необходимых мер по перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети или защите водозабора. Кроме того, чтобы избежать

попадания загрязняющих веществ в водозаборы следует располагать их за пределами зоны вдольберегового распространения вод притоков.

### **Заключение**

В соответствии с Водным Кодексом РФ (от 03.06.2006 № 74-ФЗ, ред. от 24.04.2020 с изм. и доп. 14.06.2020) и Положением об осуществлении государственного мониторинга водных объектов (постановление Правительства РФ № 219 от 10.04.2007) мониторинг представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния водных объектов, находящихся в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, физических и юридических лиц. Широкие возможности развития прогностической части государственного мониторинга крупных водоемов демонстрируются изложенными в настоящей работе результатами создания и практического применения методов математического моделирования [70]. По мнению авторов, в ближайшей перспективе следует организовать двухкомпонентную систему государственного мониторинга крупнейших уникальных водоемов Северо-Запада России, в том числе Ладожского, Онежского, Чудско-Псковского озер, в котором целесообразно иметь две части: базовую и индивидуальную [71, 72]. Цель базовой части государственного мониторинга крупнейших водоемов должна состоять в том, чтобы с помощью получаемых данных фиксировать основные процессы внутри водоема и их изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Базовая часть мониторинга должна обеспечить сопоставимость и преемственность будущих данных мониторинга с имеющимися материалами наблюдений за прошлые годы. Индивидуальная часть государственного мониторинга должна быть ориентирована, прежде всего, на решение задач, связанных с обеспечением безопасного водоснабжения жителей. Именно в этой части мониторинга методам математического моделирования должна быть отведена ведущая роль выполнения научно-обоснованных оценок качества и количества водных ресурсов, прогноза их возможных изменений под воздействием климатических факторов и антропогенного воздействия.

### ***Благодарности***

Работа выполнена при финансировании за счет средств федерального бюджета по теме № 0154-2019-0001 (№ госрегистрации АААА-А19-119031890106-5) «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

### ***Acknowledgments***

The work was carried out with funding from the federal budget on theme № 0154-2019-0001 “Comprehensive assessment of the dynamics of the ecosystems of Lake Ladoga and water bodies of its basin under the influence of natural and anthropogenic factors.”

### Список литературы

1. Крейман К.Д. Закон сопротивления для ветрового дрейфа при наличии волн // Доклады Академии наук. 1990. Т. 310, № 2. С. 316—319.
2. Крейман К.Д. Лабораторное моделирование турбулентного вовлечения в кольцевом бассейне с обдувом водной поверхности // Доклады Академии наук. 1988. Т. 303, № 2. С. 315—319.
3. Самарский А.А. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент // Коммунист. 1983. № 18. С. 31—42.
4. Румянцев В.А., Бовыкин И.В. Пространственно-временные закономерности колебаний стока рек Евразии. Л.: Наука, 1985. 148 с.
5. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов // СПб.: Наука, 2008. 152 с.
6. Румянцев В.А., Бовыкин И.В. Математико-статистические основы совместного анализа временных гидрологических рядов. СПб.: Наука, 2009. 86 с.
7. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А., Григорьев А.С. Стохастические модели влияния климата на гидрологию озер. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2001. 156 с.
8. Румянцев В.А., Разумов Е.В., Зилитинкевич С.С. Параметризованная модель сезонных изменений температуры и условий перемешивания в озере (с приложением к проблеме озера Севан). Л.: Институт озерадения АН СССР, 1986. 73 с.
9. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Капотова Н.И., Ливанова Н.А. Опыт разработки и применения математических моделей бассейнов малых рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 93 с.
10. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modeling thermal structure and heat transfer within water column and bottom sediments // Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University. 1998. V. 3220. 41 p.
11. Golosov S., Kirillin G. Modelling the lake response to an external phosphorus load. // Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000. № 129. P. 388—393.
12. Mironov D. Parameterization of lakes in numerical weather prediction // Deutscher Wetter Dienst, Technical Report. 2008. № 11. 44 p.
13. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2012. № 64. P. 17264.
14. Астраханцев Г.П., Егорова Н.Б., Руховец Л.А. Моделирование течений и термического режима Ладожского озера (препринт). Л.: Институт озерадения АН СССР, 1988. 44 с.
15. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Писулин И.В., Руховец Л.А. Математическая модель для исследования реакции экосистемы Ладожского озера на изменение антропогенной нагрузки (препринт). СПб., 1992. 44 с.
16. Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Петрова Н.А., Полосков В.Н., Руховец Л.А. Моделирование сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании Ладожского озера // Моделирование современного состояния экосистемы Ладожского озера (препринт). 1998. С. 29—53.
17. Rukhovets L., Astrakhansev G., Menshutkin V., Minina T., Petrova N., Poloskov V. Development of models for the lake Ladoga ecosystem // Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000. № 129. P. 453—460.
18. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 127 с.
19. Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Поздняков Ш.Р., Коноплев В.Н., Игнатьева Н.В., Крючков А.М., Каретников С.Г. Теоретические и натурные исследования воздействия сточных вод Санкт-Петербурга на качество воды Невской губы // Инженерная экология. 2005. № 3. С. 15—28.
20. Gribin S., Assaul V., Andreev V., Kondratyev S. Problems of modeling the sewage discharge in shallow water areas: experimental and theoretical study // Proc. XVIII Int. Oceanographic Conf. Spb. 1994. P. 172—181.
21. Rutyantsev V., Gribin S., Kondratyev S. Mathematical modelling of consequences of waste discharges into shallow water // Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu, Finland. № 112. 1995. P. 102—105.
22. Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Лыскова У.С. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию Юго-западных очистных

- сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // Изв. РГО. 2006. Вып. 5. С. 48—57.
23. *Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Коноплев В.Н., Поздняков Ш.Р., Шмакова М.В.* Формирование ливневых сбросов части неочищенных сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга // Изв. РГО. 2006. Вып. 4. С. 47—54.
  24. Исследование влияния местоположения выпусков Юго-западных очистных сооружений, Красносельской станции аэрации, Центральной станции аэрации, Северной станции аэрации, КОС г. Петродворца, КОС г. Сестрорецка, КОС г. Зеленогорска на состояние Невской губы. СПб.: ИНОЗ РАН, 2005. 268 с.
  25. *Кармазинов Ф.В., Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Рябченко В.А., Поздняков Ш.Р.* Оптимизация расположения водовыпусков очистных сооружений как способ оздоровления акватории Невской губы // Теория и практика восстановления внутренних водоемов / Под ред. Румянцева В.А., Кондратьева С.А. СПб.: Лема, 2007. С. 167—179.
  26. *Кондратьев С.А.* Математическое моделирование стока и выноса вещества с водосбора: дис. на соиск. уч. степ. д-ра физ.-мат. наук. СПб.: Институт озерадения РАН, 1992. 301 с.
  27. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 255 с.
  28. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю.* Моделирование абнотических процессов в системе водосбор—водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 116 с.
  29. *Ливанова Н.А., Капотова Н.И., Кондратьев С.А., Герасимова И.П., Чешева И.Л.* Рекомендации по использованию радиолокационной информации об осадках в оперативном прогнозировании дождевых паводков. Л.: ВФ ГГИ, 1987. 55 с.
  30. *Гаврилица А.О., Папук В.В., Кондратьев С.А.* Рекомендации по обоснованию эрозионно допустимых норм, противоэрозионных мероприятий и расчету стока от естественных осадков. Кишинев: Карта Молдовеняскэ, 1990. 62 с.
  31. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор—водоток—водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
  32. *Kondratyev S.A., Ignatyeva N.V., Shmakova M.V., Ershova A.A., Minakova E.A., Terekhov A.V.* Model-based assessment of nutrient load into water bodies from different landscape types // Landscape Modelling and Decision Support. Ser. «Innovations in Landscape Research» CHAM, SWITZERLAND, 2020. P. 299—310.
  33. *Кондратьев С.А., Максимов Д.А., Шмакова М.В., Уличев В.И.* Моделирование биогенной нагрузки на водные объекты // Ученые записки РГМУ. 2014. № 35. С. 165—177.
  34. BaltHazAR II project, Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a Testing the nutrient load model for the River Luga catchment // HELCOM. 2012. 29 p.
  35. An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes // Rus NIP II. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation / Swedish Environmental Protection Agency. 2015. V. 6645. 138 p.
  36. *Шмакова М.В.* Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. СПб.: ГГИ, 2000. 25 с.
  37. *Кондратьев С.А.* Использование данных дистанционного зондирования при математическом моделировании водосборов. Л.: ИНОЗ РАН, 1987. 59 с.
  38. *Котрехов Е.П.* Численное моделирование гидравлического режима сложных озерно-речных систем (на примере р. Вуоксы) // Водные ресурсы. 2000. Вып. 27, № 3. С. 273—285.
  39. *Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А.И., Шмакова М.В., Еришова А.А.* Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева // Изв. РГО. 2010. Т. 142, № 2. С. 24—31.
  40. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Голосов С.Д., Зверев И.С.* Моделирование тепло- и массопереноса в системе «водосбор—водоток—водоем» // Труды Кар НЦ РАН. Серия: Лимнология и Океанология. 2021. № 4. С. 40—52.

41. *Becker A., Pflutzner B.* EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling // *ActaHydrophys.* 1987. V. 31, № 3—4. P. 125—141.
42. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата // *Ученые записки РГГМУ.* 2016. № 42. С. 24—32.
43. *Behrendt H., Dannowski R. (eds.)* Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Berlin, Germany: Weissensee Verlag, 2005. 353 p.
44. *Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В.* Метод оценки выноса биогенных веществ с водосборов и биогенной нагрузки на водные объекты Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Лема, 2011. 20 с.
45. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Еришова А.А., Обломкова Н.С.* К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 51. С. 109—120.
46. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.
47. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // *Ученые записки РГГМУ.* 2016. № 44. С. 61—69.
48. *Golosov S., Maher O.A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovenova G., Kirillin G.* Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes // *Oecologia, Springer* 2007. V. 151. P. 331—340.
49. *Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E.* Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling // *Spain: Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters / Ed.: Francisco J. Rueda Valdivia.* 2006. P. 209—215.
50. *Golosov S., Zverev I., Terzhevik A.* Thermal Structure and Heat Exchange in Ice-Water Column-Sediment System // *Proc. 7th Int. Symp. Physical Processes in Natural Waters.* Petrozavodsk. 2003. P. 28—34.
51. *Golosov S., Kirillin G.* A parameterized model of heat storage by lake sediments // *Environmental Modelling and Software.* 2010. № 25. P. 793—801.
52. *Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G.* FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling & Software.* V. 26. Issue 5. 2011. P. 683—685.
53. *Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., Palshin N., Potakhin M., Zdorovenov R., Zdorovenova G.* Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes // *Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters / Eds. L. Umlauf, G. Kirillin.* Germany. 2007. P. 147—156.
54. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Гидродинамический режим мелководного водоема: опыт математического моделирования // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 52. С. 89—101.
55. *Зверев И.С., Ушаков К.В., Шутунова Е.А., Голосов С.Д., Ибраев Р.А.* Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // *Материалы I Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути решения».* Петрозаводск. 2017. С. 228—233.
56. *Motovilov Y.G., Golosov S.D., Datsenko Y.S.* Information—Modeling Complex for Assessing the Hydroenvironmental Conditions of Reservoirs // *Water Resource.* 2020. № 47. P. 751—762.
57. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // *Метеорология и гидрология.* 2014. № 9. С. 74—84.
58. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А.* Гидродинамическое моделирование течений и транспорта наносов в водоеме при наличии макрофитов (на примере Сестрорецкого Разлива) // *Ученые записки РГГМУ.* 2017. № 49. С. 108—113.
59. *Голосов С.Д., Зверев И.С., Шутунова Е.А.* Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D модели гидродинамики Внутреннего моря (МГВМ) // *Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н.Н. Филатова.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 166—196.

60. Kalnay E. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. V. 77, № 3. P. 437—470.
61. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego — Great European Lakes. Observation and Modelling / Eds L. Rukhovets, N. Filatov. Chester: Springer Praxis, 2010. 302 p.
62. Гагарина О.В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Ижевск: Удмуртский университет, 2012. 199 с.
63. Лепихин А.П., Головачева С.И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 1. С. 4—13.
64. Алябина Г.А., Сорокин И.Н. Бассейн Ладожского озера как источник воздействия на экологическое состояние озера // *Региональная экология*. 2010. № 4 (30). С. 27—35.
65. Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998—1999 // *Jordforsk: Norwegian Centre for Soil and Environmental Research*. № 4/01. 1999. 66 p.
66. Lake Peipsi // *Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry / Ed. T Nõges*. Tartu: Sulemees Publ., 2001. 163 p.
67. Брюханов А.Ю. Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. СПб., 2016. 39 с.
68. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Минакова Е.А., Брюханов А.Ю., Игнатьева Н.В., Шмакова М.В., Иванова Е.В., Обломкова Н.С., Терехов А.В. Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // *География и природные ресурсы*. 2019. № 3. С. 67—76.
69. Мотовилов Ю.Г., Голосов С.Д., Даценко Ю.С., Зверев И.С., Кондратьев С.А., Пужлаков В.В., Фацевская Т.Б. Информационно-моделирующий комплекс на основе математических моделей формирования водного и химического стока в системе «водосбор—водоем» (на примере Куйбышевского водохранилища) // *Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Под рук. В.И. Данилова-Данильяна*. М.: НИСО РАН, 2020. С. 456—473.
70. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Расулова А.М., Коробченкова К.Д. Ладожское озеро — геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // *Гидрометеорология и Экология*. 2021. № 62. С. 139—161. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161.
71. Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Новая парадигма государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Тр. Четвертой всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 15—18 сентября 2015 г. / Под ред. М.В. Болгова*. М.: ИВП РАН, 2015. С. 20—23.
72. Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Актуальность оптимизации государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера // *Ученые записки РГГМУ*. 2017. № 48. С. 110—119.

### References

1. Kreiman K.D. Resistance law for wind drift in the presence of waves. *Doklady Akademii nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 1990, 310 (2): 316—319. [In Russian].
2. Kreiman K.D. Laboratory modeling of turbulent entrainment in an annular basin with blowing of the water surface. *Doklady Akademii nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 1988, 303 (2): 315—319. [In Russian].
3. Samarskiy A.A. Modern Applied Mathematics and Computational Experiment. *Kommunist*. Communist. 1983, 18: 31—42. [In Russian].
4. Rumyantsev V.A., Bovykin I.V. *Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti kolebaniy stoka rek Evrazii*. Spatial-temporal patterns of fluctuations in the flow of rivers in Eurasia. Leningrad: Nauka, 1985: 148. [In Russian].
5. Rumyantsev V.A., Trapeznikov Yu.A. *Stokhasticheskie modeli gidrologicheskikh protsessov*. Stochastic models of hydrological processes. Leningrad: Nauka, 2008: 152 p. [In Russian].
6. Rumyantsev V.A., Bovykin I.V. *Matematiko-statisticheskie osnovy sovместnogo analiza vremennykh gidrologicheskikh riadov*. Mathematical and statistical foundations of joint analysis of hydrological time series. Leningrad: Nauka, 2009: 86 p. [In Russian].

7. Rumyantsev V.A., Trapeznikov Yu.A., Grigoriev A.S. *Stokhasticheskie modeli vliianiia klimata na gidrologiiu ozer*. Stochastic models of the influence of climate on the hydrology of lakes. St. Petersburg: NII Khimii SPbGU, 2001: 156 p. [In Russian].
8. Rumyantsev V.A., Razumov E.V., Zilitinkevich S.S. *Parametrizovannaia model' sezonnykh izmenenii temperatury i uslovii peremeshivaniia v ozere (s prilozheniem k probleme ozera Sevan)*. Parametrized model of seasonal changes in temperature and mixing conditions in the lake (with an application to the problem of Lake Sevan). Leningrad: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1986: 73 p. [In Russian].
9. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Kapotova N.I., Livanova N.A. *Opyt razrabotki i primeneniia matematicheskikh modelei basseinov malykh rek*. Experience in the development and application of mathematical models of small river basins. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985: 93 p. [In Russian].
10. Golosov S., Zverev I., Terzhevnik A. Modeling thermal structure and heat transfer within water column and bottom sediments. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, Lund University. 1998, 3220: 41 p.
11. Golosov S., Kirillin G. Modelling the lake response to an external phosphorus load. Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000, 129: 388—393.
12. Mironov D. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Deutscher Wetter Dienst, Technical Report. 2008, 11: 44 p.
13. Golosov S., Terzhevnik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012, 64: 17264 p.
14. Astrakhansev G.P., Egorova N.B., Rukhovets L.A. *Modelirovanie techenii i termicheskogo rezhima Ladozhskogo ozera (preprint)*. Modeling of currents and thermal regime of Lake Ladoga (preprint). Leningrad: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1988: 44 p. [In Russian].
15. Astrakhansev G.P., Menshutkin V.V., Pisulin I.V., Rukhovets L.A. *Matematicheskaiia model' dlia issledovaniia reaktivnoi ekosistemy Ladozhskogo ozera na izmenenie antropogennoi nagruzki (preprint)*. Mathematical model for studying the response of the ecosystem of Lake Ladoga to changes in anthropogenic load (preprint). St. Petersburg, 1992: 44 p. [In Russian].
16. Astrakhansev G.P., Minina T.R., Petrova N.A., Poloskov V.N., Rukhovets L.A. Modeling the succession of phytoplankton during anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga. *Modelirovanie sovremennogo sostoiianiia ekosistemy Ladozhskogo ozera (preprint)*. Modeling of the current state of the ecosystem of Lake Ladoga (preprint). St. Petersburg, 1998: 29—53. [In Russian].
17. Rukhovets L., Astrakhansev G., Menshutkin V., Minina T., Petrova N., Poloskov V. Development of models for the lake Ladoga ecosystem. Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu. 2000, 129: 453—460.
18. Ibraev R.A. *Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov v Kaspiiskom more*. Mathematical modeling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea. Moscow: GEOS, 2008: 127 p. [In Russian].
19. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Ryabchenko V.A., Pozdnyakov Sh.R., Konoplev V.N., Ignatieva N.V., Kryuchkov A.M., Karetnikov S.G. Theoretical and field studies of the impact of St. Petersburg wastewater on the water quality of the Neva Bay. *Inzhenernaia ekologiia*. Engineering ecology. 2005, 3: 15—28. [In Russian].
20. Gribin S., Assaul V., Andreev V., Kondratyev S. Problems of modeling the sewage discharge in shallow water areas: experimental and theoretical study. Proc. XVIII Int. Oceanographic Conf. SPb., 1994: 172—181.
21. Rumyantsev V., Gribin S., Kondratyev S. Mathematical modelling of consequences of waste discharges into shallow water. Publ. of Karelian Inst., Univ. of Joensuu, Finland. 1995, 112: 102—105.
22. Ryabchenko V.A., Konoplev V.N., Kondratyev S.A., Pozdnyakov Sh.R., Lyskova U.S. Assessment of changes in the water quality of the Neva Bay after the commissioning of the South-West treatment facilities of St. Petersburg (according to mathematical modeling). *Izv. RGO*. Proc. RGO. 2006, 5: 48—57. [In Russian].
23. Kondratyev S.A., Ryabchenko V.A., Konoplev V.N., Pozdnyakov Sh.R., Shmakova M.V. Formation of storm discharges of a part of untreated wastewater at treatment facilities of St. Petersburg. *Izv. RGO*. Proc. RGO. 2006, 4: 47—54. [In Russian].
24. *Issledovanie vliianiia mestopolozheniia vypuskov lugo-zapadnykh ochistnykh sooruzhenii, Krasnosel'skoi stantsii aeratsii, Tsentral'noi stantsii aeratsii, Severnoi stantsii aeratsii, KOS g. Petrodvortska, KOS g. Sestrovetska, KOS g. Zelenogorska na sostoianie Nevskoi guby*. Investigation of the influence of the location of

- the outlets of the Southwest Wastewater Treatment Plant, Krasnoselskaya Aeration Station, Central Aeration Station, Northern Aeration Station, WWTP in Petrodvorets, WWTP in Zelenogorsk on the state of the Neva Bay. St. Petersburg: Institut ozerovedeniya, 2005: 268 p. [In Russian].
25. Karmazinov F.V., Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Ryabchenko V.A., Pozdnyakov Sh.R. Optimization of the location of wastewater outlets as a way to improve the water area of the Neva Bay. *Teoriia i praktika vosstanovleniia vnutrennikh vodoemov. Pod red. Rumiantseva V.A., Kondratyeva S.A.* Theory and practice of restoration of internal water bodies. Ed. Rumyantseva V.A., Kondratyeva S.A. St. Petersburg: Lema, 2007: 167—179. [In Russian].
  26. Kondratyev S.A. *Matematicheskoe modelirovanie stoka i vynosa veshchestva s vodosbora: dis. na soisk. uch. step. d-ra fiz.-mat. nauk.* Mathematical modeling of runoff and removal of matter from the catchment area: dis. for a job. Grand PhD (Phys.-Math. Sci.). St. Petersburg: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1992: 301 p. [In Russian].
  27. Kondratyev S.A. *Formirovanie vneshnei nagruzki na vodoemy: problemy modelirovaniia.* Formation of external load on water bodies: modeling problems. St. Petersburg: Nauka, 2007: 255 p. [In Russian].
  28. Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.Yu. *Modelirovanie abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor-vodoem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera).* Modeling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of Lake Chudsko-Pskovskoye). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010: 116 p. [In Russian].
  29. Livanova N.A., Kapotova N.I., Kondratyev S.A., Gerasimova I.P., Chesheva I.L. *Rekomendatsii po ispol'zovaniiu radiolokatsionnoi informatsii ob osadkakh v operativnom prognozirovanii dozhdevykh pavodkov.* Recommendations for the use of radar information on precipitation in operational forecasting of rain floods. Leningrad: VF GGI, 1987: 55 p. [In Russian].
  30. Gavrilitsa A.O., Papuk V.V., Kondratyev S.A. *Rekomendatsii po obosnovaniiu erozionno dopustimyykh norm, protiverozionnykh meropriiati i raschetu stoka ot estestvennykh osadkov.* Recommendations for the substantiation of erosion permissible norms, anti-erosion measures and the calculation of runoff from natural precipitation. Chisinau: Kartya Moldoveneaske, 1990: 62 p. [In Russian].
  31. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. *Mathematical modeling of mass transfer in the catchment — watercourse — water body system.* St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019: 246 p. [In Russian].
  32. Kondratyev S.A., Ignatyeva N.V., Shmakova M.V., Ershova A.A., Minakova E.A., Terekhov A.V. *Model-based assessment of nutrient load into water bodies from different landscape types. Landscape Modeling and Decision Support. Innovations in Landscape Research.* CHAM, Switzerland, 2020: 299—310.
  33. Kondratyev S.A., Maksimov D.A., Shmakova M.V., Ulichev V.I. *Modeling the biogenic load on water bodies. Uchenyye zapiski RGGMU.* Scientific notes of the RSHU. 2014, 35: 165—177. [In Russian].
  34. BaltHazAR II project, Component 2.2: *Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations. Appendix 3a Testing the nutrient load model for the River Luga catchment.* HELCOM, 2012: 29 p.
  35. *An improved system for monitoring and assessment of pollution loads from the Russian part of the Baltic Sea catchment for HELCOM purposes. Rus NIP II. Implementation of the Baltic Sea Action Plan (BSAP) in Russian Federation. Swedish Environmental Protection Agency.* 2015, 6645: 138 p.
  36. Shmakova M.V. *Stokhasticheskaia model' pogody v sisteme determinirovanno-stokhasticheskogo modelirovaniia kharakteristik stoka: dis. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk.* Stochastic Weather Model in the System of Deterministic-Stochastic Modeling of Runoff Characteristics: dis. for a job. PhD (Tech. Sci.). St. Petersburg: GGI. 2000: 25 p. [In Russian].
  37. Kondratyev S.A. *Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniia pri matematicheskom modelirovanii vodosborov.* Using remote sensing data in mathematical modeling of catchments. Leningrad: Institut ozerovedeniya AN SSSR, 1987: 59 p. [In Russian].
  38. Kotrekhov E.P. *Numerical modeling of the hydraulic regime of complex lake-river systems (on the example of the Vuoksa river). Vodnyye Resursy.* Water resources. 2000, 27 (3): 273—285. [In Russian].
  39. Rumyantsev V.A., Kondratyev S.A., Pozdnyakov Sh.R., Rybakov V.N., Kryuchkov A.M., Moiseenkov A.I., Shmakova M.V., Ershova A.A. *Experimental studies and modeling of the formation of water quality in the Neva River. Izv. RGO.* Proc. RGO. 2010, 142 (2): 24—31. [In Russian].
  40. Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Golosov S.D., Zverev I.S. *Modeling of heat and mass transfer in the "catchment-watercourse-water body" system. Trudy Kar NTS RAN. Seriya: Limnologii i Okeanologiya.* Proceedings Kar SC RAS. Series: Limnology and Oceanology. 2021, 4: 40—52. [In Russian].

41. Becker A., Pfitzner B. EGMO-System approach and subroutines for river basin modelling. *ActaHydrophys.* 1987, 31 (3-4): 125—141.
42. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Mathematical modeling of the Neva river runoff under conditions of possible climate change. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2016, 42: 24—32. [In Russian].
43. Behrendt H., Dannowski R. (eds.) Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Germany: Weissensee Verlag, Berlin, 2005: 353 p.
44. Kondratyev S.A., Kazmina M.V., Shmakova M.V. *Metod otsenki vynosa biogenykh veshchestv s vosborov i biogennoi nagruzki na vodnye ob'ekty Severo-Zapadnogo regiona Rossiiskoi Federatsii*. Method for assessing the removal of nutrients from watersheds and nutrient load on water bodies of the North-Western region of the Russian Federation. St. Petersburg: Lema, 2011: 20 p. [In Russian].
45. Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Bryukhanov A.Yu., Viktorova N.V., Ershova A.A., Oblomkova N.S. To the assessment of biogenic runoff into the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2018, 51: 109—120. [In Russian].
46. Shmakova M.V. *Teoriia i praktika matematicheskogo modelirovaniia rechnykh potokov*. Theory and practice of mathematical modeling of river flows. St. Petersburg: Lema, 2013: 142 p. [In Russian].
47. Shmakova M.V., Kondratyev S.A., Markova E.G. Spatio-temporal regularities of siltation of the Sestroretsk reservoir by river sediments (based on the results of mathematical modeling). *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2016, 44: 61—69. [In Russian].
48. Golosov S., Maher O.A., Shipunova E., Terzhevik A., Zdorovennova G., Kirillin G. Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes. *Oecologia*, Springer. 2007, 151: 331—340.
49. Golosov S., Tolmachev A., Kirillin G., Shipunova E. Dimension analysis as applied to the lake ecosystem modeling. Spain: Proc. 10th European Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Ed.: Francisco J. Rueda Valdivia, 2006: 209—215.
50. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Thermal Structure and Heat Exchange in Ice-Water Column-Sediment System. Proc. 7th Int. Symp. Physical Processes in Natural Waters. Petrozavodsk, 2003: 28—34.
51. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling and Software*. 2010, 25: 793—801
52. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. FLake—Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011, 26 (5): 683—685.
53. Terzhevik A., Golosov S., Mitrokhov A., Palshin N., Potakhin M., Zdorovennov R., Zdorovennova G. Some features of the vertical dissolved oxygen structure in shallow ice-covered lakes. Proc. 11th Symp. Physical Processes in Natural Waters. Eds. L. Umlauf, G. Kirillin. Germany, 2007: 147—156.
54. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Hydrodynamic regime of a shallow reservoir: an experience of mathematical modeling. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2018, 52: 89—101. [In Russian].
55. Zverev I.S., Ushakov K.V., Shipunova E.A., Golosov S.D., Ibraev R.A. Assessment of the influence of the main tributaries of Lake Ladoga on the formation of the water mass of the Petrokrepost Bay (the source of the Neva River) based on the results of mathematical modeling. *Materialy I Mezhdunarodnoi konferentsii «Ozera Evrazii: problemy i puti resheniia»*. Proceedings of the I International Conference “Lakes of Eurasia: Problems and Solutions”. Petrozavodsk, 2017: 228—233. [In Russian].
56. Motovilov Y.G., Golosov S.D., Datsenko Y.S. Information—Modeling Complex for Assessing the Hydroenvironmental Conditions of Reservoirs. *Vodnyye Resursy*. Water Resource. 2020, 47: 751—762.
57. Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Stochastic weather model in the system of deterministic-stochastic modeling of runoff and biogenic load. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2014, 9: 74—84. [In Russian].
58. Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Hydrodynamic modeling of currents and sediment transport in a reservoir in the presence of macrophytes (on the example of the Sestroretsk Razliv). *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2017, 49: 108—113. [In Russian].
59. Golosov S.D., Zverev I.S., Shipunova E.A. Modeling of thermohydrodynamic processes and ecosystems of Ladoga and Onega lakes on the basis of a 3D model of hydrodynamics of the Inner Sea (MGVM). *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikikh ozer Rossii*. Pod red. N.N. Filatova. Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Ed. N.N. Filatov. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2020: 166—196. [In Russian].

60. Kalnay E. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996, 77 (3): 437—470.
61. Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego — Great European Lakes. *Observation and Modelling*. Eds. L. Rukhovets, N. Filatov. Chester: Springer Praxis, 2010: 302 p.
62. Gagarina O.V. *Otsenka i normirovanie kachestva prirodnykh vod: kriterii, metody, sushchestvuiushchie problemy*. Assessment and regulation of the quality of natural waters: criteria, methods, existing problems. Izhevsk: Udmurtskiy universitet, 2012: 199 p. [In Russian].
63. Lepikhin A.P., Golovacheva S.I. On the problem of regulating the discharge of suspended solids into natural watercourses. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*. Water industry of Russia: problems, technologies, management. 2015, 1: 4—13. [In Russian].
64. Alyabina G.A., Sorokin I.N. Lake Ladoga basin as a source of impact on the ecological state of the lake. *Regionalnaya ekologiya*. Regional ecology. 2010, 4 (30): 27—35. [In Russian].
65. Nutrient loads to Lake Peipsi. Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998—1999. Jordforsk: Norwegian Centre for Soil and Environmental Research. 1999, 4 (01): 66 p.
66. Lake Peipsi. Meteorology, Hydrology, Hydrochemistry. Ed. T Nöges. Tartu: Sulemees Publ., 2001: 163 p.
67. Bryukhanov A.Yu. *Metody proektirovaniia i kriterii otsenki tekhnologii utilizatsii navoza, pometa, obespechivaiushchie ekologicheskuiu bezopasnost': Avtoref. diss. na soisk. uch. st. d-ra tekhn. nauk*. Design methods and criteria for assessing technologies for the utilization of manure, droppings, ensuring environmental safety: Abstract of the thesis for the degree of Grand Phd (Tech. Sci.). St. Petersburg, 2016: 39 p. [In Russian].
68. Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Minakova E.A., Bryukhanov A.Yu., Ignatieva N.V., Shmakova M.V., Ivanova E.V., Oblomkova N.S., Terekhov A.V. Assessment of the biogenic load on the Kuibyshev reservoir from the side of the catchment. *Geografiya i prirodnyye resursy*. Geography and natural resources. 2019, 3: 67—76. [In Russian].
69. Motovilov Yu.G., Golosov S.D., Datsenko Yu.S., Zverev I.S., Kondratyev S.A., Puklakov V.V., Fashchevskaya T.B. Information-modeling complex based on mathematical models of the formation of water and chemical runoff in the «catchment — reservoir» system (on the example of the Kuibyshev reservoir). *Diffuznoe zagriaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniia. Pod ruk. V.I. Danilova-Danil'iana*. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions. Under the direction of V.I. Danilov-Danilyan. Moscow: NISO RAN, 2020 : 456—473. [In Russian].
70. Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Rasulova A.M., Korobchenkova K.D. Lake Ladoga is a geostrategic water body in the North-West of Russia and its zone of environmental risk. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 62: 139—161. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161.
71. Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. A new paradigm of state monitoring of the largest water bodies in Russia on the example of Lake Ladoga. *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov: Tr. Chetvertoi vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem, Moskva, 15—18 sentiabria 2015 g. Pod red. M.V. Bolgov*. Fundamental problems of water and water resources: Tr. Fourth all-Russia. conf. with int. participation, Moscow, September 15—18, 2015. Ed. M.V. Bolgov. Moscow: IVP RAN, 2015: 20—23. [In Russian].
72. Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. The relevance of optimization of state monitoring of the largest water bodies in Russia on the example of Lake Ladoga. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the RSHU. 2017, 48: 110—119. [In Russian].

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 13.08.2021

Принята в печать 25.10.2021

### Сведения об авторах

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р. физ.-мат. наук, заместитель директора ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН по научной работе, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией математических методов моделирования, kondratyev@limno.org.ru.

*Шмакова Марина Валентиновна*, д-р. геогр. наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, m-shmakova@yandex.ru.

*Голосов Сергей Дмитриевич*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, sergey\_golosov@mail.ru.

*Зверев Илья Сергеевич*, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, iliazverev@mail.ru.

*Коробченкова Ксения Дмитриевна*, младший научный сотрудник Лаборатории математических методов моделирования ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, korobchenkova14@mail.ru.

### ***Information about authors***

*Kondratyev Sergey Alekseevich*, Grand PhD (Phys.-Math. Sci.), Deputy Director of IL RAS, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods, 3718470@gmail.com.

*Shmakova Marina Valentinovna*, Grand PhD (Geogr. Sci.), Leading Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of IL RAS, m-shmakova@yandex.ru.

*Golosov Sergey Dmitrievich*, PhD (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of IL RAS, sergey\_golosov@mail.ru.

*Zverev Ilya Sergeevich*, PhD (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods of IL RAS, iliazverev@mail.ru.

*Korobchenkova Ksenia Dmitrievna*, Junior Researcher of the Laboratory of Mathematical Modeling Methods, IL RAS, korobchenkova14@mail.ru.

УДК 551.553.8:[551.511.2+551.511.3]

doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670

**Разделение конвективных штормов.  
Часть I. Динамика и кинематика***Е.М. Лившиц<sup>1</sup>, В.И. Петров<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Франкфурт-на-Майне, Германия, [evmaleposoru@googlemail.com](mailto:evmaleposoru@googlemail.com)<sup>2</sup> Специальная служба активных воздействий на гидрометеорологические процессы Республики Молдова, Кишинев

Анализируется феномен разделения мощных конвективных штормов. Впервые приводится факт разделения мультячейкового конвективного шторма в малоподвижной безсдвиговой тропосфере. Делается вывод о том, что известный механизм разделения мощных конвективных штормов, связанный со специфической структурой ветра с высотой в тропосфере, не охватывает весь спектр и не объясняет многие аспекты динамики и кинематики разделившихся штормов. Впервые высказана гипотеза о том, что закономерности разделения мощных штормов диктуются мезо- $\beta$ -масштабной структурой, а влияние величины и направления сдвига ветра с высотой в тропосфере сводится лишь к преобладанию тех или иных форм ее реализации. Полученные результаты применимы в противоградных работах, при модификации осадков, в обеспечении безопасности полетов, штормоповещении населения, энергетике, для служб спасения.

*Ключевые слова:* разделение мощных конвективных штормов, сдвиг ветра с высотой, Лагранжева система координат, мезо- $\beta$ -масштабные конвективные структуры, вектор эволюции шторма.

**The splitting of convective storms.  
Part I. Dynamics and Kinematics***E.M. Livshits<sup>1</sup>, V.I. Petrov<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Frankfurt am Main, Germany, [evmaleposoru@googlemail.com](mailto:evmaleposoru@googlemail.com)<sup>2</sup> Special Service of Active Influences on Hydrometeorological Processes of the Republic of Moldova, Kishinev

The well-known theory describing the phenomenon of splitting of powerful convective storms relies on the specific wind structure with altitude. It is believed that the specific structure and intensity of wind shear, especially in the lower troposphere, determines the very possibility of splitting of powerful convective storms, while the shape and intensity of wind shear with height in the middle and upper troposphere also control the further behavior and viability of splitting storms. Our radar studies, based on the Automated System of Meteorological Radar Control — ASU-MRL in the anti-hail system of the Republic of Moldova, which allows to receive volumetric radar files from the hemisphere with a frequency of 3.5 minutes, for the first time showed that powerful convective storms also separate in the low-moving and, practically, motionless troposphere. Analysis of the dynamics and kinematics of splitting storms using the Lagrangian approach, which excludes the masking effect of tropospheric translation, leads us to the conclusion that this, as well as other phenomena: trajectory kinks, different variants of left-right-moving storm deflections, storm dissipation locations, convective storm mergers, etc., do not depend on wind structure with altitude. It is also hypothesized for the first time that the determining role in realization of the storm splitting phenomenon, in our opinion, is played by meso- $\beta$ -scale polygonal or linear structures, which are formed in the

surface boundary layer and trigger powerful penetrating convection, with the magnitude and shape of wind shear with altitude making one of the options more preferable. It was shown for the first time that the splitting of convective storms and the further development of left-right-moving storms occurs by updating on the opposite flanks of storms and these patterns are dictated by the configuration of meso- $\beta$ -scale structures, which explains, in particular, the frequent events of long development of detached cyclonic and anticyclonic storms, as well as those in which there was no rotation of upwelling currents.

Regularities of meso- $\beta$ -scale structures development in the form of algorithms of ultra-short-range forecast of their dynamics are applied in the Moldavian anti-hail works and may be also useful in modification of precipitation from convective clouds, in storm warning for population, for flight safety of aircraft, in power engineering, in rescue services and other branches of national economy.

*Keywords:* storm splitting, evolution vector, Lagrangian Coordinate System, mesoscale structure, storm evolution prediction.

---

**For citation:** *E.M. Livshits, V.I. Petrov. The splitting of convective storms. Part I. Dynamics and Kinematics. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 648—670. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670*

---

## Введение

Развитие полей конвективных облаков можно представить как непрерывный процесс возникновения, роста, диссипации, объединения или, напротив, разделения штормов, состоящих из облачных ячеек. Траектории штормов,двигающихся с разными скоростями и составляющих интегральную радиолокационную картину, не параллельны друг другу, испытывают изломы и часто пересекаются. Поскольку это все происходит в движущейся атмосфере, то для неподвижного и неискушенного наблюдателя, находящегося в Эйлеровой системе координат (ЭСК), наблюдаемое многообразие вызывает ощущение своеобразного хаоса.

В данном исследовании мы направляем усилия на сравнительно небольшой аспект общей проблемы конвекции — на ту часть мезо- $\beta$ -масштаба (от 20 до 200 км — классификация дана по Орлански [1]), которую мы соотносим со штормами и мезомасштабными конвективными ячейками (ММКЯ), проявляющимися в виде полигональных структур, похожих на открытые ячейки Рэля—Бенара при внутримассовых процессах и слабосдвиговой тропосфере [2], и мезомасштабными конвективными линиями (ММКЛ), похожими на «облачные улицы», при средних и больших сдвигах ветра с высотой. Когда мы говорим об ячейках, составляющих радиолокационное тело конвективного шторма, мы обращаемся к мезо- $\gamma$ -масштабу (размеры объектов менее 20 км). При этом очевидно, что четких границ мезомасштабов не существует. Исследование структуры и кинематики штормов на фоне этих мезомасштабных проявлений конвекции имеет практическое применение при построении технологий противорадовой защиты (ПГЗ), сверхкраткосрочных прогнозов погоды, штормоповещении населения, служб спасения, для нужд сельского хозяйства, транспорта и промышленности. Актуальность данных исследований и новых технологий повышается вследствие четко выраженной в последние годы тенденции общего усиления мощности атмосферных процессов, их повторяемости, смещения этих явлений в более северные районы континентов. Эти тенденции, возможно, связанные с изменениями климата, уже приводят к участвовавшим катастрофическим градобитиям, наводнениям,

селевым потокам, торнадо и другим опасным явлениям погоды, к большим человеческим жертвам и огромному материальному ущербу.

Феномен отклонения движения штормов вправо (для северного полушария) от средне-тропосферного ветра привлек внимание ученых сразу же после начала применения радаров в метеорологии с середины 40-х годов прошлого столетия. Наиболее известная концепция, объясняющая это явление, была выдвинута Браунингом [4], однако факты, показавшие наличие штормов, отклоняющихся влево от средних тропосферных ветров, и, в особенности, такие, когда отклонения траекторий штормов вправо и влево происходили одновременно на сравнительно малой территории, привели к необходимости объяснения уже этого явления.

Фуджита [5] и Голдмэн [6] предположили, что механизмом, объясняющим этот феномен, может быть эффект Магнуса: при циклоническом вращении восходящего потока шторм отклоняется вправо, при антициклоническом — влево. Некоторые наблюдения с разделением штормов, вращающихся в разные стороны, привели многих исследователей к необходимости привлечения эффекта Магнуса для объяснения этого феномена ко всем случаям таких разделений, однако Харрольд [7] считал, что только к половине таких штормов можно применить этот механизм. Вторую половину случаев он отнес к обновлениям на противоположных флангах штормов, однако он не смог объяснить этого при одинаковой структуре ветра в тропосфере. Дальнейшие наблюдения показали [8], что встречались случаи разделения штормов, в которых вращение не было обнаружено.

Из работ, рассматривающих факторы, влияющие на движение мульти- и суперячейковых штормов, в том числе и феномена разделения штормов, следует упомянуть также исследование Цайтлера и Банкерса [9]. В нем указываются следующие факторы:

- адвекция по среднему ветру в типичном тропосферном слое;
- распространение через динамические вертикальные градиенты давления из-за вращающегося восходящего потока (эффект Магнуса и подъемная сила Кутта—Жуковского относится только к суперячейкам);
- распространение через конвективное развитие вдоль оттока холодного воздуха в области осадков в шторме;
- распространение посредством конвективного развития вдоль особенностей сходимости потоков пограничного слоя;
- распространение за счет слияния и взаимодействия между близлежащими штормами, распространение за счет орографических эффектов.

В работах по численному моделированию девиантное поведение штормов и механизмы разделения штормов были рассмотрены Клемпом и др. [10], Вильгельмсоном и др. [11], Вайсманом и др. [12], которые показали важность сильно-однонаправленного вертикального сдвига и высокой конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE). В этих работах были исследованы условия, при которых реализуется равноправное или преимущественное развитие лево- или право-движущихся штормов после разделения. Ротунно и Клемп [13] показали, что в отдельных случаях соотношение некоторых гидродинамических параметров может привести к разделению штормов и без наличия значительных осадков.

Последнее утверждение было подкреплено наблюдениями Блюстайна [14], в которых суперячейка LP (суперячейка со сравнительно небольшим уровнем осадков) дважды разделилась, а время между первым и вторым разделением составило 0,5 ч. Такое быстрое повторное разделение в отсутствие эффекта водной нагрузки, по мнению авторов [14], заслуживает внимания. К сожалению, Блюстайн и др. [14] не развили эту мысль дальше, хотя они обнаружили, как нам представляется, второе разделение шторма в узле мезо- $\beta$ -масштабной структуры, находящегося от предыдущего узла на расстоянии примерно 25—30 км, что соответствует наиболее часто встречающимся диаметрам ММКЯ порядка 30—40 км. Вивер и Нельсон [15], анализируя доплеровские данные, показали важное влияние фронтов порыва на развитие суперячейковых штормов, которые распространяются вдоль границ их оттока. Кроме того, на эти штормы влияет взаимодействие с границей, создаваемой предыдущим штормом.

Можно констатировать, что в упомянутых выше работах не рассматриваются факторы, которые имеют, с нашей точки зрения, определяющее значение. Поиску и доказательству управляющего влияния на эти феномены мезо- $\beta$ -масштабных структур и посвящено настоящее исследование.

Необходимо отметить, что феномен разделения мощных конвективных штормов в отечественной литературе не рассматривался. В то же самое время за рубежом этому явлению посвящено большое число работ. Суммируя, можно констатировать, что к середине 1980-х гг. концепция разделения штормов сложилась и к настоящему времени, став классической, преподается во всех метеорологических вузах США и других стран.

Подчеркнем, что под разделением штормов мы понимаем отделение одной части шторма от другой с последующим самостоятельным развитием этих отделившихся частей в диапазоне от десятков минут до нескольких часов. Постоянно наблюдаемые «разделения штормов», связанные с естественной диссипацией ячеек внутри них, мы не относим к рассматриваемому явлению.

Схематически данная концепция представлена на рис. 1, где изображены две стадии разделения шторма: (а) стадия формирования двух вращающихся (циклонически и антициклонически) вертикальных ветвей из горизонтального вращающегося вихря; (б) стадия разделения суперячейки на две — циклоническую и антициклоническую.

Считается, что возникновению горизонтально вращающегося вихря способствует специфический сдвиг ветра с высотой в приземном слое по скорости и направлению. В дальнейшем, раскрученный таким образом вихрь, попадая в набегающий восходящий поток, деформируется им и образует своеобразную дугу, на левом фланге которой формируется восходящий поток с циклоническим вращением, а на правом — с антициклоническим (рис. 1 а).

Вторая стадия начинается с момента образования осадков и их выпадения через восходящий поток, и это приводит к тому, что сформированная ранее дуга разрывается на два самостоятельных вертикальных потока, вращающихся в разных направлениях. Здесь и начинается разделение суперячейки на две: циклоническую, движущуюся вправо от средних тропосферных ветров (в нашей терминологии это

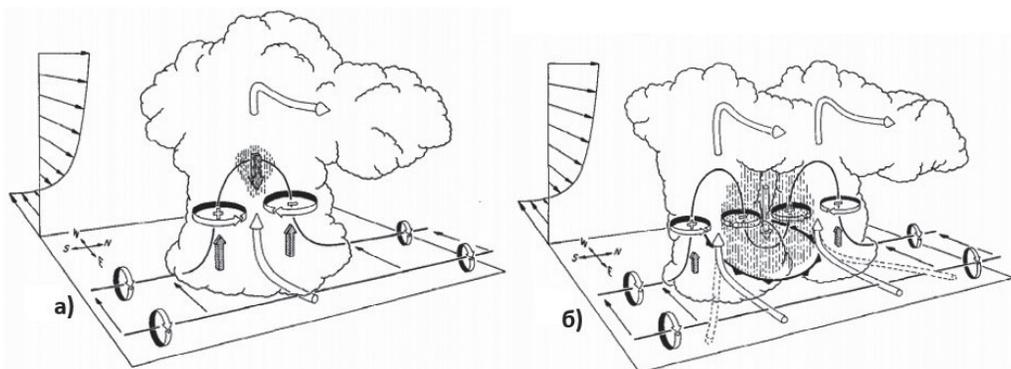


Рис. 1. Схема разделения суперячейкового шторма:

- a) стадия формирования двух вращающихся вертикальных ветвей (циклонической + и антициклонической -) из вращающегося горизонтального вихря;
- б) стадия разделения суперячейки на две — циклоническую и антициклоническую [16, 17].

Fig. 1. Schematic of the splitting of a supercell storm:

- a) the stage of formation of two rotating vertical branches (cyclonic + and anticyclonic -) from a rotating horizontal vortex;
- б) the stage of the splitting of the supercell into two, cyclonic and anticyclonic [16, 17].

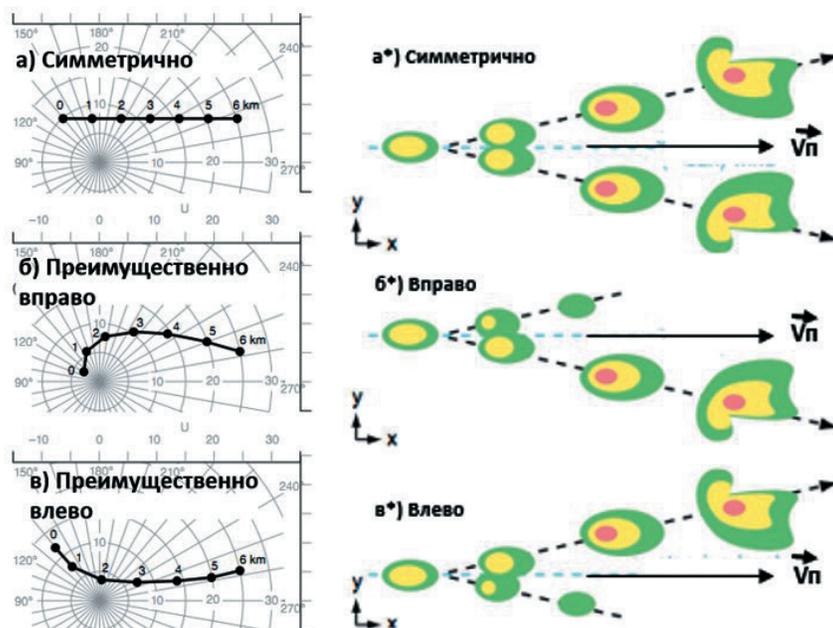


Рис. 2. Преимущественные траектории суперячеек после разделения ( $a^*$ ,  $б^*$ ,  $в^*$ ) в зависимости от поворота ветра с высотой ( $a$ ,  $б$ ,  $в$ ) [18].

Fig. 2. Predominant trajectories of supercells after splitting ( $a^*$ ,  $б^*$ ,  $в^*$ ) as a function of wind rotation with height ( $a$ ,  $б$ ,  $в$ ) [18].

ведущий поток  $\vec{V}_n$ , соответствующий ветру на 600 мб поверхности) и антициклоническую, смещающуюся влево от ведущего потока.

Как показано на рис. 2, после разделения каждый из штормов движется по своей траектории — один, антициклонический, влево от средне тропосферных ветров; другой, циклонический — вправо. В зависимости от структуры ветра с высотой (рис. 2 *a, б, в*), может быть три варианта соотношения скоростей отделившихся штормов: одинаковое ( $a^*$ ), правый движется быстрее левого ( $b^*$ ), левый движется быстрее правого ( $c^*$ ) [18].

Таким образом, цель работы — представить иной взгляд на механизмы разделения мощных конвективных штормов и показать определяющую роль в реализации этого феномена различных форм мезо-β-масштабных структур.

### Исходные материалы и методика исследований

Для анализа были привлечены доступные опубликованные данные натуральных радиолокационных наблюдений за разделением штормов от зарубежных исследователей, различные гипотезы и модели, в которых рассматриваются отдельные аспекты этого феномена, или явление в целом, а также данные автоматизированной системы управления «Метеорологический радиолокационный комплекс» (АСУ-МРЛ) [19] в структуре ПГЗ Республики Молдова. Эти данные позволяют получать объемную картину радиоэха и множества параметров с частотой в 3,5 мин на протяжении всего развития грозоградного процесса (ГПП). Кроме того, привлечена аэрологическая информация о зондировании атмосферы и общий синоптический анализ в сроки, наиболее приближенные ко времени рассматриваемых событий.

Некоторые рисунки и схемы, например в [20], преобразованы нами с применением лагранжевой системы координат (ЛСК), исключаяющей маскирующее действие смещения средней тропосферы [2]. Именно движение атмосферы относительно неподвижного наблюдателя и создает ощущение «хаоса», о чем мы упоминали выше, а применение Процедуры Лагранжа (ПЛ), включенной в пакет программ АСУ-МРЛ [19], позволяет преобразовывать кажущийся «хаос» в четкую структуру — мезомасштабную конвективную структуру (ММКС). Анализ этих структур, как будет показано далее, позволяет наиболее зримо выявлять искомые закономерности. Другие исследования, где для подобных преобразований не хватало информации, например [21], использовались лишь для отдельных аспектов анализа.

### Анализ грозоградных процессов с разделением мощных конвективных штормов

Выше мы кратко изложили концепцию разделения мощных конвективных штормов, представленную на рисунках 1 и 2. Что же наблюдается в действительности?

Статистика разделяющихся штормов и упомянутых параметров сравнительно невелика. Например, в работе Брауна и Мейтин [22] приводится информация о 31 паре разделившихся штормов, собранная из различных публикаций до 1994 г.

Редко встречающийся пример разделения штормов демонстрируется в работе Грассо и Хильгендорфа [23], где разделившиеся штормы смещаются с одинаковыми скоростями, равными 43 км/ч, что похоже на ситуацию, описанную на рис. 2 а. Грэхэм и др. [24] исследовали разделение суперячейки и с помощью доплеровского радиолокатора и подтвердили наличие двух вращающихся в противоположных направлениях мезоциклонов.

Наиболее близкие к сегодняшнему дню исследования провели авторы [25] в юго-восточной Румынии, отметившие несколько пар разделившихся суперячейковых штормов, движение которых, как и «надлежит» суперячейкам, происходило согласно описанной выше теории.

Из работ, в которых приводятся иные причины отклонения траекторий конвективных штормов от направления и скорости смещения средней тропосферы, следует упомянуть исследование Вивера [26]. В нем на примере пяти случаев он показывает синоптические и субсиноптические особенности пограничного слоя, которые привели к существенным отклонениям в движении мощных штормов по отношению к таковым, рассчитанным по характеристикам сдвига ветра в тропосфере. В работе [27] Вивер и др. с привлечением данных доплеровской РЛС и учащенных спутниковых снимков подробно разбирают случай разделения суперячейки и показывают, что отклонения траекторий разделившихся штормов сильно отличаются от расчетных при существовавшем годографе, а левый, антициклонический шторм после отделения от материнского должен быть, согласно [10—13, 17—19], недолговечным. На самом деле оказалось, что этот шторм просуществовал более 2 ч и продолжал свое движение вдоль ранее существовавшей линии конвергенции.

Резюмируя, можно отметить, что данные о средних тропосферных ветрах, относительно которых многие параметры разделившихся штормов в приводимых работах измерялись, не единообразны, поскольку авторы по-разному выбирали слой тропосферы, отвечающий за смещение облачных (радиолокационных) ячеек. По этой причине мы воздержимся делать статистические обобщения.

Прежде чем приступить к анализу ГПП с разделением мощных конвективных штормов, дадим основные определения, которые используются в данной работе.

*Мультиячейковый шторм* — кучево-дождевое облако, радиолокационный образ которого состоит из нескольких взаимодействующих между собой квази-вертикальных *радиолокационных ячеек* (РЯ), каждая из которых в изолиниях отражаемости имеет свою индивидуальную вершину и локальный максимум. Важным отличительным (от РЯ) свойством штормов вообще и мультиячейковых, в частности, является кратковременное или долговременное появление *навеса радиоэха*, накрывающего сверху область *слабого радиоэха*, являющегося местом локализации основного восходящего потока.

*Суперячейковый шторм* — сверхмощный мультиячейковый шторм, в котором РЯ не различимы и поступление нового облачного ресурса в виде фидерных облаков носит квазинепрерывный характер: наличие мощного стационарного навеса радиоэха свидетельствует о столь же мощном по размерам и скорости (до 30—40 м/с и более) восходящем потоке. Важным признаком и одновременно

отличием суперячейкового шторма от мультячейкового является наличие *мезоциклона* (или мезоантициклона), чаще всего сопровождающегося проявлением *крюк-эха* на нижних уровнях, локализация которого довольно часто свидетельствует о наличии торнадо или о мощных ветрах. Развернутые определения радиолокационной ячейки, штормов и их элементов даны нами в [3]. Если говорить о конвективных штормах в целом, то *шторм* — это, скорее всего, *не объект, а процесс*, элементы которого не только невозможно рассматривать отдельно друг от друга, но и определить без учета их взаимодействия во времени.

Рассмотрим вначале ГПП от 3 апреля 1964 г. на северо-западной границе Техаса с Оклахомой (США) [20], представленный на рис. 3. Этот мощный процесс интересен для нас тем, что здесь имеют место четыре пары разделяющихся штормов, которые прослежены на протяжении всего времени их существования, а данные о них пригодны для анализа. Они включают направление и скорость средне-тропосферного ветра, отметки времени, соответствующие положению радиоэха от штормов, масштаб и т.п. Для удобства анализа мы преобразовали оригинальный рисунок в виде векторов в метрической системе и представили на рис. 3 а. На рис. 3 б изображена структура этого ГПП, выполненная в лагранжевой системе координат.

Стрелка  $\vec{V}_n$  соответствует вектору средне тропосферного ветра ( $A_n = 224^\circ$  — азимут, откуда дует ветер на высоте ведущего потока,  $V_n = 72$  км/ч — скорость ведущего потока);  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — углы расхождения штормов, составленные траекториями лево- и право-движущихся штормов после разделения. Сохранены оригинальные названия штормов (L, RA, RB и т.д. — изображены стрелками разных цветов). Шторм M, изображенный красным, с 16.20 обозначен как M\*, что означает начало его диссипации. Черные квадраты с пунктирной окантовкой и круги с номерами показывают интересные, с нашей точки зрения, места в общей картине, на которых мы акцентируем внимание. Отметим, что по данным, приводимым авторами [20], шторм L был антициклонической суперячейкой, шторм RA после разделения только в 16.15 стал циклонической суперячейкой; штормы RB и RC также стали антициклонической и циклонической суперячейками соответственно.

Опишем технику построения интегральной картины ГПП в ЛСК, которая представлена на рис. 3 б. Для этого необходимо знать: вектор ведущего потока ( $\vec{V}_n$ ) и векторы движения штормов на каждом из квазипрямолинейных участков траектории ( $\vec{V}_ш$ ). Для каждого из этих квазипрямолинейных отрезков, согласно правилу сложения векторов, вычисляются вектора эволюции:  $\vec{V}_э = \vec{V}_ш - \vec{V}_n$  (см. рис. 6 д) и в соответствии с длительностью каждого квазипрямолинейного участка траектории шторма на схему последовательно наносится величина векторов ( $\vec{V}_э$ ). В результате мы получаем интегральную картину ГПП в векторах эволюции штормов. Фактически, двигаясь вместе с радиолокационными ячейками по  $\vec{V}_n$ , мы, исключив этот вектор, получаем возможность видеть — в каком направлении и с какой скоростью идет обновление шторма, т. е. его развитие, эволюция. Вся эта

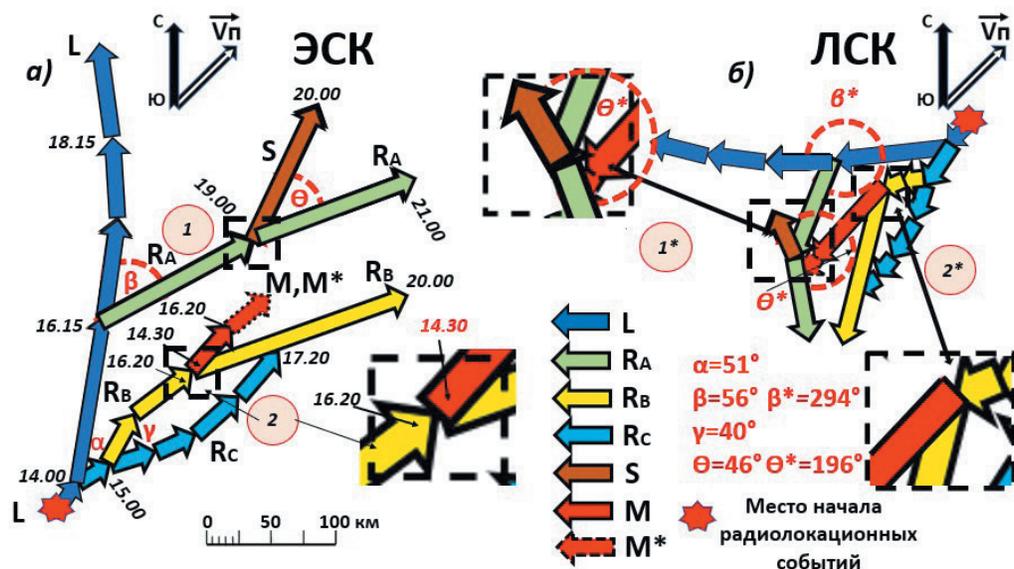


Рис. 3. Траектории штормов 3 апреля 1964 г. в ЭСК [20]:

- а) наименования штормов сохранены и обозначены векторами разного цвета;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — углы расхождения траекторий штормов после их разделения;  $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*, \Theta^*$  — углы расхождения в ЛСК;  $M^*$  — шторм M от момента начала диссипации до его полного разрушения;
- б) мезомасштабная конвективная структура (ММКС) процесса в виде векторов эволюции. Построено с применением ЛСК в масштабе рис. 3 а.

Fig. 3. Trajectories of the storms on April 3, 1964 in the Eulerian Coordinate System (ESC) [20]:

- а) the names of the storms are preserved and denoted by vectors of different colors;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — angles of divergence of storm trajectories after their splitting (ESC);  $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*, \Theta^*$  (LSC);  $M^*$  — storm M from the beginning of dissipation to its complete destruction;
- б) Mesoscale Convection Structure (MCS) of the process as vectors of evolution. Constructed using the LCS on the scale of Fig. 3 а.

технология реализована в АСУ-МРЛ в виде «Процедуры Лагранжа» [16] — т. е. автоматически в режиме реального времени строится интегральная картина (ИК) ГПП, позволяющая прогнозировать направление, интенсивность развития штормов, места их возможного разделения, объединения, диссипации, излома траекторий и многое другое.

Обратим внимание на области, выделенные квадратами с черной пунктирной окантовкой. В первом из них мы видим (рис. 3 а) место разделения шторма RA (от него отделился шторм S), а на рис. 3 б — это же место в ММКС, которое мы называем узлом. Узел — это место, из которого исходят разделяющиеся штормы, в которое входят и затем объединяются штормы, и в котором они испытывают «излом траектории» или диссипируют. В данном случае в этом месте произошло разделение шторма RA, и в непосредственной близости от которого несколько раньше (до 19.00) разрушился шторм M ( $M^*$ ), заранее обозначая место узла, как

места в ММКС, где может произойти диссипация. Кроме того, мы можем отметить, что в этом узле направления эволюции штормов RA и S практически противоположны (сравните со штормами 1 и 2 на рис. 6 *г* для ГПП от 18.06.2016). Углы расхождения в ЭСК и ЛСК сильно отличаются.

Во втором интересном месте (квадраты 2 и 2\*), на рис. 3 *а*, в 14.30 образовался шторм M, который, смещаясь к северо-востоку, в дальнейшем приблизился к узлу (1-й квадрат), в районе которого он разрушился. Важно, что это место также является узлом: на рис. 3 *б* (2-й квадрат) мы видим, как шторм RB, подошедший к узлу в 16.20 (т. е. только через 1 ч 50 мин после шторма M), и имея направление движения такое же, как и шторм M, «вдруг» резко меняет свое направление движения, т. е. испытывает излом траектории. Такое «поведение», как мы упоминали, характерно в районе узлов ММКС.

Еще одно важное наблюдение. Шторм RB, отделившись от шторма RC в 15.00, будучи лево-движущимся штормом, подойдя к узлу 2, резко изменив направление, становится, если сравнить с направлением вектора ведущего потока, право-движущимся штормом и, значит, поменял свое вращение на обратное. В то же время шторм RC, являясь правосторонним, по мере своего продвижения становится левосторонним, т. е. полностью меняет направление вращения и в 17.20 объединяется со штормом RB. И эти два явления — превращение право-движущегося шторма (циклоническое вращение) в лево-движущийся (антициклоническое вращение) и наоборот — происходили без разделения штормов.

Обратимся еще к одному ГПП, имевшему место 19.12.2002, зародившегося над восточным побережьем Китая в виде трех облачных систем, названных авторами [21] северной, центральной и южной (рис. 4). Все три системы были представлены циклоническими суперячейками (N1, C1, S1), которые, смещаясь на восток, неоднократно разделялись. Процесс отслеживался более 8 ч и, смещаясь над Тайваньским проливом, достиг острова Тайвань, после чего разрушился. Для нас этот задокументированный процесс интересен тем, что демонстрирует факт, когда правые отделившиеся штормы оставались суперячейками, а левые — мультячейковыми штормами. Более того, некоторые мультячейковые штормы также разделялись. Многие штормы неоднократно испытывали изломы траекторий, меняя направление и скорость движения.

К сожалению, отсутствие данных о ведущем потоке не позволили нам провести анализ этого ГПП с точки зрения его мезомасштабной структуры, как это было сделано с ГПП от 3.04.1964 (рис. 3), однако мы можем констатировать, что и в этом случае имеют место узлы ММКС. Некоторые данные (углы расхождения, соотношения скоростей лево- и право-движущихся штормов, частота разделений, изломы траекторий) помогут нам в анализе существующей гипотезы о механизмах разделения штормов.

На рис. 4 *а* и 4 *б* все три облачные системы (N, C и S) специально, для удобства анализа, разнесены авторами [21] в пространстве. Мы же, напротив, на рис. 4 *г*, с учетом взаимного расположения штормов в момент начала наблюдения за ними в 14.55 (рис. 4 *в*), объединили все три облачные системы в одну общую картину. Даже выделив разными цветами эти облачные системы и отследив траектории

штормов только в виде векторов, которые соединяют максимумы Z, отбросив всю сложную картину радиоэха целиком, мы получаем тот самый «хаос» в картине ГПП, о котором упоминали в начале статьи. Если исходить из существующей практики инерционных по своей сути подходов к краткосрочным прогнозам ГПП на основе радарных наблюдений и к этому добавить ситуацию цейтнота, в которой

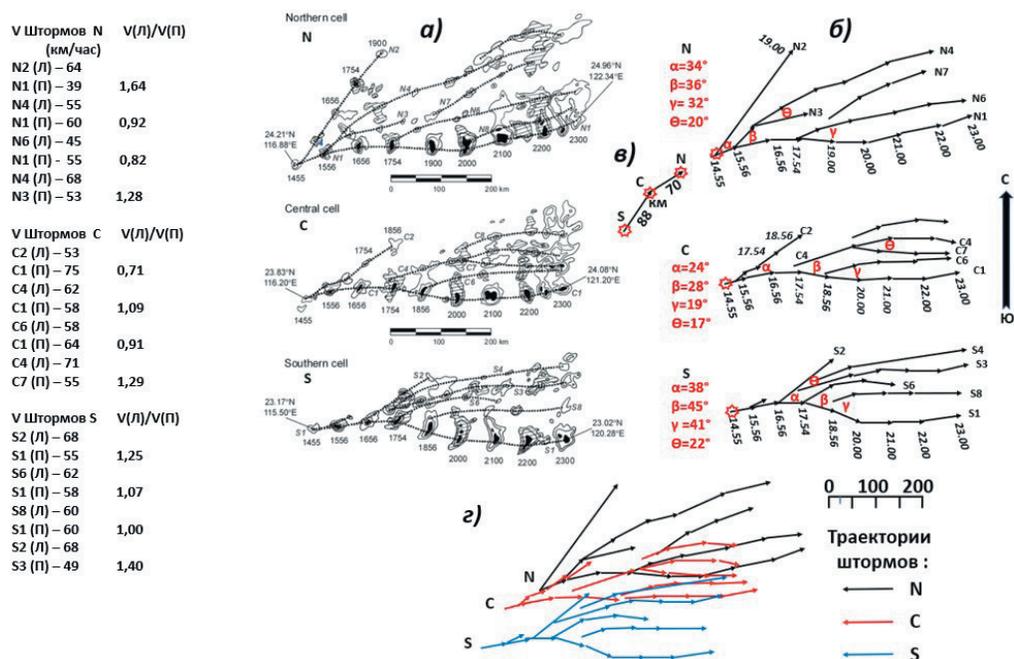


Рис. 4. Радиолокационная картина суперячейкового процесса от 19 декабря 2002 г. над восточным побережьем Китая, Тайваньским проливом и островом Тайвань.

- а) Радиоэхо дано в изоконтурах 30, 40 и 50 (зачернены) dbZ, пунктиром обозначены траектории трех суперячеек (N1 — северной, C1 — центральной и S1 — южной) и сопутствовавших им штормов [21].
- б) Траектории штормов изображены в виде векторов;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — углы расхождения траекторий штормов после их разделения.
- в) Красными звездочками отмечены положения суперячеек N1, C1 и S1 в 14.55, черные отрезки, их соединяющие, показывают расстояние и направление между ними в этот момент.
- г) Траектории штормов с учетом их истинного положения на местности.

Fig. 4. Radar picture of the supercell process from December 19, 2002 over the east coast of China, the Taiwan Strait, and Taiwan Island.

- а) Radio-echoes are given in isocontours 30, 40, and 50 (blacked out) dbZ, the dashed lines indicate the trajectories of 3 supercells (N1 — northern, C1 — central, and S1 — southern) and accompanying storms [21].
- б) The trajectories of the storms are depicted as vectors;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  are the angles of divergence of the storm trajectories after their separation.
- в) The red stars mark the positions of supercells N1, C1, and S1 in 14.55, the black segments connecting them show the distance and direction between them at that moment.
- г) The trajectories of the storms, taking into account their true positions on the ground.

постоянно находятся оперативные прогнозисты и специалисты в системе ПГЗ, то можно констатировать практическую невозможность принятия обоснованных управляющих решений в подобных ситуациях.

Теперь мы обратимся к нашим исследованиям разделения штормов, для чего рассмотрим ГПП за 18.06.2016 в Республике Молдова, представленный на рисунках 5 и 6. Наблюдения начались в 15.14 и продолжались более 9 ч. Это был мощный градовый процесс, в котором более чем из двух десятков штормов выпадал град. Два шторма (1 и 2) разделились. Три из них (штормы 1П, 1Л, 2П) давали град с сильным ущербом. Аббревиатура «П» и «Л» означает право- или лево-движущиеся после разделения шторма.

Шторм 1П (см. рис. 5) временами имел все признаки суперячейки: высокие параметры отражаемости  $Z_{\max} \geq 70$  dbZ;  $H_{45\text{dbZ}} > 12\text{—}13$  км; характерный стационарный навес; крюк-эхо на нижних уровнях; шип-радиоэха (эффект тройного переотражения от мощного града); хорошо выраженная V-сигнатура — с большой вероятностью свидетельствовали о наличии мезоциклона. Заметим, что шторм 1 до разделения был явно мультячейковым и только примерно через час после разделения стал суперячейкой.

Шторм 1Л после отделения также имел высокие параметры, близкие по параметрам  $Z_m$ ,  $H_{45}$  и проявлению шип-радиоэха к шторму 1П, однако некоторые параметры, все же, «не дотягивали» до суперячейки.

Шторм 2П (см. рис. 5) после разделения постепенно усиливался и в отдельные моменты показывал параметры, свойственные суперячейкам, особенно это касается мощного навеса радиоэха, который хорошо виден на вертикальных сечениях рис. 5 *p, c, t, y*.

Шторм 2Л, просуществовав после разделения около часа, при максимальном развитии не достиг градовой стадии.

Некоторые аспекты этого ГПП были нами исследованы в работе [28], где, в частности, было показано, что *направление эволюции мощных штормов со стационарирующим навесом совпадает с направлением линии фидерных (питающих шторм) облаков, то есть обновление, развитие штормов идет в направлении  $\vec{V}_s$* . Именно это мы видим на рис. 6 *z*.

Сделаем маленькое пояснение к рис. 5 *a\** и 5 *б\**, которое относится к введенной нами поправке в значения  $Z_m$  (темные столбики на графике), связанной с удалениями исследуемых штормов, превышающими 80 км от радара. Согласно [29], эти поправки из-за неполного заполнения зондируемого объема достигали в нашем случае 6 дБ и постепенно, по мере приближения к удалению 80 км, уменьшались до нуля. Введение поправок существенно скорректировало представление о мощности штормов 1П и 1Л в соответствующие периоды времени.

Фрагмент кинематики рассматриваемого нами ГПП представлен на рис. 6. Углы расхождения для разделившихся штормов 1 и 2 составляют  $58^\circ$  и  $56^\circ$  соответственно, скорости движения штормов и их попарные соотношения скоростей также близки и составляют 1,48 и 1,56. Траектории сравниваемых штормов почти параллельны друг другу. Сходность указанных характеристик штормов тем более примечательна, поскольку их разделяет по времени 190 мин.

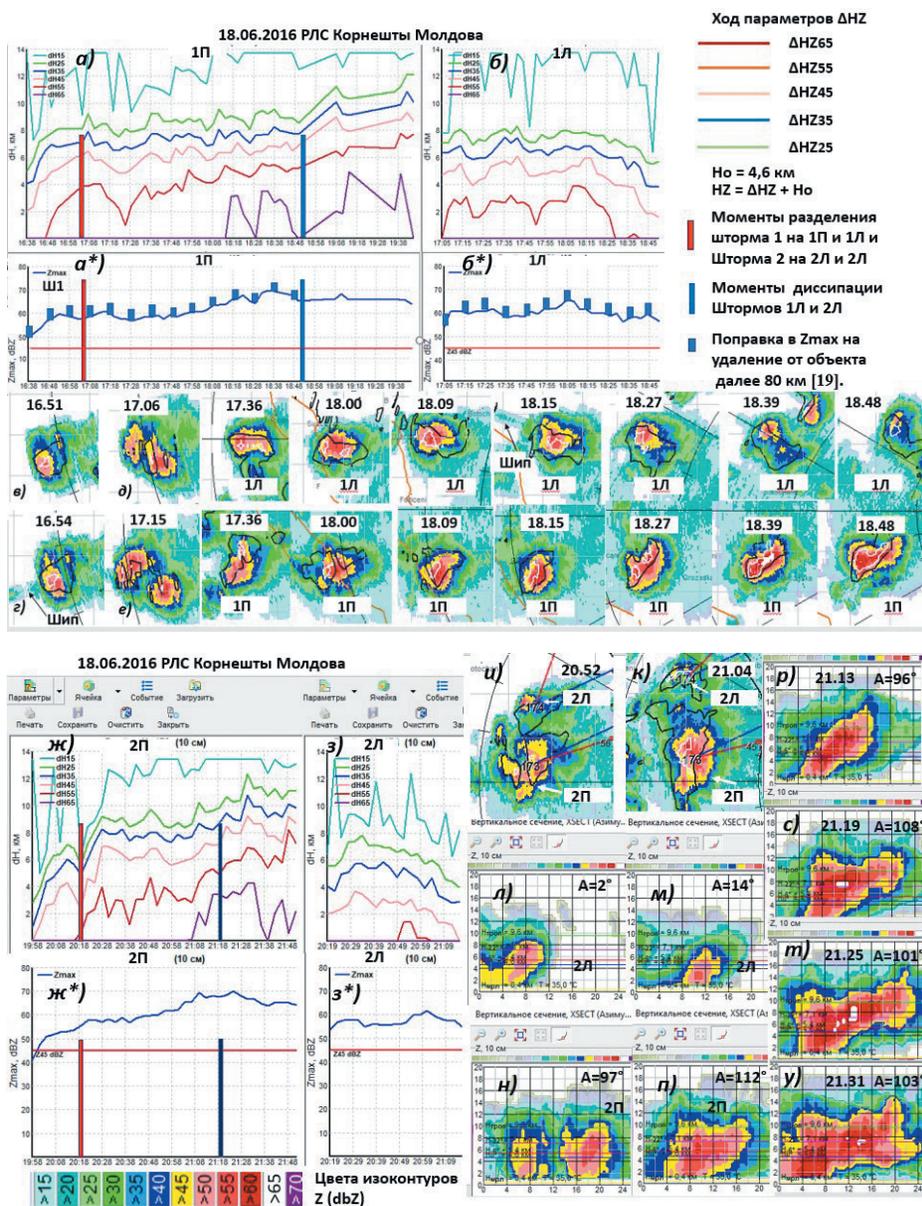


Рис. 5. Фрагмент грозоградового процесса от 18.06.2016. Республика Молдова.

Ход параметров разделившихся штормов (а, а\*, б, б\*, ж, ж\*, з, з\*), горизонтальные (в, г, д, е, и, к) и вертикальные сечения (л, м, н, п, р, с, т, у).

Fig. 5. A fragment of the Thunderstorm Process from 18.06.2016. Republic of Moldova.

Progress of parameters of the split storms (а, а\*, б, б\*, ж, ж\*, з, з\*), horizontal (в, г, д, е, и, к) and vertical sections (л, м, н, п, р, с, т, у).

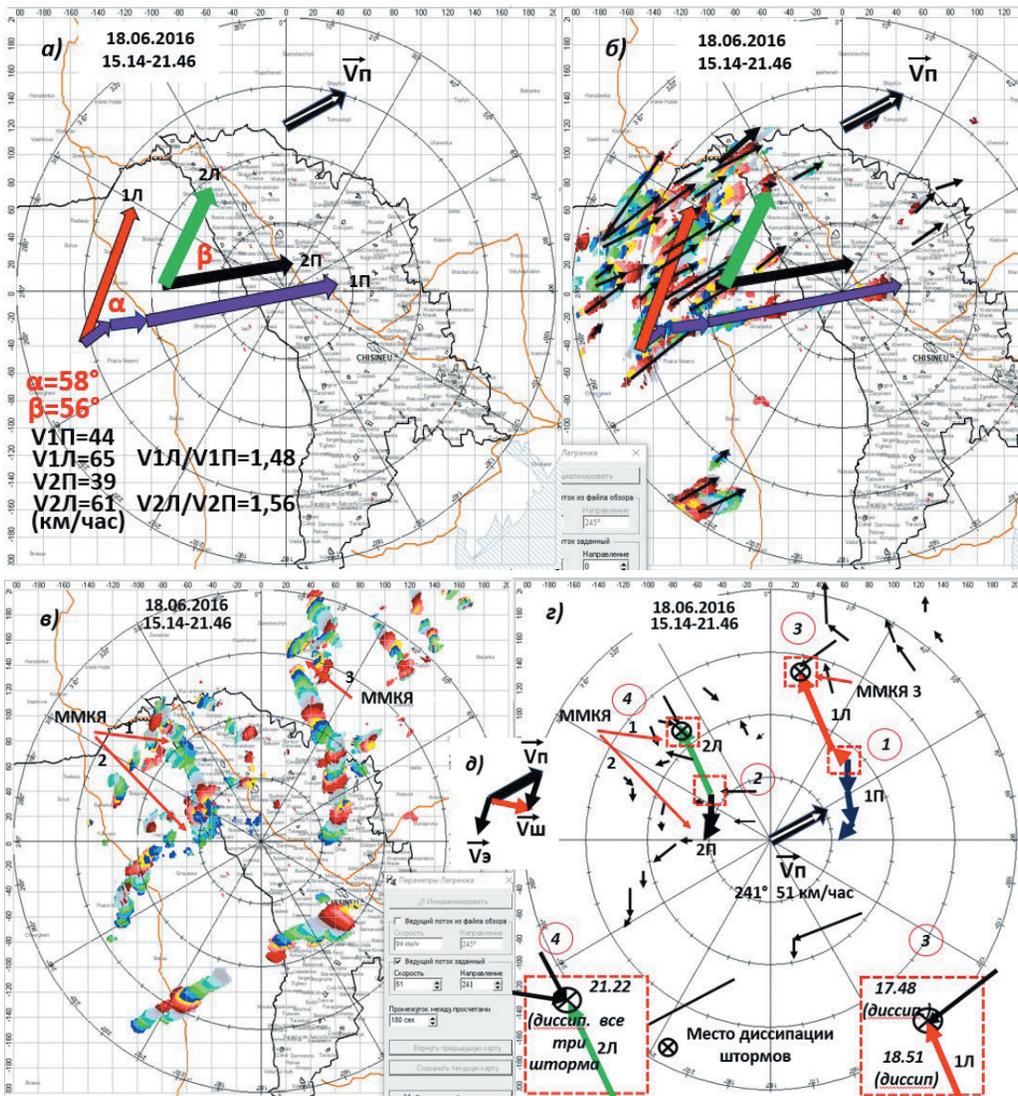


Рис. 6. ГПП за 18.06.2016 в Республике Молдова:

а) траектории разделившихся штормов; б) траектории всех штормов; в) мезомасштабная структура ГПП, полученная с помощью «Процедуры Лагранжа»; г) мезомасштабная структура ГПП в виде векторов; д) схема получения векторов движения шторма.

Сетка 20 на 20 км. Круги проведены через 50 км.

Маленький круг с крестиком — место диссипации штормов 1Л и 2Л.

Fig. 6. GHP for 18.06.2016 in the Republic of Moldova:

а) trajectories of split storms; б) trajectories of all storms; в) mesoscale GHP structure obtained using the “Lagrange procedure”; г) mesoscale GHP structure in the form of vectors; д) scheme of obtaining storm motion vectors.

The grid is 20 by 20 km. Circles are drawn every 50 km.

The small circle with a cross is the place of dissipation of storms 1L and 2L.

На рис. 6 в представлена интегральная картина ГПП за период с 15.14 по 21.46 (время местное) на высоте горизонтальных сечений радиоэха с  $Z \geq 45\text{dbZ}$ , которая соответствует изотерме  $-6^\circ\text{C}$  ( $H_{-6} = 5,4$  км), полученной в режиме реального времени с применением ПЛ. Цвета радиоэха меняются с частотой объемного обзора РЛС, т. е. каждые 3,5 мин. На рис. 6 г представлена та же картина ГПП, что и на рис. 6 в, только в виде векторов эволюции.

На ИК мы видим три ММКЯ, внутри которых радиоэхо отсутствовало в течение всего ГПП, что означает нисходящие движения, а по внешним контурам — конвективные штормы, что свидетельствует о наличии восходящих движений. Размеры ММКЯ, определяемые как диаметр круга, площадь которого соответствует площади внутренней области ММКЯ, границы которой проходят через центры радиоэха, ее составляющих. 1-я ММКЯ имеет диаметр 28 км, 2-я — 35, 3-я — 28. Так же четко обозначены мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ): две на юге, ориентированные почти по  $\vec{V}_n$ , и несколько ММКЛ на северо-востоке от РЛС, ориентированных параллельно друг другу и штормам Л1 и Л2.

Квадратами с красной окантовкой выделены характерные места, связанные с разделением штормов 1 (квадрат 1) и 2 (квадрат 2), а также с местами диссипации штормов Л1 (квадрат 3) и Л2 (квадрат 4) в узлах ММКЯ. Разделившиеся штормы двигались почти в противоположных направлениях (имеются в виду траектории по  $\vec{V}_s$ ), что в точности напоминает картину со штормами RA и S на рис. 3.

Шторм Л1 диссипировал в 18.51, подойдя к тому месту на ИК, где за 63 мин до этого диссипировал другой шторм, двигавшийся к этому же месту с северо-востока. Таким образом, этот шторм обозначил место узла 3 ММКЯ.

В квадрате 4 показан фрагмент узла 1 ММКЯ, в котором одновременно разрушились три шторма, один из них — шторм Л2.

Анализ процесса разделения двух штормов (Ш1 и Ш2), их последующего движения и развития в противоположных направлениях показал, что это происходит именно *через обновление штормов на противоположных флангах* (рис. 6 в, г).

Важным для понимания роли мезомасштабных структур являются места диссипации штормов, которые совпадают с узлами ММКЯ (см. рис. 3, рис. 6 в, г и рис. 8 а — Ш4 и Ш2). Диссипация штормов в этих местах показывает, что «конвективный ресурс» исчерпан. Самое важное в этом — ситуация легко прогнозируется, если опираться на закономерности формирования ММКЯ.

Теперь рассмотрим небольшой, но очень важный фрагмент ГПП от 22.06.2019 в Молдове. Речь идет о довольно мощном ГПП, в котором было прослежено (в радиусе наблюдения радаров до 100 км) 162 шторма, из них 61 давал град на земле. Отдельные штормы давали град с сильным ущербом. ГПП развивался в малоградиентном поле повышенного давления, с малыми ветрами по всей толще тропосферы, сдвиг ветра с высотой был менее 1 м/сек/км. Скорость ведущего потока по зонду за 12 UTC составляла 9,7 км/ч, а за 18 UTC — 5,5 км/ч (на годографах эти скорости обозначены красным кружком (рис. 7).

Обычно, при внутримассовых процессах, хорошо проявляются ММКС в виде полигональных мезомасштабных конвективных ячеек — ММКЯ [2], что в этом случае подтвердилось в полной мере.

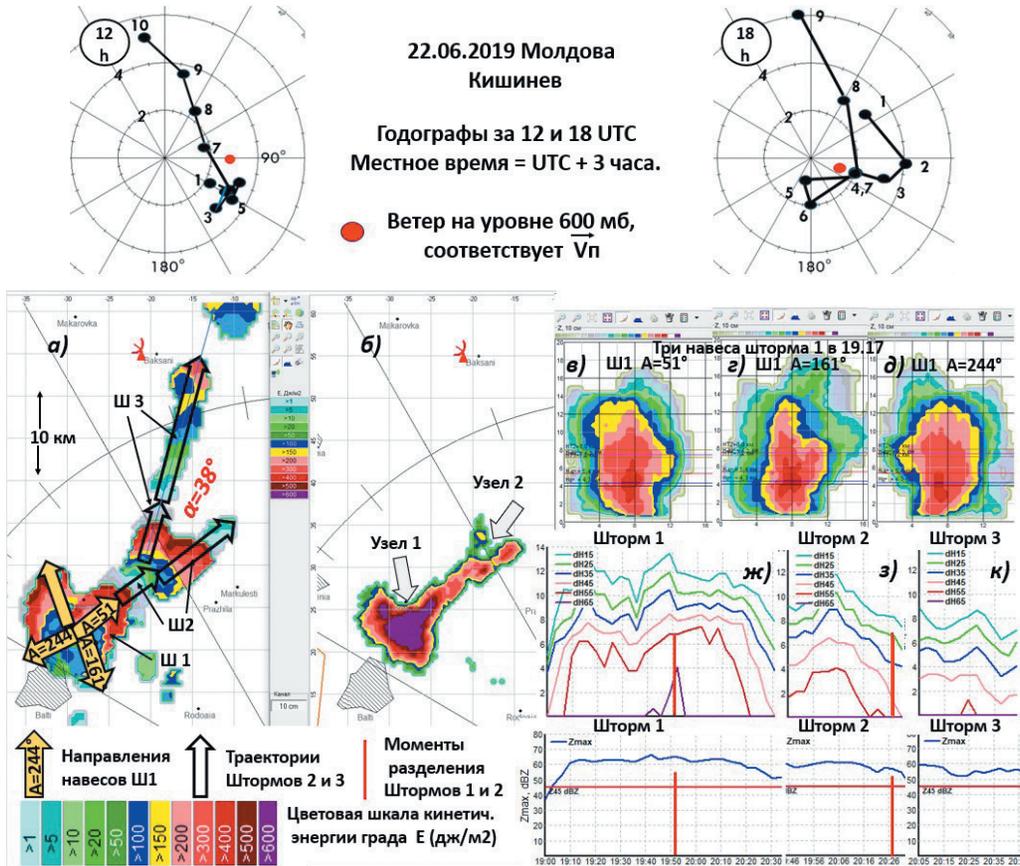


Рис.7. Фрагмент грозоградового процесса от 22.06.2019. Молдова.

Верхние рисунки — годографы по данным радиозондирования за 15 и 21 ч местного времени, г. Кишинев, круги проведены через 2 м/сек. а) Траектории штормов 1, 2 и 3. б) Градовая дорожка штормов (карта кинетической энергии града): узлы 1 и 2. в—д) Вертикальные сечения шторма 1 в 19.17 через навесы радиоэха. ж—к) Ход параметров штормов (обозначения см. на рис. 5).

Fig. 7. Fragment of the TSP from 22.06.2019. Moldova.

The upper drawings are travel time curves based on radiosonde data for 15 and 21 hours local time, Chisinau, circles are drawn in 2 m/sec. а) Trajectories of storms 1, 2, and 3. б) Hail track of storms (hail kinetic energy map): nodes 1 and 2. в—д) Vertical cross sections of storm 1 at 19.17 through the radio echo canopies. ж—к) Progress of storm parameters (notations as in Fig. 5).

Подробному анализу мезомасштабной структуры этого ГПП будет посвящено дополнительное исследование, но уже сейчас мы разберем небольшой, но принципиально важный, фрагмент этого ГПП, связанный с уникальным эпизодом разделения штормов.

Рассмотрим рис. 8 ж, из которого следует, что шторм 1 (в дальнейшем Ш1, Ш2 и т.д.) просуществовал (во всяком случае в стадии, когда его  $Z_m$  превышала

45 dbZ) 95 мин и имел  $Z_m > 65\text{dbZ}$ , параметры  $\Delta H_{45}$  и другие, свидетельствующие о наличии града в облаке и выпадении интенсивного града на землю. Это подтверждается рис. 7 б, где представлена градовая дорожка трех штормов — Ш1, 2, 3 (карта кинетической энергии града). Ш1 находился в узле 1 (рисунки 7 б и 8 б) в течении 95 мин и почти все это время производил град с ущербом. Обычно, если шторм разделяется, мы видим две расходящиеся из узла ММКЯ траектории. В данном случае этот Ш1 также разделился, однако, отделившийся от него Ш2, сразу же начал движение к северо-востоку со скоростью 14 км/ч, а Ш1 *продолжал оставаться на месте*. Более того, параметры Ш1 после разделения только увеличились (см. рис. 7 ж), и выпадение наиболее интенсивного града приходится как раз на этот период. Ш1 просуществовал после разделения еще около 40 мин.

Итак, мы оказались свидетелями *трех уникальных фактов*. Первый — градовый долгоживущий *шторм* (время жизни при  $Z_m \geq 45\text{dbZ}$  — 95 мин), находящийся в узле ММКЯ и *не покидающий его на протяжении всего времени своего существования*.

Второй, мультячейковый шторм, *не только разделился, но и продолжал развиваться*. Ш2, отделившийся от «материнского» Ш1, давая умеренный град, через некоторое время также разделился и, продолжив свое движение на северо-восток, вскоре диссипировал. Ш3, отделившийся от Ш2, отклонился влево на  $38^\circ$  по отношению к траектории Ш2, продолжил свое движение со скоростью 28 км/ч, т. е. в 2 раза быстрее, чем Ш2.

Третий уникальный факт заключается в том, что разделение этих двух мультячейковых штормов происходило в малоподвижной, бездвиговой тропосфере. Это означает, что условия для разделения штормов отсутствуют, если исходить из теории, изложенной в [10—13, 17—19].

Теперь продолжим анализ этого ГГП с точки зрения места рассматриваемых штормов в интегральной картине. Для этого обратимся к рис. 8 а, где векторами различных цветов изображена эволюция штормов, полученная в Лагранжевой системе координат. Следует обратить внимание на то, что к моменту образования Ш1 ММКС уже сложилась: штормы, обозначенные светло-зеленым с красной окантовкой, «заняли» свое место в структуре, начиная с 14.18 до 17.13. Еще один шторм — это Ш5 (синяя стрелка), возникший в 15.56 и разрушившийся к 16.58, «занял» свое место в ИК к востоку от Ш1. Таким образом, северная, западная (штормы зеленого цвета) и восточная (шторм 5 синего цвета) части ИК сложились из «фантомов» штормов (следов в виде радиоэха от осадков), т. е. штормов, которые к моменту рассматриваемых событий, давно диссипировали. На этом фоне, в «тесном» пространстве в 25 на 17 км и начинается развитие Ш1.

С учетом изложенного рассмотрим «поведение» Ш1 и обратимся к рис. 7. Ход параметров показывает, что Ш1 бурно развивался, активно «искал» свой ресурс в разных направлениях: например, в 19.17 мы отмечаем одновременно сразу три направления навеса. В данном случае навес определяет направление, с которого шторм получает обновление в виде фидерных облаков. Из вертикальных сечений (рис. 7 в, г, д) видно, что один из навесов, обращенный на запад ( $A = 244^\circ$ ), в дальнейшем не получает развития; второй навес, южный ( $A = 161^\circ$ ), также

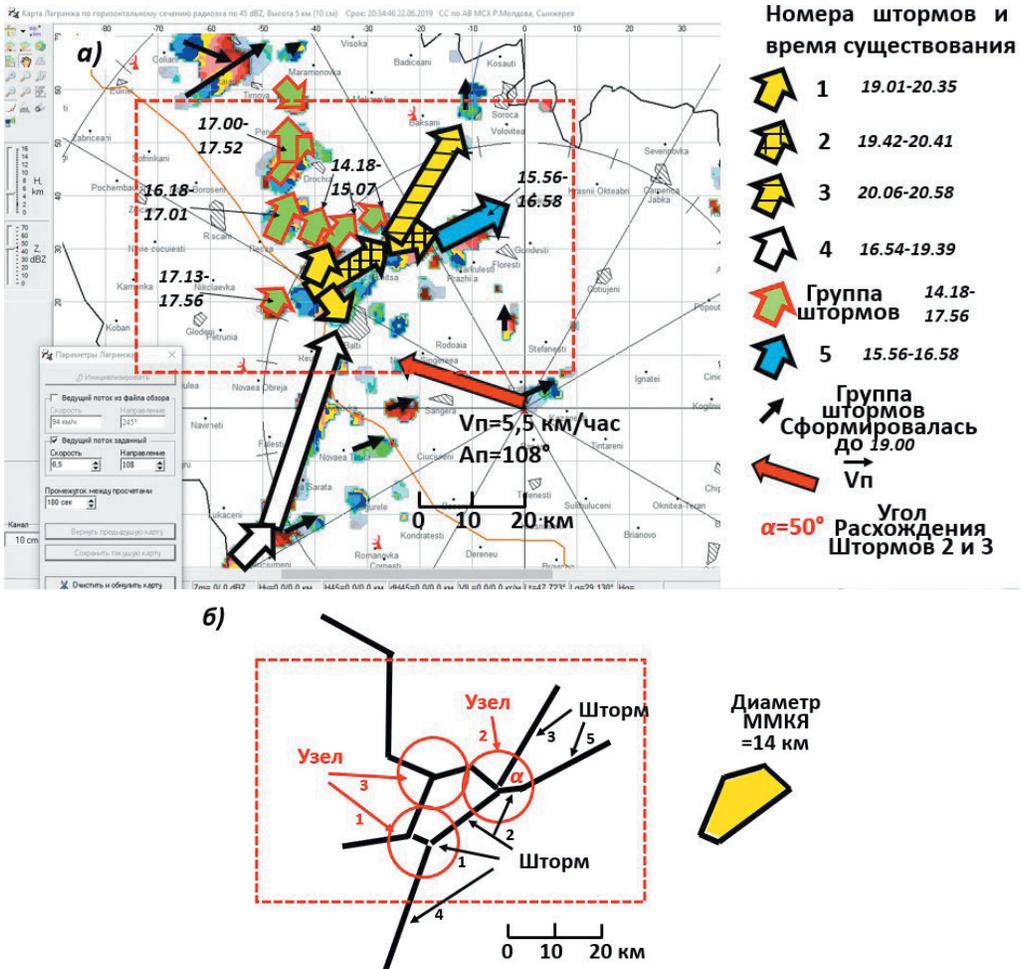


Рис. 8. Фрагмент интегральной картины ГП от 22.06.2019 в Молдове за период с 14.10 до 20.58, полученный с помощью процедуры Лагранжа.

а) Интегральная картина грозоградового процесса в виде векторов эволюции: показано разделение шторма 1, а затем шторма 2. б) Интегральная картина грозоградового процесса в виде структуры (толстые черные линии, проведенные через центры радиоэха и их траектории).

Fig. 8. Fragment of the Integral Picture of the Thunderstorm Process from 22.06.2019 in Moldova for the period from 14.10 to 20.58, obtained with the Lagrangian Procedure.

а) Integral picture of the Thunderstorm Process in the form of evolution vectors: the splitting of storm 1 and then storm 2 is shown. б) Integral picture of the Thunderstorm Process in the form of structure (thick black lines drawn through the radio-echo centers and their paths).

не развивается; третий, северо-восточный, пока тоже не развивается. Были также моменты, когда ШП «делал попытки» развития к северу (на рис. 7 не указаны), но и они не привели к началу движения шторма в этом направлении. Можно сделать

предположение, и наш многолетний опыт показывает, что это так: к западу, северу и к югу от Ш1 *конвективный ресурс, заложенный в ММКЯ, был исчерпан* уже за нескольких часов до этого. Поэтому тенденция развития к северо-востоку, проявлявшаяся постоянно, не получала развития до тех пор, пока не произошло разделения Ш1. После этого несколько позже разделился уже Ш2: отделившийся от него лево-движущийся Ш3 «направился» ровно в том единственном направлении, которое было свободным — между штормами, изображенными зелеными стрелочками, и для Ш5 (изображен синим) оставался узкий проход в 10—12 км.

На рис. 8 б вся описанная выше коллизия отображена в виде черных линий, соединивших центры радиоэха. В результате мы можем видеть ММКЯ, диаметр которой составляет около 14 км (диаметр круга площадью, равной внутренней части ММКЯ, которая закрашена желтым). Внутри этой области за все время ГПП радиоэхо не отмечалось (область нисходящих движений), а по краям *в разное время* радиоэхо было отмечено (область восходящих движений).

### Выводы

Проведенное исследование привело к следующим выводам:

— явление разделения мощных конвективных штормов — только одно из многих проявлений проникающей конвекции, зарождение, формирование и реализация которой происходит в различных формах мезомасштабных структур, которые, по нашему мнению, управляют всеми процессами в штормах;

— впервые установлено, что мультячейковые штормы разделяются в малоподвижной и, практически, безсдвиговой тропосфере (сдвиг ветра с высотой менее 1 м/сек/км);

— впервые показано, что механизм разделения штормов и последующего развития лево- и право-движущихся штормов (с вращением восходящего потока или без его вращения), связан с положением конвективного шторма на определенном элементе мезомасштабной конвективной структуры (чаще всего — в узле);

— впервые установлено, что разделяющиеся конвективные штормы сохраняют направления своего движения многие часы за счет обновления на разных флангах;

— другие феномены — изломы траекторий штормов и места их диссипации, связанные с узлами ММКС, углы расхождения штормов, скорости эволюции (обновления) конвективных штормов также зависят от положения штормов на элементах ММКС и объясняются их свойствами;

— многие штормы становятся суперячейками после разделения шторма;

— все разделявшиеся штормы, до разделения были мощными (дающими сильный град и другие, иногда катастрофические явления — торнадо, сильные ветры и осадки), но не все отделившиеся штормы становились мощными.

### Список литературы

1. *Orlanski I. A rational division of scales for atmospheric processes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975. Vol. 56. P. 527—530.*

2. Старостин А.Н., Лившиц Е.М., Швецов В.С. Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков в Молдавии // *Метеорология и Гидрология*. 1983. № 10. С. 55—59.
3. Лившиц Е.М., Петров В.И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть I. Основные векторы движения и их соотношение в мощных градовых штормах // *Труды Всероссийской открытой конференции по ФО и АВ на гидрометеорологические процессы*. Нальчик, 2021. С. 192—198.
4. Browning K.A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds // *J. Atmos. Sci.* 1964. Vol. 21, № 6. P. 634—639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:AAPTWS>2.0.CO;2.
5. Fujita T.T. Formation and steering mechanisms of tornado cyclones and associated hook echoes. // *Mon. Wea. Rev.* 1965. Vol. 93, № 2. P. 67—78. doi: 10.1175/1520-0493(1965)093<0067:FAS-MOT>2.3.CO;2.
6. Goldman J.L. The Role of the Kutta-Joukowski Force in Cloud Systems with Circulation // *ESSA Technical Note*. 48. NSSL. 1966. Vol. 27. P. 21—34.
7. Harrold T.W. Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations // *ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29*. 1966. P. 1—8.
8. Achemeier G.L. Some observations of splitting thunderstorms over Iowa on August 25—26, 1965 // *Preprints, Sixth Conf. on Severe Local Storms, Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc.* 1969. P. 89—94.
9. Zeidler J.W., Bunkers M.J. Operational forecasting of supercell motion: Review and case studies using multiple datasets // *Natl. Wea. Dig.* 2005. Vol. 29 (1). P. 81—97.
10. Klemp J.B., Wilhelmson R.B. Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting // *J. Atmos. Sci.* 1978. Vol. 35. P. 1097—1110. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1097:SORALM>2.0.CO;2.
11. Wilhelmson R.B., Klemp J.B. A numerical study of storm splitting that leads to long-lived storms // *J. Atmos. Sci.* 1978. Vol. 35. P. 1974—1985. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1974:ANSOSS>2.0.CO;2.
12. Weisman M.L., Klemp J.B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy // *Mon. Wea. Rev.* 1982. Vol. 110. P. 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
13. Rotunno R., Klemp J.B. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion // *Mon. Weather Rev.* 1982. Vol. 110. P. 136—151. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0136:TIO-TSI>2.0.CO;2.
14. Bluestein H.B., McCaul E.W., Byrd G.P., Walko R.L., Davies-Jones R. An observational Study of splitting Convective Clouds // *Mon. Weath. Rev.* 1990. Vol. 118, № 6. P. 1359—1370. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118.0.co;2.
15. Weaver J.F., Nelson S. P. Multiscale aspects of thunderstorm gust fronts and their effects on subsequent storm development // *Mon. Wea. Rev.* 1982. Vol. 110. P. 707—718.
16. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation // *Mon. Weather Rev.* 1981. Vol. 109. P. 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
17. Klemp J.B. Dynamics of tornadic thunderstorms // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987. Vol. 19. P. 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
18. Stull R. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmosphere Science*. Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 2016. 924 p.
19. Абушаев М.Т., Абушаев А.М., Котелевич А.Ф., Супота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормоповещения и активного воздействия на облачные процессы // *Тр. XXVII Всерос. симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред»*. СПб., 2011. С. 211—225.
20. Charba J., Sasaki Y. Structure and Movement of the Severe Thunderstorms of 3 April 1964 as Revealed from Radar and Surface Mesonetwork Data Analysis // *J. of the Meteorological Society of Japan*. 1971. Vol. 49, No. 3. P. 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3\_191.
21. Wang C.-C., Tai-Jen Chen G., Yang S.-C., Tsuboku K. Wintertime Supercell Thunderstorms in a Subtropical Environment: Numerical Simulation // *J. Monthly Weather Review*. 2009. Vol. 137, Issue.7. P. 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.

22. *Brown R.A., Meitin R.J.* Evolution and morphology of two splitting thunderstorms with dominant left-moving members // *Monthly Weather Review*. 1994. Vol. 122. P. 2052—2067. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<2052:EAMOTS>2.0.CO;2.
23. *Grasso L.D., Hilgendorf E.R.* Observation of a severe left moving thunderstorm // *Weather and Forecasting*. 2001. Vol. 16, No. 4. P. 500—511. doi: 10.1175/1520-0434(2001)016<0500:OOASLM>2.0.CO.
24. *Graham R., Staudenmaier M.Jr.* The Severe Weather Event of 18 June 1997: An Example of splitting Supercells // *Western Region Technical Attachment*. 1997. Vol. 97-39. P. 10.
25. *Carbunaru D., Stefan S., Sasu M., Stefanescu N.* Analysis of Convective Thunderstorm Split Cells in South-Eastern Romania // *Int. J. of Atmospheric Sciences*. 2013. ID 162541. P. 1—19. doi: 10.1155/2013/162541.
26. *Weaver J.F.* Storm motion as related to boundary-layer convergence // *Mon. Wea. Rev.* 1979. Vol. 10, No. 107. P. 612—619. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0612:SMARTB>2.0.CO;2.
27. *Weaver J.F., Knaff J.A., Gary B., Wade S., Daniels J.M.* Satellite Observations of a Severe Supercell Thunderstorm on 24 July 2000 Made during the GOES-11 Science Test // *Weather and Forecasting*. 2002. Vol. 17(1). P. 124—138. doi: 10.1175/1520-0434(2002)017<0124:SOOASS>2.0.CO;2.
28. *Лившиц Е.М., Петров В.И.* Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть II. Результаты исследования. Выводы // *Труды Всероссийской открытой конференции по ФО и АВ на гидrometeorологические процессы*. Нальчик, 2021. С. 198—204.
29. *Абишаев М.Т., Абишаев А.М., Барекова М.В., Малкарова А.М.* Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик, 2014. С. 500.
30. *Старостин А.Н.* Классификация типов эволюции кучево-дождевых облаков // *Активное воздействие на атмосферные процессы в Молдове*. Кишинев, 1992. С. 58—74.
31. *Starostin A., Abdoullaev S., Nunes A.B.* Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares // *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro, 2000. P. 1990—1995.
32. *Starostin A., Kneib R.* Tempestades com trajetórias de linha quebrada // *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro, 2000. P. 2053—2056.

### *References*

1. *Orlanski I.* A rational division of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1975, 56: 527—530.
2. *Starostin A.N., Livshits E.M., Shvetsov V.S.* Mesoscale structure of radio echo fields of convective clouds in Moldova. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1983: 10, 55—59. [In Russian].
3. *Livshits E.M., Petrov V.I.* Radar detection of the location of the feeding cloud line. Part I. Main motion vectors and their relation in powerful hail storms. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy*. Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes. Nalchik, 2021: 192—198. [In Russian].
4. *Browning K.A.* Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.* 1964, 21, 6: 634—639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:AAPTWS>2.0.CO;2.
5. *Fujita T.T.* Formation and steering mechanisms of tornado cyclones and associated hook echoes. *Mon. Wea. Rev.* 1965, 93, 2: 67—78. doi: 10.1175/1520-0493(1965)093<0067:FASMOT>2.3.CO;2.
6. *Goldman J.L.* The Role of the Kutta—Joukowski Force in Cloud Systems with Circulation. ESSA Technical Note 48. NSSL. 1966, 27: 21—34.
7. *Harrold, T.W.* Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations. ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29. 1966: 1—8.
8. *Achtemeier G.L.* Some observations of splitting thunderstorms over Iowa on August 25—26, 1965. Preprints, Sixth Conf. on Severe Local Storms, Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc. 1969: 89—94.
9. *Zeitler J.W., Bunkers M.J.* Operational forecasting of supercell motion: Review and case studies using multiple datasets. *Natl. Wea. Dig.* 2005, 29 (1): 81—97.
10. *Klemp J.B., Wilhelmson R.B.* Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.* 1978, 35: 1097—1110. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1097:SORALM>2.0.CO;2.

11. *Wilhelmson R.B., Klemp J.B.* A numerical study of storm splitting that leads to long-lived storms. *J. Atmos. Sci.* 1978, 35: 1974—1985. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1974:ANSOSS>2.0.CO;2.
12. *Weisman M.L., Klemp J.B.* The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.* 1982, 110: 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
13. *Rotunno R., Klemp J.B.* The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Weather Rev.* 1982, 110: 136—151. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0136:TPIOTS>2.0.CO;2.
14. *Bluestein H.B., McCaul E.W., Byrd G.P., Walko R.L., Davies-Jones R.* An observational Study of splitting Convective Clouds. *Mon. Weath. Rev.* 1990, 118, 6: 1359—1370. doi: 10.1175/1520-0493(1990)1182.0.co;2.
15. *Weaver J.F., Nelson S.P.* Multiscale aspects of thunderstorm gust fronts and their effects on subsequent storm development. *Mon. Wea. Rev.* 1982, 110: 707—718.
16. *Rotunno R.* On the evolution of thunderstorm rotation // *Mon. Weather Rev.* 1981, 109: 171—180. doi: org/10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
17. *Klemp J.B.* Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987, 19: 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
18. *Stull R.* *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmosphere Science.* Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 2016: 924 p.
19. *Abshaev M.T., Abshaev A.M., Kotelevich A.F., Sirota N.V.* Automated system of radar information processing for storm warning and active impact on cloud processes. *Tr. XXVII Vseross. Simpoziuma «Radiolokazionnoe issledovaniya prirodnich sred».* XXVII All-Russia Symposium “Radar Investigations of Natural Environments». St. Petersburg, 2011: 211—225. [In Russian].
20. *Charba J., Sasaki Y.* Structure and Movement of the Severe Thunderstorms of 3 April 1964 as Revealed from Radar and Surface Mesonet Data Analysis. *J. of the Meteorological Society of Japan.* 1971, 49, 3: 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3\_191.
21. *Wang C.-C., Tai-Jen Chen G., Yang S.-C., Tsuboku K.* Wintertime Supercell Thunderstorms in a Sub-tropical Environment: Numerical Simulation. *J. Monthly Weather Review.* 2009, 137, 7: 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.
22. *Brown R.A., Meitin R.J.* Evolution and morphology of two splitting thunderstorms with dominant left-moving members. *Monthly Weather Review.* 1994, 122: 2052—2067. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<2052:EAMOTS>2.0.CO;2.
23. *Grasso L.D., Hilgendorf E. R.* Observation of a severe left moving thunderstorm. *Weather and Forecasting.* 2001, 16, 4: 500—511. doi: 10.1175/1520-0434(2001)016<0500:OOASLM>2.0.CO.
24. *Graham R., Staudenmaier M.Jr.* The Severe Weather Event of 18 June 1997: An Example of splitting Supercells. *Western Region Technical Attachment.* 1997, 97-39: 10.
25. *Carbunaru D., Stefan S., Sasu M., Stefanescu N.* Analysis of Convective Thunderstorm Split Cells in South-Eastern Romania. *Int. J. of Atmospheric Sciences.* 2013, ID 162541: 1—19. doi: 10.1155/2013/162541.
26. *Weaver J.F.* Storm motion as related to boundary-layer convergence. *Mon. Wea. Rev.* 1979, 107: 612—619. doi:org/10.1175/1520-0493(1979)107<0612:SMARTB>2.0.CO;2.
27. *Weaver J.F., Knaff J.A., Gary B., Wade S., Daniels J.M.* Satellite Observations of a Severe Supercell Thunderstorm on 24 July 2000 Made during the GOES-11 Science Test. *Weather and Forecasting.* 2002, 17(1): 124—138. doi: 10.1175/1520-0434(2002)017<0124:SOOASS>2.0.CO;2.
28. *Livshits E.M., Petrov V.I.* Radar detection of the location of the feeder cloud line. Part II. Results of the study. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po FO i AV na gidrometeorologicheskie prozessy.* Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes. Nalchik, 2021: 198—204. [In Russian].
29. *Abshaev M.T., Abshaev A.M., Berekova M.V., Malkarova A.M.* *Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu protivogradovykh rabot.* Guidelines for organizing and conducting anti-hail operations. Nalchik: 500 p. [In Russian].
30. *Starostin A.N.* Classification of the types of evolution of cumulonimbus clouds. *Aktivnoe vozdeystvie na atmosferye prozessy v Moldove.* Active influence on atmospheric processes in Moldova. Kishinev, 1992: 58—74. [In Russian].

31. *Starostin A.S. Abdoullaev A.B. Nunes A.B.* Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000: 1990—1995.
32. *Starostin A., Kneib R.* Tempestades com trajetórias de linha quebrada. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000: 2053—2056.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 12.07.2021*

*Принята к публикации после доработки 13.09.2021*

### ***Сведения об авторах***

*Евгений Михайлович Лившиц*, свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия, [evmaleposoru@gmail.com](mailto:evmaleposoru@gmail.com).

*Василий Иванович Петров*, канд. геогр. наук, старший инженер, Специальная служба активных воздействий на гидрометеорологические процессы Республики Молдова (Кишинев).

### ***Information about authors***

*Evgenii Mikhailovich Livshits*, Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, [evmaleposoru@gmail.com](mailto:evmaleposoru@gmail.com).

*Vasilii Ivanovich Petrov*, PhD (Geor. Sci.), Senior engineer, Special Service of Active Influences on Hydrometeorological Processes of the Republic of Moldova (Kishinev).

## **Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградовых процессов с заблаговременностью до пяти суток**

*А.Х. Кагермазов, Л.Т. Созаева*

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт, Нальчик, ka5408@mail.ru

Методами корреляционного анализа проведена оценка степени совпадения значений прогностической стратификации атмосферы с заблаговременностью 24, 48, 60, 84 и 132 ч, полученных из глобальной модели атмосферы GFS NCEP, с фактическими данными аэрологического зондирования на метеостанции «Минеральные воды» Центральной части Северного Кавказа. Выявлено, что последовательное увеличение заблаговременности прогноза метеополей до 132 ч не привело к заметному снижению коэффициентов корреляции между фактическими и прогностическими значениями параметров стратификации атмосферы. Предложен метод оценки градоопасности атмосферной ситуации на основе многомерного дискриминантного анализа по исследованным данным глобальной модели. Проведена оценка успешности метода и показано сохранение его прогностического потенциала для заблаговременности до пяти суток.

*Ключевые слова:* глобальная модель атмосферы, аэрологическое зондирование, заблаговременность, метеорологические параметры, дискриминантный анализ, прогноз опасных явлений.

## **Use of output data of the global model of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with lead time of up to five days**

*A.Kh. Kagermazov, L.T. Sozaeva*

FSBI «High-Mountain geophysical institute», Nalchik, Russia

Nowadays, it has become possible to use the fields of atmospheric meteorological parameters according to the GFS NCEP global model data for predicting dangerous weather phenomena, carrying out anti-hail operations, as well as mathematical modeling of thunderstorm clouds. The legitimacy of their application, instead of the data of actual upper-air sounding, was assessed by the methods of correlation analysis for the «Mineralnye Vody» meteorological station in the Central part of the North Caucasus. The analysis showed that a consistent increase in the lead time of forecasting meteorological fields from 24 to 132 hours did not lead to a noticeable decrease in the correlation coefficients between the actual and predicted values of the atmospheric stratification parameters. As a result, a statistical method was proposed for assessing the hazardousness of the atmospheric situation based on the output of the global model of the atmosphere (discriminant analysis). The method is based on a preliminary calculation of atmospheric parameters known from the existing methods for predicting convection and associated hazardous weather phenomena, and the subsequent selection of the most informative of them using a biserial correlation coefficient. As a result of the analysis, the decision rules and the conjugacy table of the signs «hail» and «without hail» were obtained. The success of the hail forecast, with increasing lead time, is shown to correspond to the accepted criteria for the quality of forecasts. The predictive potential of the proposed method is retained for a lead time of up to five days. The results obtained can be useful in modeling thunderstorm clouds and forecasting hazardous weather phenomena (thunderstorms, hail, etc.).

*Keywords:* global model of the atmosphere, aerological sounding, lead time, meteorological parameters, discriminant analysis, forecast of hazardous phenomena.

**For citation:** *A.Kh. Kagermazov, L.T. Sozaeva. Use of output data of the global model of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with lead time of up to five days. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021, 65: 671—680. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-671-680*

---

## Введение

Опасные явления погоды, связанные с атмосферной конвекцией, вносят существенный вклад в ущерб, причиняемый экономике стран, и имеют выраженную тенденцию к росту, усугубляемую недостаточной их предсказуемостью. Так, в статье «Сильный град обходится дорого, и его трудно предсказать» [1], проведен анализ другой статьи «Влияние климатических изменений на градовые процессы», включающей в себя 176 публикаций [2]. Сделан вывод: «из года в год град является одним из самых дорогостоящих стихийных бедствий для большей части мира. В Соединенных Штатах каждый год в результате ливня с градом убытки составляют около 10 млрд долл. Это также одно из самых сложных событий для прогнозирования даже для стандартного трехдневного прогноза погоды, не говоря уже о масштабах изменения климата на десятилетия. Каждый год град причиняет огромные финансовые убытки во всем мире. Но мы все еще не можем предсказать с удовлетворительной точностью, когда ударит град. Ученые-климатологи всего мира объединяются, чтобы добиться прогресса в этих прогнозах».

Общепризнано, что основными причинами недостаточной предупрежденности опасных явлений конвективного характера является дефицит исходной информации, а также недостаточность традиционных подходов для прогнозирования локальных быстроразвивающихся процессов.

Из существующих подходов к прогнозированию опасных конвективных явлений погоды в нашей стране следует отметить работы, выполненные А.А. Алексеевой и Н.И. Глушковой в Гидрометцентре РФ [3, 4]. Попытки объективизации прогноза града в последние годы предпринимались также в Высокогорном геофизическом институте [5—8]. Неудобство этих подходов заключается в необходимости использования исходных данных, получаемых в ходе сложных расчетов. Поэтому их не всегда можно оперативно применять в метеорологических подразделениях низового звена и службах по активному воздействию на гидрометеорологические процессы.

Дефицит исходной информации связан с тем, что при прогнозировании опасных явлений погоды, проведении противорадовых работ и математическом моделировании грозо-градовых облаков в основном используются фактические данные аэрологического зондирования. Но сеть аэрологического радиозондирования атмосферы в нашей стране довольно редкая, а на имеющихся метеостанциях частота и время проведения измерений не соответствует моменту максимального развития конвекции. Такое положение неблагоприятно сказывается на исследованиях, связанных с конвекцией в атмосфере. Вместе с тем в настоящее время имеются глобальные модели атмосферы, выходная продукция которых, может использоваться взамен данных фактического аэрологического зондирования [9—12].

Возможность и правомерность замены фактических аэрологических данных на поля метеоэлементов из глобальной модели, заблаговременность которых достигает 10 суток, мало исследована. Показатели оправдываемости и заблаговременность являются основными характеристиками метеорологических прогнозов и штормовых предупреждений. В данной работе использована выходная продукция действующей модели глобальной системы прогнозирования NOAA (GFS NCEP), представляющая аналог аэрологического зонда и обладающая достаточно высокой достоверностью [13].

Целью данной работы является поиск решения актуальной задачи увеличения заблаговременности прогноза градоопасности атмосферной ситуации. Для ее решения методами корреляционного анализа рассчитаны корреляционные зависимости между наборами фактических и прогностических значений температуры воздуха, температуры точки росы, скорости и направления ветра на различных изобарических уровнях с увеличивающейся заблаговременностью от суток до пяти суток.

### Материалы и методы исследования

Глобальная система прогнозирования NOAA (GFS NCEP) в начале 90-х годов получила широкое распространение и известность [9—11]. С ростом вычислительных ресурсов и изменения компьютерной архитектуры разрешающая способность ее увеличивалась. В июне 2019 г. глобальная система прогнозирования в рамках проекта NGGPS (Next Generation Global Prediction System) значительно обновилась [13]. Был осуществлен переход на новый неспектральный блок решения уравнений динамики, а также введен ряд усовершенствований в описании физических процессов подсеточного масштаба. Динамическое ядро разбивает атмосферу на небольшие кубические ячейки, расположенные на сетке, и вычисляет изменения параметров внутри каждой ячейки. Это позволяет телескопировать масштаб расчетной сетки для моделирования мезомасштабных штормовых систем для улучшения их прогноза. Вывод результатов моделирования имеет дискретность три часа для заблаговременности 0—180 ч и 12 ч для заблаговременности 180—384 ч.

Часть выходной продукции глобальной модели, необходимая для использования в методах прогноза конвективных явлений (аналог аэрологического зонда), включает в себя прогностические поля следующих метеоэлементов:

- PRESS — давление на изобарической поверхности, гПа;
- HGT — высоты, соответствующие изобарическим поверхностям, м;
- TEMP — температура окружающего воздуха, °C;
- DEW PT — температура точки росы, °C;
- WND DIR — направление ветра, град;
- WND SPD — скорость ветра, м/с.

Эти метеоэлементы рассчитываются на различных уровнях от 1000 до 20 гПа и предоставляются потребителю в цифровом виде.

Используемый в работе алгоритм расчета параметров атмосферы и облаков, обуславливающих возникновение, развитие и интенсивность градовых процессов,

является обобщением схем расчета параметров, используемых в существующих методах прогноза конвекции и связанных с нею опасных явлений погоды, и является также, по сути, электронной аэрологической диаграммой [5].

Для прогноза града в данном алгоритме в качестве входных данных используется выходная продукция глобальной модели атмосферы с заблаговременностью от суток до пяти суток: температура воздуха и точки росы, направление и скорость ветра на стандартных уровнях (Земля, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300 и 200 гПа). Предварительно рассчитываются около 45 параметров атмосферы, известных из существующих методов прогноза конвекции и связанных с ней опасных явлений погоды. Такое количество признаков предъявляет слишком жесткие (часто невыполнимые) требования к объему эмпирических данных и делает чрезвычайно трудоемкой (иногда даже нереализуемой) вычислительную процедуру прогноза. Поэтому возникла необходимость процедуры отбора наиболее информативных из них признаков.

Отбор производился с помощью бисериального коэффициента корреляции, который позволил сократить число параметров атмосферы до 10—11, допустимых при заданном числе случаев наблюдений. Затем с помощью статистического пакета SPSS [14] по отобраным параметрам составлялись дискриминантные функции по схеме:

— вычислялись средние значения переменных в каждой группе и объединенная матрица рассеивания для обеих групп;

— вычислялась обратная объединенная матрица рассеивания и ее определитель;

— для объединенной группы вычислялись: общие средние, обобщенная статистика Махаланобиса;

— для каждого события в каждой из двух групп рассчитывались дискриминантные функции. По вероятности, связанной с наибольшим значением дискриминантной функции осуществлялось разделение события на «град» и «не град».

Полученная дискриминантная функция имеет вид:

$$L^* = -0,05V_{700} + 0,3205\Delta t_m + 0,0071\Delta t_1 + 0,00359 \sum_{\text{Земля}}^{500} q - 0,03606 \sum_{\text{Земля}}^{500} \tau + 0,0389D_j - 12,57, \quad (1)$$

где  $V_{700}$  — упорядоченные вертикальные движения воздуха на 700 гПа;  $\Delta t_m$  — максимальная, разность температур облака и окружающего воздуха;  $\Delta t_1$  — вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 2 км;  $\sum_{\text{Земля}}^{500} q$  — массовая доля водяного пара в слое Земля — 5 км;  $D_j$  — индекс неустойчивости Джорджа;  $0,03606 \sum_{\text{Земля}}^{500} \tau$  — суммарный дефицит точки росы в слое Земля — 500 гПа.

По функции (1) при  $L^* \geq 0$  прогнозируется «град», при  $L^* < 0$  — «не град».

Заметим, что параметры, вошедшие в дискриминантную функции, в основном отражают запас неустойчивости, влагосодержания и температурный режим в зоне роста града. Важной особенностью дискриминантной функции (1) является то, что она позволяет количественно учитывать крупномасштабные атмосферные движения (упорядочение вертикальные токи), на фоне которых развивается конвективные явления.

Для оценки успешности и качества предлагаемого метода прогноза града составлялась таблица сопряженности (табл. 1), по которой определялись основные параметры (общая оправдываемость прогноза,  $P_{\text{опп}}$ ; предупреденность наличия явления,  $P_{\text{пня}}$ ; оправдываемость прогноза наличия явления,  $P_{\text{опня}}$ ; оправдываемость отсутствия явления,  $P_{\text{ооя}}$ ; предупреденность отсутствия явления,  $P_{\text{поя}}$ ) и дополнительные показатели (критерий Пирси—Обухова,  $T$ ; критерий Багрова,  $H$ ; ошибка риска метода,  $a$ ; ошибка страховки метода,  $P$ ; критерий Обухова,  $Q$ ).

Таблица 1

Таблица сопряженности при нарастающей заблаговременности  
Conjugacy table with increasing lead time

| Прогноз явления | Наблюдение явления              |           | Сумма |
|-----------------|---------------------------------|-----------|-------|
|                 | <i>Заблаговременность 24 ч</i>  |           |       |
|                 | «град»                          | «не град» |       |
| «град»          | 26                              | 7         | 33    |
| «не град»       | 6                               | 16        | 22    |
| сумма           | 32                              | 23        | 55    |
|                 | <i>Заблаговременность 72 ч</i>  |           |       |
|                 | «град»                          | «не град» |       |
| «град»          | 14                              | 7         | 21    |
| «не град»       | 5                               | 13        | 18    |
| сумма           | 19                              | 20        | 39    |
|                 | <i>Заблаговременность 132 ч</i> |           |       |
|                 | «град»                          | «не град» |       |
| «град»          | 10                              | 5         | 15    |
| «не град»       | 6                               | 18        | 24    |
| сумма           | 16                              | 23        | 39    |

### Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку продукция модели (стратификация полей температуры, влажности, направления и скорости ветра) обладает достаточно высокой достоверностью, то была исследована возможность ее использования взамен данных фактического аэрологического зондирования. Для этого сформированы два набора данных значений температуры воздуха и точки росы на различных изобарических поверхностях от уровня Земли ( $z_{\text{ем}}$ ) до уровня 300 мбар:

— прогностические значения, полученные из модели GFS за 24, 48, 72 и 132 ч до проведения зондирования;

— фактические значения по результатам аэрологического зондирования.

Данные были сформированы для метеостанции «Минеральные воды», расположенной в Центральной части Северного Кавказа. Объемы выборок для прогностических данных с заблаговременностью 24 и 48 ч составляли 70 наборов модельных данных за теплый период 2018 г. В случаях с заблаговременностью 72 и 132 ч выборки состояли из наборов 50 данных за теплый период 2019 г. на соответствующих стандартных изобарических поверхностях от уровня Земли (*zem*) до уровня 300 мбар.

Далее определялись коэффициенты корреляции между фактическими и прогностическими значениями данных полей метеорологических параметров на выделенных изобарических уровнях с увеличивающейся заблаговременностью (24, 48, 72 и 132 ч). В таблицах 2 и 3 представлены коэффициенты корреляции между фактическими данными температуры воздуха и точки росы с их значениями из глобальной модели с нарастающей заблаговременностью до 132 ч.

Коэффициенты корреляции между фактическими и прогностическими значениями температуры воздуха для случаев с заблаговременностью 24—48 ч принимают значения в пределах  $0,91 \div 0,98$ . По шкале Чеддока это соответствует очень высокой степени связи между ними (табл. 2). Для данных с заблаговременностью 72 ч степень связи высокая, за исключением некоторых высот, на которых корреляционная связь снижается до заметной  $0,74 \div 0,92$ . При увеличении заблаговременности до 132 ч коэффициенты корреляции для температуры воздуха также очень высокие  $0,88 \div 0,97$ , хотя несколько ниже, чем при заблаговременности 24 и 48 ч, но больше, чем для заблаговременности 72 ч. Такие высокие коэффициенты

Таблица 2

Коэффициенты корреляции  
между фактическими и прогностическими значениями температуры воздуха  
Correlation coefficients between actual and forecasting values of air temperature

| Изобарические уровни, мб | Коэффициенты корреляции** |      |      |      |      |
|--------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
|                          | заблаговременность, ч     |      |      |      |      |
|                          | 24                        | 48   | 60   | 84   | 132  |
| 1000 ( <i>zem</i> )      | 0,93                      | 0,91 | 0,91 | 0,58 | 0,90 |
| 900                      | 0,95                      | 0,94 | 0,95 | 0,77 | 0,90 |
| 850                      | 0,96                      | 0,97 | 0,96 | 0,83 | 0,92 |
| 800                      | 0,95                      | 0,95 | 0,96 | 0,71 | 0,89 |
| 700                      | 0,97                      | 0,98 | 0,97 | 0,83 | 0,93 |
| 600                      | 0,94                      | 0,95 | 0,95 | 0,53 | 0,88 |
| 500                      | 0,93                      | 0,98 | 0,98 | 0,77 | 0,95 |
| 400                      | 0,93                      | 0,95 | 0,97 | 0,84 | 0,97 |
| 300                      | 0,93                      | 0,89 | 0,96 | 0,88 | 0,97 |

\*\* Корреляция значима при  $\alpha = 0,01$ .

Таблица 3

Коэффициенты корреляции  
между фактическими и прогностическими значениями температуры точки росы  
Correlation coefficients between actual and values of forecasting dew point temperature

| Изобарические<br>уровни, мб | Коэффициенты корреляции** |      |      |      |      |
|-----------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
|                             | заблаговременность, ч     |      |      |      |      |
|                             | 24                        | 48   | 60   | 84   | 132  |
| 1000 (zem)                  | 0,87                      | 0,92 | 0,87 | 0,63 | 0,89 |
| 900                         | 0,90                      | 0,88 | 0,87 | 0,74 | 0,89 |
| 850                         | 0,83                      | 0,96 | 0,90 | 0,71 | 0,90 |
| 800                         | 0,88                      | 0,90 | 0,88 | 0,63 | 0,82 |
| 700                         | 0,87                      | 0,88 | 0,90 | 0,65 | 0,75 |
| 600                         | 0,87                      | 0,81 | 0,87 | 0,85 | 0,76 |
| 500                         | 0,83                      | 0,80 | 0,81 | 0,73 | 0,76 |
| 400                         | 0,71                      | 0,81 | 0,73 | 0,80 | 0,83 |
| 300                         | 0,93                      | 0,77 | 0,82 | 0,55 | 0,8  |

\*\* Корреляция значима  $\alpha = 0,01$ .

корреляции в этом случае обусловлены тем, что расчеты за этот срок были проведены по данным модели за 2019 г., и как было отмечено выше, в том же году была усовершенствована сама глобальная модель атмосферы.

Температура точки росы — очень изменчивый и трудно прогнозируемый параметр. Коэффициенты корреляции для этого параметра несколько ниже, чем для температуры воздуха, тем не менее, они соответствуют высокой и очень высокой степени связи между прогностическими и фактическими данными, так как принимают в среднем значения  $0,71 \div 0,96$  для всех сроков (табл. 3).

Оценка корреляционной связи параметров атмосферы показала правомерность замены данных фактического аэрологического зондирования значений температуры воздуха и точки росы на соответствующие прогностические значения по модели с заблаговременностью от суток до 5 суток.

Прогноз града составлялся при помощи дискриминантных функций, составленных по данным модели GFS для географических координат станции «Минеральные воды» за май—август 2020 г.

В случаях прогнозирования града с заблаговременностью 48 и 60 ч выборки составляли 55, а с заблаговременностью 72 и 132 ч — 50 наборов данных на соответствующих стандартных изобарических поверхностях от уровня Земли (zem) до 300 мбар.

По данным таблицы сопряженности рассчитывались критерии качества прогноза града (табл. 4). Разделение явлений на «град» или «не град» осуществлялось по данным наблюдений военизированных служб по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы, расположенных в радиусе репрезентативности фактических данных аэрологического зондирования по станции «Минеральные воды».

Результаты прогнозов града по дискриминантным функциям на 24, 72 и 132 ч показали, что рассматриваемый метод соответствует принятым критериям качества прогнозов. Из табл. 4 наглядно видно, что показатели успешности прогноза с заблаговременностью 24 часа оказались высокие. Что касается показателей для заблаговременности 72 ч, то они оказались незначительно ниже показателей при прогнозе града этими же функциями при меньшей заблаговременности (24 ч). При заблаговременности 132 ч критерии качества прогноза оказались на уровне или несколько выше, чем для предыдущей заблаговременности. Это обусловлено тем, что расчеты за этот срок были проведены по данным модели за 2019 г., и как было отмечено выше, в том же году была усовершенствована сама глобальная модель атмосферы.

Таблица 4

Критерии качества прогноза града с нарастающей заблаговременностью  
Quality criteria for hail forecast with increasing lead time

| Наименование критериев качества прогноза                    | Заблаговременность, ч |      |      |
|---|-----------------------|------|------|
|   | 24                    | 72   | 132  |
| Общая оправдываемость прогноза, $P_{\text{опп}}$            | 77                    | 69   | 72   |
| Предупрежденность наличия явления, $P_{\text{пня}}$         | 88                    | 74   | 63   |
| Оправдываемость прогноза наличия явления, $P_{\text{опня}}$ | 80                    | 67   | 67   |
| Оправдываемость отсутствия явления, $P_{\text{ооа}}$        | 73                    | 72   | 75   |
| Предупрежденность отсутствия явления, $P_{\text{поа}}$      | 70                    | 65   | 78   |
| Критерий Пирси—Обухова, $T$ (в долях единицы)               | 0,51                  | 0,39 | 0,41 |
| Критерий Багрова, $H$ (в долях единицы)                     | 0,52                  | 0,39 | 0,41 |
| Ошибка риска метода, $a$ (в долях единицы)                  | 0,18                  | 0,26 | 0,38 |
| Ошибка страховки метода, $P$ (в долях единицы)              | 0,30                  | 0,35 | 0,22 |
| Критерий Обухова, $Q$ (в долях единицы)                     | 0,51                  | 0,39 | 0,41 |

Отметим, что, оправдываемость предлагаемого метода равна  $\approx 70\%$  для заблаговременности 72 ч, в отличие от аналогичного метода прогноза на 24 ч ( $\approx 77\%$ ) и за 132 ч ( $\approx 72\%$ ).

### Заключение

Корреляционный анализ между данными фактического аэрологического зондирования и прогностическими метеорологическими данными с увеличивающейся заблаговременностью до 132 ч по глобальной модели GFS NCEP подтвердил возможность использования последних для прогноза опасных явлений до средних сроков. Критерии качества прогнозов града с заблаговременностью до 5 суток соответствует принятым критериям качества прогнозов.

Таким образом, прогностические значения стратификации атмосферы могут использоваться для составления прогнозов опасных явлений и элементов погоды, (заменяя собой фактическое аэрологическое зондирование) не поддающееся пока прогнозу самими глобальными моделями атмосферы.

**Список литературы**

1. *Dzombak B.* Severe hailstorms are costly and hard to predict // *Eos*. 2021. № 102. doi: 10.1029/2021EO158268.
2. *Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T. et al.* The effects of climate change on hailstorms // *Nat Rev Earth Environ*. 2021. № 2. P. 213—226. doi: 10.1038/s43017-020-00133-9.
3. *Алексеева А.А., Глушкова Н.И.* Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплою полугодия. Патент РФ № 2162237. 2001.
4. *Алексеева А.А.* Методика прогноза опасных и стихийных конвективных явлений погоды, а также их совокупности, приносящих значительный ущерб отраслям экономики / Методический кабинет Гидрометцентра: [Электронный ресурс]. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html> (дата обращения: 14.04.2021).
5. *Кагермазов А.Х.* Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. Нальчик: Печатный двор, 2015. 215 с.
6. *Кагермазов А.Х.* Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (T254 NCEP) // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 3. С. 28—34.
7. *Кагермазов А.Х., Сиротенко Л.А.* Результаты апробации программных модулей расчета метеопараметров и компьютерного прогноза града по данным аэрологического зондирования на Северном Кавказе // *Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. Естественные науки*. 2010. Спецвыпуск. С. 49—53.
8. *Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т.* Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // *Труды ГГО*. 2020. Вып. 598. С. 204—214.
9. *Kalnay E., Kanamitsu M., Baker W.E.* Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1990. V.71. P. 1410—1428.
10. *Kanamitsu M.* Description of the NMC global data assimilation and forecast system // *Wea. and Forecasting*. 1989. V. 4. P. 335—342.
11. *Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., White G.H.* Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // *Wea. and Forecasting*. 1991. V. 6. P. 425—435.
12. *Гусейнов Н.Ш., Агаева А.А.* Применение индексов неустойчивости атмосферы к оперативному прогнозированию грозы на основе модельных данных // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 56. С. 30—37.
13. National Centers for Environmental Prediction(NCEP) Environmental Modeling Center (EMC) USA. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 14.04.2020).
14. *Бюль А., Цёфель П.* SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ДиаСофтЮП, 2005. 608 с.

**References**

1. *Dzombak B.* Severe hailstorms are costly and hard to predict. *Eos*. 2021, 102. doi: 10.1029/2021EO158268.
2. *Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T. et al.* The effects of climate change on hailstorms. *Nat Rev Earth Environ*. 2021, 2: 213—226. doi : 10.1038/s43017-020-00133-9.
3. *Alekseeva A.A.* Methods of forecasting dangerous and natural convective weather events, as well as their combination, causing significant damage to the economy. Methodical office Hydrometeorological Center. [In Russian]. Available at: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html>. (accessed 14.04.2019).
4. *Alekseeva A.A., Glushkova N.I.* Method of forecasting natural convective hydrometeorological phenomena of the warm half of the year. Patent RF, no. 2162237, 2001. [In Russian].
5. *Kagermazov A.Kh. Tsifrovaya atmosfera. Sovremennyye metody i metodologiya issledovaniya opasnykh meteorologicheskikh protsessov i yavleniy.* Digital atmosphere. Modern methods and methodology for the study of hazardous meteorological processes and phenomena. Nalchik: Pechatnyy dvor, 2015: 215 p. [In Russian].
6. *Kagermazov A.Kh.* Hail prediction from Global atmosphere model output (T254 NCEP). *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2012, 3:28—34. [In Russian].

7. Kagermazov A.Kh., Sirotenko L.A. Results of approbation of software modules for calculating meteorological parameters and computer forecasting of hail based on aerological sounding data in the North Caucasus. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Fizika atmosfery. Yestestvennyye nauki*. Proceedings of Higher Educational Institutions. North-Caucasian Region. Natural Sciences. Special issue. 2010: 49—53. [In Russian].
8. Kagermazov A.Kh., Sozaeva L.T. Hail forecast on the output data of the global atmospheric model with tree-day advance time. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii*. Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory. 2020, 598: 204—214. [In Russian].
9. Kalnay E., Kanamitsu M., Baker W.E. Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1990, 71: 1410—1428.
10. Kanamitsu M. Description of the NMC global data assimilation and forecast system. *Wea. and Forecasting*. 1989, 4: 335—342.
11. Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., White G.H. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. *Wea. and Forecasting*. 1991, 6: 425—435.
12. Huseynov N.Sh., Agayeva A.A. Application of atmospheric instability indexes for operational thunder forecasting based on the model data. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2019, 56: 30—37. [In Russian].
13. National Centers for Environmental Prediction(NCEP) Environmental Modeling Center (EMC) USA. Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov> (accessed 14.04.2020).
14. Bityul A., Zöfel P. *SPSS: Iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovleniye skrytykh zakonornostey*. The Art of Information Processing. Analysis of statistical data and recovery of hidden patterns. St. Petersburg: DiaSoftYUP, 2005: 608 p. [In Russian].

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 21.07.2021*

*Принята к публикации после доработки 26.10.2021*

### ***Сведения об авторах***

*Кагермазов Артур Хасанбиевич* — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией атмосферных конвективных явлений, ФГБУ «ВГИ», [ka5408@mail.ru](mailto:ka5408@mail.ru).

*Созаева Лежинка Танашевна* — канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории атмосферных конвективных явлений, ФГБУ «ВГИ», [ljk\\_62@rambler.ru](mailto:ljk_62@rambler.ru).

### ***Information about the authors***

*Kagermazov Artur Khasanbievich* — PhD (Phys. and Math. Sci.), head of the laboratory of atmospheric convective phenomena, FSBI «HMGI», [ka5408@mail.ru](mailto:ka5408@mail.ru).

*Sozaeva Lezhinka Tanashevna* — PhD (Phys. and Math. Sci.), associate professor, senior researcher at the laboratory of atmospheric convective phenomena, FSBI «HMGI», [ljk\\_62@rambler.ru](mailto:ljk_62@rambler.ru).

УДК 930.85:[551.461.2:504.058](261.24)

doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-681-693

## **Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России**

*А.А. Павловский, В.И. Шамшури*

НИПЦ Генплана Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, [pa1@yandex.ru](mailto:pa1@yandex.ru)

По существующим прогнозам, к концу XXI в. средний глобальный уровень моря может возрасти от нескольких десятков сантиметров до двух метров и более. Приморские объекты исторического и культурного наследия уязвимы к неблагоприятным последствиям климатических изменений, в том числе к изменению уровня моря. В статье показано, что при повышении уровня моря на метр могут быть затоплены низинные территории Санкт-Петербурга и Калининградской области, относящиеся к всемирному наследию ЮНЕСКО. Количество объектов историко-культурного значения Санкт-Петербурга, подверженных затоплению при нагонных наводнениях, может возрасти до нескольких тысяч. Может быть затоплено около 20 км<sup>2</sup> территории уникального ландшафта Куршской косы. При развитии глобального потепления будет происходить активизация абразии и размыва берегов, деградация природного и рекреационного потенциала Балтийского побережья в Санкт-Петербурге и Калининградской области.

*Ключевые слова:* изменение климата, повышение уровня моря, наводнения, историко-культурное наследие.

## **Influence of Baltic Sea level rise on historic and cultural heritage of Russia**

*A.A. Pavlovskii, V.I. Shamshurin*

State Research and Project Center of St. Petersburg Master Plan, St. Petersburg, Russia

There are a lot of various objects of historical and cultural legacy on the Ocean's coastline, including the Baltic Sea region. According to different climatic forecasts, by the end of the century the mean global sea level may increase from several tens of centimeters to two meters or more, depending on the rate of melting of Greenland and Antarctica glaciers. Seaside objects of historical and cultural heritage are exposed to adverse consequences of climate changes, including sea level rise. This article shows that with one-meter sea level rise the low-lying territories of St. Petersburg and Kaliningrad region, which belong to world cultural heritage of UNESCO, may be flooded. The number of St. Petersburg's historical and cultural objects prone to sea flooding may increase by several thousands (up to 3366 objects). Approximately 20 km<sup>2</sup> of the territory of the unique landscape of Curonian Spit may be flooded. Sea level rise will lead to abrasion and washout of the Baltic coast, deterioration of its natural and recreational potential.

As a result of the study, the boundaries of a probable flood zone of historical heritage in the Russian part of the Baltic Sea were obtained, as well as a list of historical, cultural and natural monuments prone to flooding was formed. These results can be used in adaptation plans of St. Petersburg and Kaliningrad region to climate changes. Long-term protection of monuments of historical and cultural significance of the Russian Baltic will require the development of engineering measures to protect them from probable sea level rise.

*Keywords:* climate change, sea level rise, flooding, historical and cultural legacy.

**For citation:** *A.A. Pavlovskii, V.I. Shamshurin. Influence of Baltic Sea level rise on historic and cultural heritage of Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021, 65: 681—693. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-681-693*

---

## Введение

Изменения климата могут иметь значительные последствия для социально-экономического и градостроительного развития приморских территорий, в том числе для сохранения их разнообразного историко-культурного и природного наследия при повышении среднего уровня Мирового океана, темпы роста которого имеют тенденции к возрастанию в последние десятилетия [1, 2].

По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), средний глобальный уровень Мирового океана по сравнению с его средним значением за 1995—2014 гг., возрастет к 2100 г. на величину от 28 до 101 см в зависимости от сценария выбросов парниковых газов. К 2150 г. разброс прогностических значений составляет 37—188 см. При этом имеются оценки, что повышение уровня моря может значительно превысить данные значения при условии ускорения таяния ледников Гренландии и Антарктиды и составить до 2 м к 2100 г. и до 5 м к 2150 г. при очень высоких сценариях выбросов парниковых газов. В долгосрочной перспективе глобальный уровень моря будет продолжать подниматься на протяжении столетий и тысячелетий в связи с термическим расширением океанических вод и таянием покровных ледников. В соответствии с модельными оценками если глобальное потепление ограничится повышением средней температуры приземного воздуха на 1,5 °С, то средний уровень Мирового океана возрастет на 2—3 м; при 2,0 °С его рост составит 2—6 м, при 5,0 °С это будет 19—22 м [1].

В связи с тем, что значительное количество объектов культурного наследия находится на побережье Мирового океана, глобальное потепление, сопровождающееся повышением среднего и максимального уровня моря, а также увеличением повторяемости опасных гидрометеорологических явлений, особенно штормовых нагонов, развитием абразии, способно привести к их деградации и даже физическому уничтожению.

Актуально это и для объектов всемирного наследия Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО), в большом количестве расположенных на побережье Балтийского моря, характеризующих историю развития цивилизации в данном регионе Земли [3].

Например, такие объекты ЮНЕСКО, как архипелаг Кваркен и «Высокий берег» (Ботнический залив), отражают палеоклиматическую историю Балтийского региона в плейстоценовую эпоху, для которой было характерным чередование ледниковых периодов и межледниковий. Возникновение уникального природного ландшафта «Высокого берега» обусловлено явлением гляциоизостазии, которое за 9,6 тыс. лет привело к поднятию данной территории примерно на 285 м [3].

Объектами всемирного культурного наследия ЮНЕСКО на Балтийском побережье России являются:

- исторический центр Санкт-Петербурга и связанные с ним группы памятников;
- Куршская коса (Калининградская область);
- геодезическая дуга Струве («Пункт Мякипяллюс» и «Точка Z» на о. Гогланд в Ленинградской области);
- объекты, расположенные в зоне повышения относительного уровня моря [4, 5].

Наиболее масштабным российским объектом культурного наследия ЮНЕСКО является градостроительный ансамбль Санкт-Петербурга, сформированный в основном на островах невской дельты и в пределах приневской низменности, на территории которых находятся тысячи зарегистрированных исторических объектов различного уровня государственной охраны [6].

Приморский природно-культурный ландшафт Куршской косы, расположенный на территории Калининградской области (Россия) и Республики Литвы, на значительных участках также характеризуется низменными отметками рельефа, поэтому уязвим к повышению среднего уровня моря и увеличению частоты штормовых нагонов.

В отличие от объектов капитального строительства и различных сооружений, для защиты объектов историко-культурного значения от затопления практически не применимы градостроительные методы. В ближайшие десятилетия при условии реализации умеренных прогнозов повышения среднего глобального уровня моря защитить их от разрушения возможно будет с помощью инженерно-технических мероприятий. В связи с этим при подготовке региональных планов адаптации приморских исторических поселений к изменениям климата возникает необходимость в составлении реестра объектов историко-культурного значения, подверженных затоплению при росте уровня Мирового океана. Поэтому объектом исследования в настоящей статье является российское побережье Балтийского моря, а предметом исследования — исторические, культурные и природные памятники на побережье агломерации Санкт-Петербурга и Калининградской области. Исходя из этого, цель работы состоит в оценке влияния повышения среднего и максимального уровня моря на сохранность памятников исторического и культурного наследия на низинных территориях Санкт-Петербурга и Калининградской области, где расположены российские объекты всемирного наследия ЮНЕСКО.

### **Методика исследования**

Национальным планом мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 25.12.2019 № 3183-р, предусмотрена разработка и утверждение специальных документов приспособления субъектов Российской Федерации к последствиям глобального потепления, при обосновании которых, в том числе, должны быть выполнены расчеты экономического ущерба для объектов культуры и мероприятия по их защите. На основе утвержденных региональных планов адаптации к изменению климата предусматривается корректировка

документов и направлений стратегического планирования субъектов Российской Федерации.

Для Санкт-Петербурга важнейшим документом стратегического планирования является Генеральный план города, утвержденный Законом Санкт-Петербурга от 22.12.2005 № 728-99, в котором большое внимание уделяется вопросам разработки мероприятий по сохранению и регенерации объектов исторического и культурного наследия. Для Калининградской области таким документом является схема ее территориального планирования [7]. Эти документы должны быть отрецензированы на основе региональных адаптационных климатических планов.

В Петербургской стратегии сохранения культурного наследия, утвержденной постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 01.11.2005 № 1681, указано, что наиболее значимыми природными характеристиками, влияющими на физическую сохранность исторических памятников, являются повышенная влажность воздуха, частые оттепели, опасные гидрометеорологические явления (морские нагоны, подтопления, ураганные ветры), загрязнение атмосферного воздуха, а также гидрогеологические особенности городских грунтов. При этом прямое климатическое воздействие на объекты культурного наследия будет проявляться через повышение температуры, влажности атмосферного приземного воздуха и количества осадков; возрастание уровня моря; увеличение количества, повторяемости и интенсивности опасных метеорологических и гидрологических явлений; дальнейшее развитие городского «острова тепла». Косвенное воздействие глобального потепления на памятники истории и культуры способно проявиться через ускорение выветривания горных пород. Однако нужно понимать, что количество как прямых, так и косвенных последствий климатических изменений для объектов культурного наследия может быть гораздо большим, чем приведено выше в тексте.

Данные об объектах всемирного наследия ЮНЕСКО, расположенных на морском побережье Балтики, приняты по данным официального сайта этой организации [3]. Информация о местоположении объектов исторического и культурного значения, расположенных на территории Санкт-Петербурга, получена из официального интернет-портала «Геоинформационная система Санкт-Петербурга» [6].

Историческая динамика уровня моря в Восточной части Финского залива и в Балтийском море в районе Калининграда рассматривается по данным из Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане [8]. Информация о рельефе местности в отношении территории Санкт-Петербурга получена по данным топографической съемки масштаба 1:2000 для территории города, доступ к которой имеется у авторов статьи. Для Балтийского побережья в районе Калининграда использовались данные глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM [9].

### **Результаты исследований**

По данным вековых наблюдений средний уровень Балтийского моря растет со скоростью  $1,3 \pm 0,3$  мм/год. Однако в последние десятилетия наблюдается повышение скорости роста уровня моря до 4 мм/год [4; 10; 11].

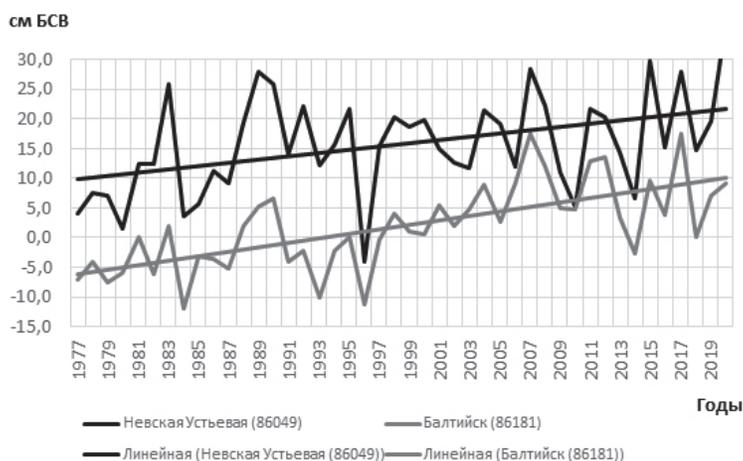


Рис. 1. Изменение среднего уровня Балтийского моря по данным наблюдений на станциях «Невская Устьева» (86049) и «Балтийск» (86181):

черная ломаная линия — данные измерений на станции «Невская Устьева», черная прямая линия — линейный тренд; серая ломаная линия — данные измерений на станции «Балтийск», серая прямая линия — линейный тренд.

Fig. 1. Change in the average level of the Baltic Sea according to observations at the stations «Nevskaya Ust'evaya» (86049) and «Baltijsk» (86181):

black broken line — measurement data at the Nevskaya Ust'evaya station, black straight line — linear trend; gray broken line — measurement data at Baltijsk station, gray straight line — linear trend.

Представленный на рис. 1 межгодовой ход среднегодового уровня моря на гидрометеорологических станциях Невская Устьева (86049) в Невской губе и Балтийск (86181) в открытой части Балтийского моря характеризуется наличием выраженных положительных трендов. Скорость роста среднего уровня моря по данным наблюдений 1977—2020 гг. на Невской Устьевой составляет 2,7 мм/год, в Балтийске — 3,7 мм/год.

К концу столетия уровень Невской губы по разным оценкам может повыситься на величину от нескольких десятков см до 1 м [1, 10, 11, 12].

Повышение среднего уровня моря приводит как к прямому затоплению приморских территорий, так и к увеличению зоны затопления при максимальных уровнях воды (вероятностью раз в сто лет), которая является зоной с особыми условиями использования территории. Согласно имеющимся оценкам, повышение уровня моря может привести к увеличению зоны затопления территории Санкт-Петербурга при морских нагонных наводнениях от 40 км<sup>2</sup> до 110 км<sup>2</sup> [5, 13, 14, 15].

В настоящее время зона затопления при максимальном уровне воды для территории Санкт-Петербурга для побережья Невской губы определена на отметке 1,9 м в Балтийской системе высот (БСВ), а для побережья Финского залива она определена по отметке около 3,2 м в БСВ (рис. 2) [13].

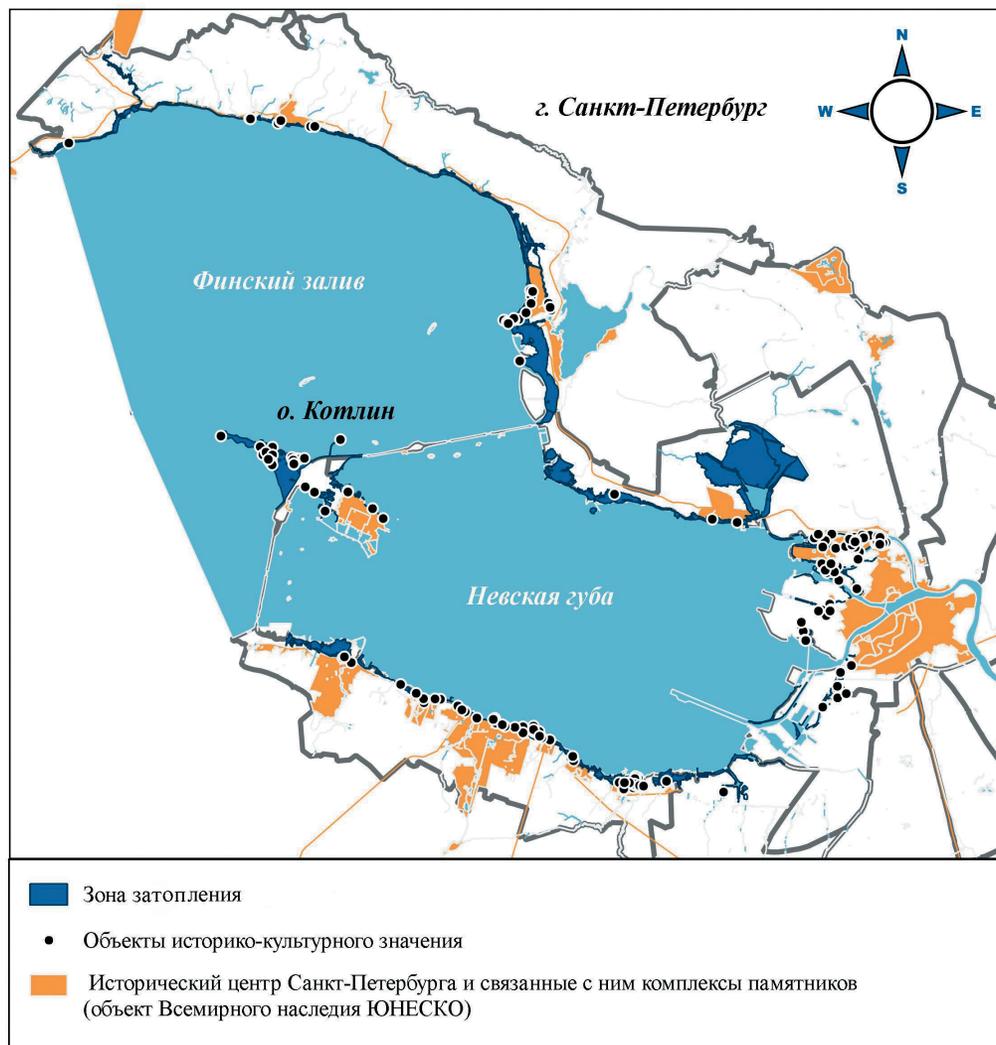


Рис. 2. Объекты историко-культурного значения Санкт-Петербурга, попадающие в утвержденную зону затопления при уровнях воды однопроцентной обеспеченности.

Fig. 2. Objects of historical and cultural significance of St. Petersburg falling into the existing flood zone.

Для морского побережья Калининградской области (устье реки Преголи, Балтийск, Калининградский залив, Куршский залив) опасным нагонным уровнем наводнения является 150—160 см БСВ [16].

В настоящее время в утвержденную в зону затопления от Финского залива и Невской губы попадает 135 объектов исторического и культурного значения на территории Санкт-Петербурга (рис. 2). Увеличение зоны затопления при росте

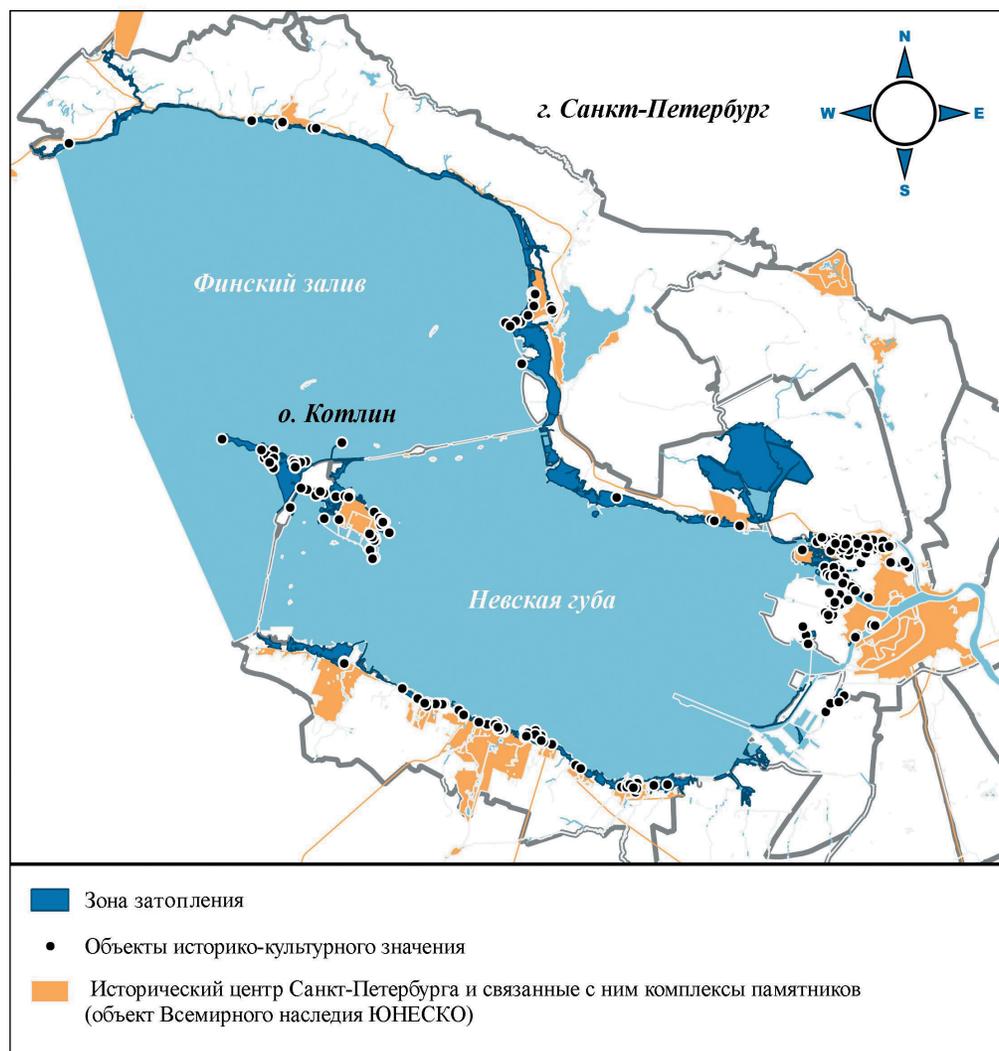


Рис. 3. Объекты историко-культурного значения Санкт-Петербурга, попадающие в зону затопления при повышении среднего уровня моря на 30—40 см.

Fig. 3. Objects of historical and cultural significance of St. Petersburg, falling into the flood zone with an increase in average sea level by 30—40 cm.

среднего уровня моря на 30—40 см увеличивает их число в 4 раза, а на 80—100 см в 25 раз (рис. 3—4). Полученные результаты показывают, что прогнозируемое увеличение зоны затопления при изменении климата является одной из наиболее значимых угроз физической утраты (разрушения) исторического и культурного наследия Санкт-Петербурга (табл. 1).

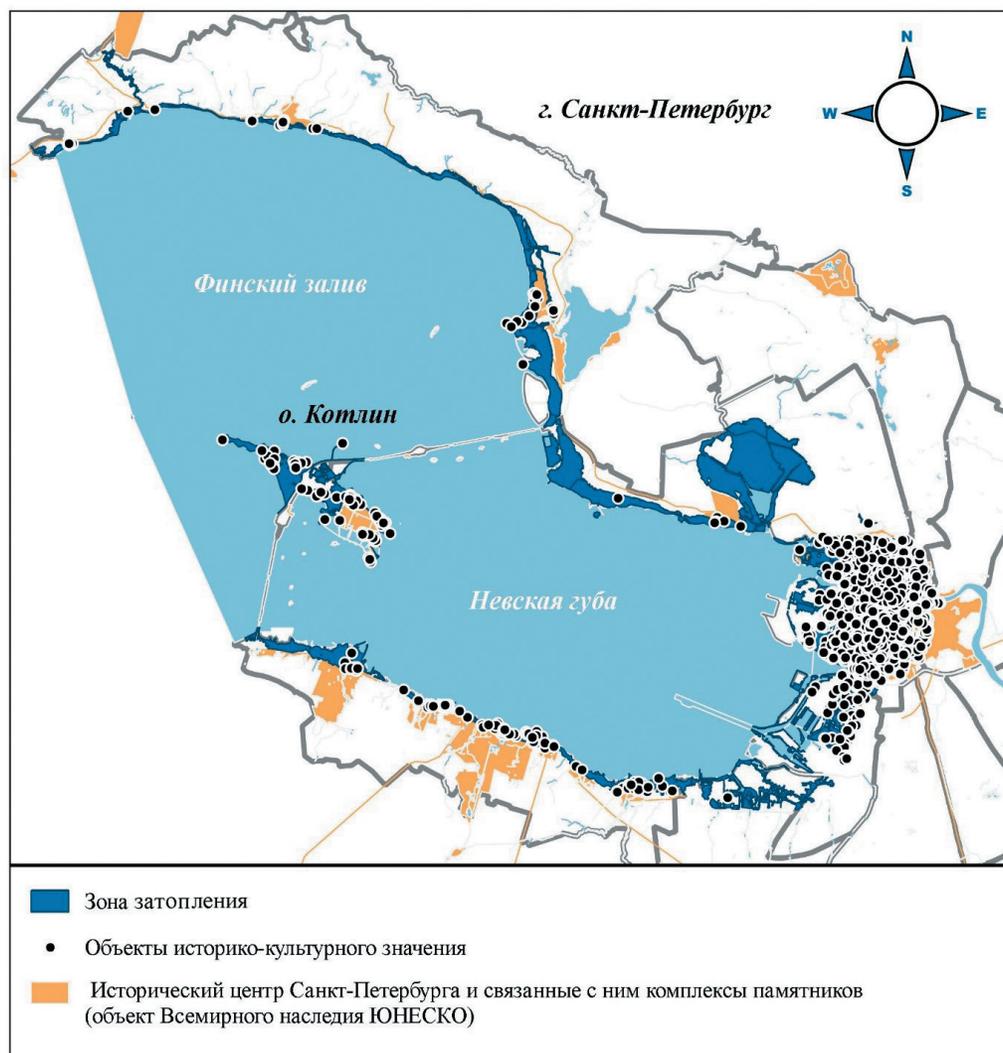


Рис. 4. Объекты историко-культурного значения Санкт-Петербурга, попадающие в зону затопления при повышении среднего уровня моря на 80—100 см.

Fig. 4. Objects of historical and cultural significance of St. Petersburg, falling into the flood zone with an increase in average sea level by 80—100 cm.

На рисунках 2—4 представлены схемы местоположения на территории Санкт-Петербурга объектов исторического и культурного значения, попадающих в зону затопления однопроцентной обеспеченности от нагонных наводнений со стороны Финского залива в различных климатических условиях.

Полученные результаты показывают, что наиболее значимым фактором, способным повлиять на сохранность памятников исторического и культурного

Таблица 1

Количество объектов историко-культурного значения Санкт-Петербурга различной категории охраны, попадающих в зону затопления в существующих и прогнозируемых климатических условиях (штук)

The number of objects of historical and cultural significance of St. Petersburg, various categories of protection, falling into the flood zone in existing and predicted climatic conditions (pieces)

| Категория охраны | Существующее положение | При повышении уровня моря |              |
|------------------|------------------------|---------------------------|--------------|
|                  |                        | на 30—40 см               | на 80—100 см |
| Выявленные (В)   | 15                     | 45                        | 1080         |
| Региональные (Р) | 104                    | 177                       | 954          |
| Федеральные (Ф)  | 120                    | 300                       | 1332         |
| Всего            | 239                    | 522                       | 3366         |

значения Санкт-Петербурга во второй половине текущего столетия, будет являться повышение среднего и максимального уровня моря в восточной части Финского залива в результате развития глобального потепления.

В отношении Куршской косы получена оценка, что к концу XXI в. может быть затоплено около 20 км<sup>2</sup> ее территории или примерно 7 % от общей площади объекта всемирного культурного наследия ЮНЕСКО (рис. 5). Кроме того, повышение максимальных уровней воды при наводнениях, вызванное увеличением среднего уровня моря, может привести к развитию абразии и деградации природных комплексов Куршской косы [17].

При реализации экстремальных сценариев повышения уровня моря до 2 м и более к концу XXI в. при условии ускоренного таяния ледников Гренландии и Антарктиды значительные части Калининградской области могут быть затоплены [1, 18]. Наиболее уязвимыми к повышению уровня моря являются приморские части Нижнеманской, Полесской, Прегольской низменностей.

При оценке последствий повышения уровня моря наиболее дискуссионным является вопрос о том, насколько этот уровень способен вырасти. По данным ансамблевых оценок из отчета Шестого отчета МГЭИК, наиболее обоснованной является значение повышения уровня моря к концу XXI в. примерно на 60—80 см. Важно отметить, что даже при самом низком сценарии выбросов парниковых газов (SSP1-1.9) средний глобальный уровень моря к концу XXI в. по сравнению с 2000 г. увеличится минимум на 0,3 м [1, 18].

Однако, как было отмечено выше, в последнее время на фоне наблюдающегося увеличения роста уровня моря возрастает вероятность реализации экстремальных сценариев его повышения, особенно на отдаленную климатическую перспективу (XXII—XXIII вв.).

В связи с неопределенностью в прогнозе развития глобального потепления и повышения уровня моря, оценки площадей затопления приморских территорий являются ориентировочными. Сложность прогнозирования изменений климата и их последствий приводит к необходимости регулярно уточнять оценки затопления приморских территории при изменении климатических сценариев.

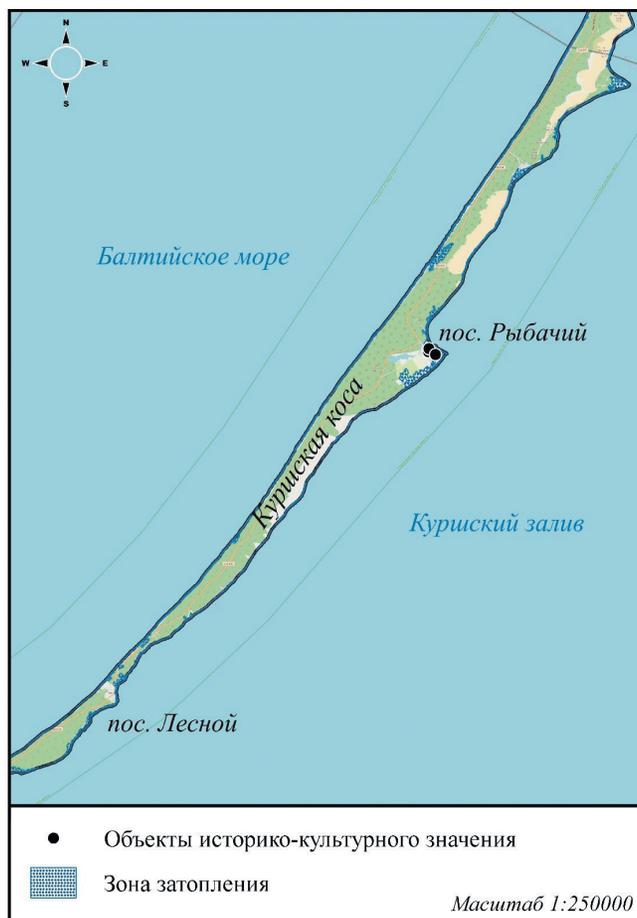


Рис. 5. Территория Куршской косы, затопляемая при повышении среднего уровня моря на 1 м.

Fig. 5. Territory of the Curonian Spit, flooded when the average sea level rises by 1 m.

### Выводы

В настоящей статье рассмотрены последствия повышения среднего и максимального уровня моря для российских объектов исторического и культурного значения, расположенных на побережье Балтийского моря. Показано, что повышение уровня моря на 100 см может привести к увеличению количества объектов историко-культурного наследия на территории Санкт-Петербурга, подверженных затоплению и подтоплению, в 25 раз. Определен перечень объектов исторического и культурного наследия, попадающих в границы зоны затопления. В результате повышения уровня моря на 1 м может быть затоплено 7% территории Куршской косы. Повышение среднего и максимального уровня моря требует разработки и реализации

долгосрочных проектов инженерной защиты от затопления объектов всемирного наследия ЮНЕСКО, расположенных на побережье российской Балтики.

Полученные результаты могут быть использованы при подготовке региональных планов адаптации субъектов Российской Федерации: г. Санкт-Петербурга и Калининградской области к изменению климата.

### Список литературы

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
2. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И.* Изменения уровня Мирового океана в текущем столетии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 9—22. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-9-22.
3. World Heritage List: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://whc.unesco.org/en/list/>.
4. *Madsen K.S., Hoyer J.L., Suursaar U., She J., Knudsen P.* Sea Level Trends and Variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7 [243]. doi: 10.3389/feart.2019.00243.
5. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* Изменчивость морского уровня Финского залива. СПб.: РГГМУ, 2014. 178 с.
6. Геоинформационная система Санкт-Петербурга: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rgis.spb.ru/map/main.aspx>.
7. Схема территориального планирования Калининградской области: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gov39.ru/vlast/agency/aggradostroenie/territorialnoe-planirovanie-schema.php>.
8. Климат морей России: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://portal.esimo.ru/portal/>.
9. Глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
10. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Малинина Ю.В.* Современные колебания морского уровня Кронштадта и их возможные изменения к концу столетия // *Общество. Среда. Развитие*. 2010. № 3 (16). С. 251—258.
11. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Митина Ю.В., Павловский А.А.* Негативные последствия штормовых нагонов и «векового» уровня в Невской губе // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2018. № 1 (73). С. 48—58. doi: 10.23968/2305-3488.2018.23.1.48-58.
12. The BACC II Autor Team (2015). *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer International Publishing. 501 p.
13. *Павловский А.А.* Об определении зон затопления на территории Санкт-Петербурга // *Ученые записки РГГМУ*. 2016. № 43. С. 39—50.
14. *Павловский А.А., Менжулин Г.В.* Изменения климата и оценка перспективы использования в петербургском градостроительстве искусственных намывных территорий // *Труды Главной геофизической обсерватории*. 2019. Выпуск № 593. С. 70—84.
15. *Павловский А.А.* О разработке и реализации первоочередных мер по адаптации Санкт-Петербурга к климатическим изменениям // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 58. С. 111—126. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-111-126.
16. Перечень и критерии опасных явлений и комплексов гидрометеорологических явлений по району ответственности Калининградского ЦГМС-филиала ФГБУ «Северо-Западное УГМС»: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo39.ru/kriterii-oya.html>.
17. Балтберегозащита: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bbz39.ru/>.
18. *Sweet W.V., Kopp R.E., Weaver C.P., Obeysekera T., Horton R.M., Thieler E.R., Zervas C.* Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Tech. Rep. NOS CO-OPS 083. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 2017. 75 p.

## References

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
2. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Shevchuk O.I. Changes in the global sea level in the current century. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2019, 16, 5: 9—22. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-9-22. [In Russian].
3. World Heritage List. Available at: <https://whc.unesco.org/en/list/>.
4. Madsen K.S., Hoyer J.L., Suursaar U., She J., Knudsen P. Sea Level Trends and Variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry. *Frontiers in Earth Science*. 2019, 7:243. doi: 10.3389/feart.2019.00243.
5. Gordeeva S.M., Malinin V.N. Sea level variability of the Gulf of Finland. St. Petersburg: RGGMU, 2014: 178 p. [In Russian].
6. *Geoinformacionnaya sistema Sankt-Peterburga*. St. Petersburg's Geographic Information System. Available at: <http://rgis.spb.ru/map/main.aspx>. [In Russian].
7. *Skhema territorial'nogo planirovaniya Kaliningradskoj oblasti*. Territorial Planning Scheme of the Kaliningrad Region. Available at: <https://gov39.ru/vlast/agency/aggradostroenie/territorialnoe-planirovanie-schema.php>. [In Russian].
8. *Klimat morej Rossii*. Climate of Russian seas. Available at: <http://portal.esimo.ru/portal/>. [In Russian].
9. ASTER GDEM. Global Digital Terrain Model ASTER GDEM. Available at: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.
10. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Malinina Yu.V. Modern fluctuations in the sea level of Kronstadt and their possible changes by the end of the century. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*. Society. Environment. Development. 2010, 3 (16): 251—258. [In Russian].
11. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Mitina Yu.V., Pavlovskij A.A. Negative consequences of storm surges and “century-old” levels in the Nevsky Bay. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. Water and Ecology. 2018, 1 (73): 48—58. doi: 10.23968/2305-3488.2018.23.1.48-58. [In Russian].
12. The BACC II Autor Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Cham: Springer International Publishing, 2015: 501 p.
13. Pavlovskij A.A. On the definition of flooding zones on the territory of St.Petersburg. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2016, 43: 39—50. [In Russian].
14. Pavlovskij A.A., Menzhulin G.V. Climate change and assessment of the prospect of using artificial alluvial areas in St. Petersburg urban planning. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii*. Proceeding of Voeikov Main Geophysical Observatory. 2019, 593: 70—84. [In Russian].
15. Pavlovskij A.A. On development and implementation of priority measures for adaptation of St.Petersburg to climate changes. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. Hydrometeorology and ecology. 2020, 58: 111—126. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-111-126. [In Russian].
16. *Perechen' i kriterii opasnyh yavlenij i kompleksov gidrometeorologicheskikh yavlenij po rajonu otvetstvennosti Kaliningradskogo CGMS-filiala FGBU «Severo-Zapadnoe UGMS»*. List and criteria of hazards and complexes of hydrometeorological phenomena in the area of responsibility of the Kaliningrad branch of the North-Western Department of Hydrometeorological Service. Available at: <http://meteo39.ru/kriterii-oja.html>.
17. *Baltberegozashchita*. Available at: <http://bbz39.ru/>.
18. Sweet W.V., Kopp R.E., Weaver C.P., Obeysekerera T., Horton R.M., Thieler E.R., Zervas C. Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Tech. Rep. NOS CO-OPS 083. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 2017: 75 p.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.10.2021

Принята в печать 15.11.2021

***Сведения об авторах***

*Павловский Артем Александрович*, д-р геогр. наук, начальник отдела, Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга», [pa1@yandex.ru](mailto:pa1@yandex.ru).

*Шамшури Вадим Илларионович*, руководитель группы инженеров, Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга», [gc.shamshurin@gmail.com](mailto:gc.shamshurin@gmail.com).

***Information about authors***

*Pavlovskii Artem Alexandrovich*, Grand PhD (Geogr. Sci), Head of department, State Research and Design Center of Saint-Petersburg's Master Plan.

*Shamshurin Vadim Illarionovich*, Head of engineers' group, State Research and Design Center of Saint-Petersburg's Master Plan.

УДК 556.16.072:[556.53:63]:556.114.6

doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-694-701

## **Построение оптимальной модели стока поверхностных вод в водоемы в сельском хозяйстве**

***Ф.Г. Агаев, Х.Г. Асадов, Б.Л. Джафарова,  
И.Г. Абдурахманова***

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку. Азербайджанская Республика.  
asadzade@rambler.ru

Статья посвящена вопросу построения оптимальной модели суммарного переноса питательных веществ азота и фосфора различными поверхностными стоками в основной водоем зоны сельскохозяйственного производства.

Рассмотрена задача оптимального размещения источников азота и фосфора в окрестностях определенного множества локальных сельскохозяйственных участков, при котором суммарный перенос водами поверхностного стока указанных питательных веществ в основной водоем достигал бы минимума. При этом используются некоторые элементы и положения модели SWAT, разработанной USDA—ARSC. Учитывается, что суммарная величина осадочных масс во всех поверхностных стоках остается постоянной величиной.

*Ключевые слова:* поверхностный сток, осадочная масса, питательные вещества, оптимизация, концентрация, водоканал.

## **Building an optimal model of surface water runoff in agriculture**

***F.G. Agayev, H.H. Asadov, B.L. Jafarova,  
I.G. Abdurrahmanova***

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic, asadzade@rambler.ru

The article is devoted to the synthesis of an optimal model of the total transfer of nutrients by various surface runoffs into the main water body in agriculture. The problem of optimal placement of nitrogen and phosphorus sources, at which the total transfer of these nutrients into the main water body by the surface runoff would reach a minimum, in the vicinity of a certain set of local agricultural plots is considered. Several elements and provisions of the USDA – ARSC SWAT (Soil and Water Assessment Tools) model are used. It is taken into account that the total value of sedimentary masses remains constant in all surface runoffs feeding the main water body during the enumeration of all possible options for the distribution of nutrients by various runoff components. According to the solution of the problem of synthesizing the optimal model, the sources of these nutrients should be arranged in direct order in relation to the indicator of the concentration of sedimentary substances in the runoff, i.e. where there is a high concentration of sediment in the runoff water, the concentration of nutrients should be high and vice versa.

*Keywords:* surface water runoff, subsiding masses, nutritions, optimization, concentration, water channel.

---

**For citation:** *F.G. Agayev, H.H. Asadov, B.L. Jafarova, I.G. Abdurrahmanova.* Building an optimal model of surface water runoff in agriculture. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 694—701. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-694-701

---

## Введение

Известно, что из-за поверхностного стока загрязненных вод в водоемах происходит увеличение осадкообразования, вследствие чего страдает флора и фауна водных бассейнов [1]. Подобное часто происходит в сельском хозяйстве, характеризующимся неточечным загрязнением сельской местности [2]. Согласно [3], в сельской местности широко распространены химические загрязнения — пестициды, поступающие смываемыми водами при обработке сельхозучастков. Внесение загрязненных вод в водоемы способствует формированию в них как осадочного ила, так и взвешенных частиц. Скорость формирования осадочного ила или донных отложений определяется сочетанием биотических и абиотических факторов [4].

Для исследования отложений в водоемах организуются опорные станции, снабженные седиментационными ловушками, а также другой измерительной техникой для исследования течи и прозрачности водных масс [5, 6]. Типичными загрязнителями сельской местности являются диоксины, металлы, ртуть, питательные вещества ( $P$ ,  $N$ ), растворенные органические вещества в воде, пестициды, соли, бифенилы и др. Производство растительной продукции включает в себя пахотные работы, посадку растений, внесение удобрений, ирригационные работы, борьба с грызунами и др. Азот и фосфор поступают в грунтовые воды путем поверхностного стока, просачивания или подповерхностного стока. Фосфор в основном теряется по причине формирования поверхностного стока, азот теряется через поверхностный сток и путем просачивания в грунтовые воды.

Целью настоящей статьи является построение оптимальной модели суммарного переноса питательных веществ азота и фосфора различными поверхностными стоками в основной водоем зоны сельскохозяйственного производства. Кроме того, в настоящей статье рассматриваются вопросы оценки суммарного влияния возможных вариантов загрязненности компонентов поверхностного стока азотом и фосфором. При этом используются некоторые элементы и положения модели SWAT (модельные средства для оценки состояния почвы и водоемов), разработанной USDA—ARSC (службы сельскохозяйственных исследований Министерства сельского хозяйства США).

## Предлагаемый метод

Следует отметить, что вопросам загрязнения вод поверхностного стока азотом и фосфором в сельском хозяйстве посвящена обширная литература (см. например [7—9]). Однако, вопросы реализации оптимального контроля степени загрязнения поверхностных вод питательными веществами рассматриваются редко. Для изложения предлагаемого метода контроля вышеуказанной загрязненности вкратце изложим некоторые сведения по теории оценки загрязненности поверхностного стока [10]. Согласно [10], органический азот, входящий в состав удобрений, в составе частиц почвы транспортируется поверхностным стоком в реки и озера. Как было показано в [10], согласно модели SWAT, перенос органического азота поверхностным стоком определяется по следующей формуле:

$$N_{org.S} = 0,001 \cdot C_{org.N} \cdot \frac{S}{A_{HRU}} \cdot \varepsilon_{N.sed}, \quad (1)$$

где  $N_{org.S}$  — количество органического азота, переносимого в основной канал поверхностным стоком (в кг/га);  $C_{org.N}$  — концентрация органического азота в поверхностном слое почвы толщиной 10 мм (метрическая тонна);  $S$  — количество осадочных веществ за день (метрическая тонна);  $A_{HRU}$  — площадь гидрологической единицы реагирования ( $HRU$ ) (га);  $\varepsilon_{N.sed}$  — отношение обогащения азотом, определяемое как

$$\varepsilon_{N.sed} = 0,78 \cdot (C_{sed.S})^{-0,2468}, \quad (2)$$

где  $C_{sed.S}$  — концентрация осадочных веществ в поверхностном стоке ( $mg/m^3 H_2O$ ). Согласно [10], органический и минеральный фосфор, присоединенный к частицам почвы, может быть перенесен в основной водоканал поверхностным стоком. Количество переносимого фосфора в составе осадочной массы вычисляется по формуле:

$$P_{sed.sur} = 0,001 \cdot C_{sed.P} \cdot \frac{S}{A_{HRU}} \cdot \varepsilon_{P.sed}, \quad (3)$$

где  $P_{sed.sur}$  — количество фосфора, переносимого в составе осадочной массы в основной водоканал поверхностным стоком (кг/га);  $C_{sed.P}$  — концентрация фосфора в осадочной массе в верхнем слое толщиной 10 мм (метрическая тонна почвы);  $S$  — дневное количество осадочной массы (в метрических тоннах);  $A_{HRU}$  — площадь  $HRU$  (га);  $\varepsilon_{P.soil}$  — отношение обогащения фосфора, вычисляемое по формуле:

$$\varepsilon_{P.sed} = 0,78 \cdot (C_{sed.S})^{-0,2468}, \quad (4)$$

где  $C_{sed.S}$  — концентрация осадочных веществ в поверхностном стоке ( $mg/m^3 H_2O$ ). С учетом выражений (1) и (2) имеем:

$$N_{org.S} = 0,001 \cdot C_{org.N} \cdot \frac{S}{A_{HRU}} \cdot 0,78 \cdot (C_{sed.S})^{-0,2468}. \quad (5)$$

Принимая во внимание (3) и (4), получим:

$$P_{sed.sur} = 0,001 \cdot C_{sed.P} \cdot \frac{S}{A_{HRU}} \cdot 0,78 \cdot (C_{sed.S})^{-0,2468}. \quad (6)$$

С учетом внешнего сходства выражений (5) и (6) примем следующее модельное выражение, общее для  $N$  и  $P$ :

$$W = \frac{A_0 \cdot C_{N,P} \cdot (C_{sed.S})^{-0,2468}}{A_{HRU}}, \quad (7)$$

где

$$A_0 = 0,78 \cdot 10^{-3} \cdot S. \quad (8)$$

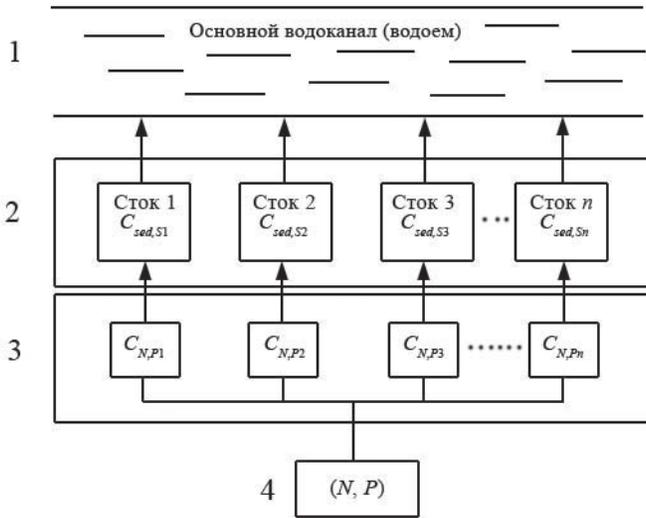


Рис. 1. Модельное представление схемы переноса питательных веществ ( $N, P$ ) в основной водоканал (пояснения в тексте).

Fig. 1. Model representation of the scheme for the transfer of nutrients ( $N, P$ ) to the main water canal (explanations in the text).

Для упрощения процедуры оптимизации полагаем в дальнейшем, что площадь всех HRU одинакова, а  $A_{HRU} = \text{const}$ . Для понимания механизма проводимой оптимизации и построения оптимальной модели переноса  $N$  и  $P$  рассмотрим предлагаемую модельную схему проводимой оптимизации (рис. 1).

На рис. 1 цифрами указаны: 1 — основной водоканал; 2 — блок модельного представления  $n$  количества компонентов поверхностного стока, которые пространственно разнесены, а  $i$ -я компонента характеризуется концентрацией осадочной массы  $C_{sed,Si}$   $i = \overline{1, n}$ ; 3 — блок модельных концентраций питательных веществ ( $N, P$ ), распределяемых по компонентам стока в различных вариантах путем перебора для поиска наилучшего варианта; 4 — суммарное количество переносимых питательных веществ ( $N, P$ ) существующего в зоне поверхностного стока.

Полагаем наличие двух упорядоченных множеств:

$$C_{sed,S} = \{C_{sed,Si}\}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (9)$$

$$C_{N,P} = \{C_{N,Pj}\}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Задача оптимизации формируется по методике безусловной вариационной оптимизации. Для этого следует вычислить оптимальную зависимость:

$$C_{sed,S} = f(C_{N,P}), \quad (11)$$

при которой:

1) некоторый вновь формируемый целевой функционал достигает экстремальной величины;

2) функция (12) является наиболее точной аппроксимацией дискретного аналога (11):

$$C_{sed.Si} = f(C_{N,Pj}); \quad (12)$$

3) выбор оптимальной функции (12) осуществляется с учетом следующего граничного условия:

$$\int_{C_{sed.si.min}}^{C_{sed.si.max}} f(C_{N,P}) = C. \quad (13)$$

Смысл условия (13) заключается в том, что возможный перебор вариантов нормирован, и показатели загрязненности при этом не изменяются.

Целевой функционал оптимизации формируется в следующем виде:

$$F_1 = \int_{C_{sed.si.min}}^{C_{sed.si.max}} \frac{A_0 \cdot C_{N,P} \cdot f(C_{N,P})^{-0,2468} dC_{N,P}}{A_{HRU}}. \quad (14)$$

С учетом выражений (13) и (14), условно приняв  $C_{sed.s.min} = 0$ , сформулируем задачу безусловной вариационной оптимизации как:

$$F_2 = \int_0^{C_{sed.si.max}} \frac{A_0 \cdot C_{N,P} \cdot f(C_{N,P})^{-0,2468} dC_{N,P}}{A_{HRU}} + \lambda \left[ \int_0^{C_{sed.s.max}} f(C_{N,P}) dC_{N,P} - C \right], \quad (15)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

### Решение задачи оптимизации

Согласно методу Эйлера—Лагранжа [11], решение задачи должно удовлетворить условию:

$$\frac{\partial \left\{ \frac{A_0 C_{N,P} \cdot f(C_{N,P})^{-0,2468}}{A_{HRU}} \right\} + \lambda f(C_{N,P})}{\partial f(C_{N,P})} = 0. \quad (16)$$

Из (16) находим:

$$-0,2468 \cdot \frac{A_0 C_{N,P}}{A_{HRU}} \cdot f(C_{N,P})^{-0,2468} + \lambda = 0. \quad (17)$$

Из (17) получаем исходное выражение для  $f(C_{N,P})$ :

$$f(C_{N,P}) = 1,2468 \sqrt[0,2468]{\frac{0,2468 \cdot A_0 \cdot C_{N,P}}{\lambda \cdot A_{HRU}}}. \quad (18)$$

С учетом (13) и (18) получим:

$$\frac{1}{1,2468\sqrt{\lambda}} \int_0^{C_{sed,s,max}} \frac{1,2468 \sqrt{0,2468 A_0 \cdot C_{N,P}}}{A_{HRU}} dC_{N,P} = C. \quad (19)$$

Из (19) получаем следующее выражение для вычисления множителя Лагранжа:

$$\lambda = \left[ \frac{1}{C} \int_0^{C_{sed,s,max}} \frac{1,2468 \sqrt{0,2468 A_0 C_{N,P}}}{A_{HRU}} dC_{N,P} \right]^{1,2468}. \quad (20)$$

Таким образом, в соответствии с выражениями (18) и (20), при наличии прямо пропорциональной функциональной связи (18) обеспечивается экстремум функционала (15). Можно показать, что этот экстремум является минимумом. Для этого достаточно взять вторую производную интеграла в (15) по искомой функции, которая оказывается всегда положительной величиной. Следовательно, средняя величина загрязненности водоемов при выполнении условий (13) и (20) достигает минимальной величины.

Что касается физических измерений показателей  $A_{HRU}$ ,  $C_{N,P}$  и  $S$ , то методики проведения измерений их хорошо разработаны. Отметим, что  $A_{HRU}$  может быть определен методами дистанционной геоинформатики,  $C_{N,P}$  — дистанционными спектральными методами определения концентрации хлорофилла в воде, а  $S$  — методами определения прозрачности вод.

### Заключение

Рассмотрена задача оптимального размещения источников  $N$  и  $P$  в зоне формирования поверхностного стока при котором суммарный перенос указанных питательных веществ в основной водоканал достигал бы минимума. При этом учитывается, что суммарная величина осадочных масс во всех поверхностных стоках питающих основной водоканал при переборе различных вариантов считается постоянной величиной.

Согласно решению оптимизационной задачи источники  $N$  и  $P$  следует расположить в прямом порядке в отношении показателя  $C_{sed,s}$ , т. е. там, где наблюдается большая концентрация осадочных веществ, концентрация питательных веществ должна быть большой, и наоборот.

### Список литературы

1. Meland S. Management of contaminated runoff water: current practice ad future research needs // Conference of European directors of roads. Brussels, Belgium. 20 April 2016. P. 1—82. URL: <https://www.cedr.eu/download/Publications/2016/CEDR2016-1-Management-of-contaminated-runoff-water.pdf>.
2. Guidelines control water pollution from agriculture In China: Decoupling water pollution from agricultural production // Food and Agriculture organization of The United Nations. Rome. 2013. FAO WATER REPORTS 40. URL: <http://www.fao.org/3/i3536e/i3536e.pdf>.
3. Давыдова Е.В., Костылева А.С., Жовнер Е.В. Характеристика источников загрязнений поверхностных сточных вод селитебных территорий // Современные тенденции в образовании и науке:

- состояние и перспективы: Сборник мат-лов международной науч.-практ. конф. в 4-х томах / Под общ. редакцией Г.Е. Накиповой и Т.А. Ханова. Караганда: КЭУК, 2018. Т. 2. С. 321—323.
4. Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Романов Р.Е., Леонова Г.А., Пузанов А.В. Гидробиологические условия формирования сапропелей в озерах юго-западной Сибири // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 1. С. 79—91.
  5. Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. Седиментогенез в белом море: вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и абсолютные массы донных осадков // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 429—441.
  6. Аверкиев А.С., Рыбалко А.Е., Лукьянов С.В., Новиков М.О. Оценка скорости осадконакопления в Финском заливе // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 19—20 декабря 2018, Санкт-Петербург. С. 65—72. URL: [http://mgo-spb.ru/f/143as\\_averkiyev\\_aye\\_rybalko\\_sv\\_lukyjanov\\_aa\\_gorbatenko.pdf](http://mgo-spb.ru/f/143as_averkiyev_aye_rybalko_sv_lukyjanov_aa_gorbatenko.pdf).
  7. Migliaccio R.W., Green C.H., Chaubey I., Arnold J.G. Phosphorus modeling in soil and water assessment tool (SWAT) model. URL: [https://www.researchgate.net/publication/264884900\\_7\\_Phosphorus\\_Modeling\\_in\\_Soil\\_and\\_Water\\_Assessment\\_Tool\\_SWAT\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/264884900_7_Phosphorus_Modeling_in_Soil_and_Water_Assessment_Tool_SWAT_Model).
  8. Liu Y., Li H., Cui G., Cao Y. Water quality attribution and simulation of non-point source pollution load flu in the Hulan River basin // Scientific Reports. 2020. 10:3012. doi: 10.1038/s41598/s41598-020-59980-7.
  9. Epelde A.M., Cerro I., Sanchez-Perez J.M., Sauvage S., Srinivasan R., Antiguada I. Application of the SWAT model to assess the impact of changes in agricultural management practices on water quality // Hydrological Sciences Journal. 2015. Vol. 60:5. P. 825—843. doi: 10.1080/02626667.2014.967692.
  10. Tiruneh B.A. Modeling water quality using soil and water assessment tool (SWAT) // Environmental System Analysis and Management. A case study in Lake Nalvasha Basin, Kenya. Thesis submitted to the International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. URL: [https://www.itc.nl/library/Papers\\_2004/msc/wrem/berihun\\_adamu\\_tiruneh.pdf](https://www.itc.nl/library/Papers_2004/msc/wrem/berihun_adamu_tiruneh.pdf).
  11. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

### References

1. Meland S. Management of contaminated runoff water: current practice ad future research needs. Conference of European directors of roads. Brussels, Belgium. 20 April 2016: 1—82. Available at: <https://www.cedr.eu/download/Publications/2016/CEDR2016-1-Management-of-contaminated-runoff-water.pdf>.
2. Guidelines control water pollution from agriculture In China: Decoupling water pollution from agricultural production. Food and Agriculture organization of The United Nations. Rome. 2013. FAO WATER REPORTS 40. Available at: <http://www.fao.org/3/i3536e/i3536e.pdf>.
3. Davydova E.V., Kostyleva A.S., Zhovner E.V. Characteristics of sources of pollution of surface waste waters of residential areas. *Sovremennye tendentsii v obrazovanii i nauke: sostoianie i perspektivy: Sbornik mat-lov mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. v 4-kh tomakh. Pod obshch. redaktsiei G.E. Nakipovoi i T.A. Khanova.* Modern trends in education and science: state and prospects: Collection of materials of international scientific-practical. conf. in 4 volumes. Under total. edited by G.E. Nakipova, T.A. Khanova. Karagandy: KEUK, 2018. 2: 321—323. [In Russian].
4. Ermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Romanov R.E., Leonova G.A., Puzanov A.V. Hydrobiological conditions of sapropel formation in the lakes of southwestern Siberia. *Vodnye resursy.* Water resources. 2016, 43, 1: 79—91. [In Russian].
5. Novigatsky A.N., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. Sedimentogenesis in the White Sea: vertical flows of dispersed sedimentary matter and absolute masses bottom sediments. *Okeanologiya.* Oceanology. 2020, 60, 3: 429—441. [In Russian].
6. Averkiev A.S., Rybalko A.E., Lukyanov S.V., Novikov M.O. Estimation of sedimentation rate in the Gulf of Finland. *Trudy II Vserossiiskoi konferentsii «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniia i perspektivy razvitiia».* Sankt-Peterburg. 19—20 dekabria 2018. Proceedings of the II All-Russian conference “Hydrometeorology and ecology: achievements and development prospects”. St. Petersburg.

- 19—20 December 2018: 65—72. Available at: [http://mgo-spb.ru/f/143as\\_averkiyev\\_aye\\_rybalko\\_sv\\_lukyjanov\\_aa\\_gorbatenko.pdf](http://mgo-spb.ru/f/143as_averkiyev_aye_rybalko_sv_lukyjanov_aa_gorbatenko.pdf). [In Russian].
7. *Migliaccio R.W., Green C.H., Chaubey I., Arnold J.G.* Phosphorus modeling in soil and water assessment tool (SWAT) model. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/264884900\\_7\\_Phosphorus\\_Modeling\\_in\\_Soil\\_and\\_Water\\_Assessment\\_Tool\\_SWAT\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/264884900_7_Phosphorus_Modeling_in_Soil_and_Water_Assessment_Tool_SWAT_Model)
  8. *Liu Y., Li H., Cui G., Cao Y.* Water quality attribution and simulation of non-point source pollution load flu in the Hulan River basin. *Scientific Reports*. 2020. 10:3012. doi: 10.1038/s41598/s41598-020-59980-7.
  9. *Epelde A.M., Cerro I., Sanchez-Perez J.M., Sauvage S., Srinivasan R., Antiguada I.* Application of the SWAT model to assess the impact of changes in agricultural management practices on water quality. *Hydrological Sciences Journal*. 2015, 60:5: 825—843. doi: 10.1080/02626667.2014.967692.
  10. *Tiruneh B.A.* Modeling water quality using soil and water assessment tool (SWAT). *Environmental System Analysis and Management*. A case study in Lake Nalvasha Basin, Kenya. Thesis submitted to the International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Available at: [https://www.itc.nl/library/Papers\\_2004/msc/wrem/berihun\\_adamu\\_tiruneh.pdf](https://www.itc.nl/library/Papers_2004/msc/wrem/berihun_adamu_tiruneh.pdf).
  11. *Elsgolts L.E.* Differential equations and calculus of variations. Moscow: Nauka, 1974: 432 p. [In Russian].

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 22.04.2021*

*Принята к публикации после доработки 30.08.2021*

### ***Сведения об авторах***

*Агаев Фахрaddin Гюльали оглы*, д-р техн. наук, профессор, Директор Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика, [direktor.tekti@mail.ru](mailto:direktor.tekti@mail.ru).

*Асадов Хикмет Гамид оглы*, д-р техн. наук, профессор, нач. отдела НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика, [asadzade@gambler.ru](mailto:asadzade@gambler.ru).

*Джафарова Бастии Лейсан гызы*, диссертант Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, старший преподаватель Гянджинского государственного университета.

*Абдурахманова Ирада Гамид гызы*, нач. отдела НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства.

### ***Information about authors***

*Agayev Fakhraddin Gulali oglu*, Grand PhD (Tech. Sci.), professor, Director of Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic.

*Asadov Hikmat Hamid oglu*, Grand PhD (Tech. Sci.), professor, head of department of research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic.

*Jafarova Basti Leysan gizi*, dissertant of Institute of Space Researches of Natural Resources of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic. Senior lecturer of Gyandja State University.

*Abdurrahmanova Irada Hamid gizi*, head of department of Research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency.

УДК [556.18:004.78]:556.555.8(282.247.415.53) doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725

## **Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами**

*Н.Н. Красногорская<sup>1</sup>, Е.А. Белозерова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НПП ООО «Юнисол», Уфа

<sup>2</sup> Башкирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения России, Уфа, elena.belozerova.ufa@gmail.com

В статье изложена методика определения средневзвешенного геоэкологического риска загрязнения и истощения водных ресурсов для административно-территориальных единиц. Определены риски истощения и загрязнения водных объектов в 40 муниципальных образованиях, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфы. На основании результатов расчета произведено зонирование муниципалитетов по величине средневзвешенного риска. Разработана система принятия решений по управлению водными ресурсами на основе анализа риска.

Настоящая методика основывается на концепции управления водными ресурсами на основе данных и может применяться к любому уровню административно-территориального деления (район, субъект, федеральные округ и др.).

*Ключевые слова:* риск, управление на основе данных, водные ресурсы, геоинформационная система.

## **Development of a geographic information system for decision making in water resources management**

*N.N. Krasnogorskaya<sup>1</sup>, E.A. Belozerova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> NPP Unisol LLC, Ufa, Russia

<sup>2</sup> Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

At the moment, fresh water is one of the most important strategic resources and the demand for it increases every year. Climate change, increase in the world population, rapid economic growth and irrational water use lead to water shortages. In this context, risk assessment of water resources depletion and pollution is particularly important. In order to effectively manage water resources, geographic information systems (GIS) are frequently used. These systems allow to combine data from different sources, in different formats (text, image, signals, etc.), analyzing and visualizing them in the form of charts and maps. This article proposes a methodology for assessing the risk of depletion and pollution of water bodies within the administrative-territorial division using GIS. When calculating water resources depletion risk several parameters are taken into account in particular: the watershed area (within the boundaries in the municipality territory), household water consumption (surface water and groundwater), data of land use, the average annual runoff, karst phenomena. The water resources pollution risk is determined by: criterion of specific combinatorial water pollution index and water pollution factor. The methodology has been tested for 40 municipalities located in the catchment area of the river Ufa. The municipalities under study were divided into several zones according to the value of the average weighted geoecological risk of water resources depletion and pollution. On the basis of the methodology, a decision-making support system for water management in municipalities has been developed. As a result of water resources

depletion and pollution risk assessment, a set of measures for more effective water management in the territory is proposed.

*Keywords:* risk, data-driven management, water resources, geographic information system.

---

**For citation:** *N.N. Krasnogorskaya, E.A. Belozeroва. Development of a geographic information system for decision making in water resources management. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydro-meteorology and Ecology. 2021, 65: 702—725. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-702-725*

---

## Введение

Пресная вода считается одним из самых ценных ресурсов на Земле, однако ее запасы уязвимы без адекватных стратегий управления. В отчете [1] сказано, что нагрузка на водные ресурсы увеличивается по мере роста спроса на них и обострения последствий изменения климата. В странах с высоким уровнем нагрузки на водные ресурсы в настоящее время проживают более 2 млрд человек. Свыше 4 млрд сталкиваются с серьезной нехваткой воды, как минимум 1 месяц в году. Глобальный средний дефицит воды — 11 %, однако в 31 стране мира дефицит воды составляет от 25 % (минимальный порог дефицита воды) до 70 %, а в 22 странах этот показатель превышает 70 %, что означает серьезный дефицит воды.

Для эффективного управления водными ресурсами все чаще применяются геоинформационные системы [2—5]. Так, в работе [6] приведен пример геоинформационной системы для управления водными ресурсами участка р. Арканзас (США) и показано, что внедрение ГИС позволяет сохранить качество поверхностных и подземных вод, спланировать количество воды, необходимое на сельскохозяйственные нужды и не допустить нарушения межрегиональных договоренностей по водопользованию.

В статье [7] излагаются проблемы муниципальных образований Канады при реализации стратегий охраны источников воды в провинции Квебек. Авторами предлагается внедрение программного обеспечения (ПО), которое может интегрировать данные о землепользовании с данными о качестве воды, предоставляемых несколькими организациями в различных форматах, не всегда совместимых между собой. ПО представляет собой гибкую программную платформу для сбора и обмена данными и их анализа в целях принятия управленческих решений.

Ученые из Индии используют ГИС как инструмент по оценке перераспределения водных ресурсов вследствие урбанизации на примере региона Хайдарабад [8]. В работах [9—12] предлагается управлять водными ресурсами и территориями с использованием данных дистанционного зондирования и космических снимков, собираемых в режиме реального времени, интегрированных в ГИС системы для целей сельского хозяйства и водоснабжения населенных пунктов, а также прогнозирования экстремальных ситуаций на водосборе.

Некоторые исследователи предлагают совмещать современные вычислительные технологии с геоинформационными системами. Например, в работе [13] рассматривается использование методов нечеткой логики и ГИС для определения качества подземных вод, выделения участков с водой, пригодной для

питьевого водоснабжения. В работе [14] авторами предлагается экспертная система принятия решений для управления водными ресурсами на основе облачных вычислений.

С помощью геоинформационных систем [15, 16] оценивается риск количественного и качественного истощения водных ресурсов для бассейнов исследуемых рек. Однако, в работах, посвященных тематике управления водными ресурсами и оценке риска возникновения экстремальных гидрологических ситуаций, часто применяется бассейновый подход, т. е. все характеристики рассчитываются для водосборной территории. Между тем, водосборные территории и административно-территориальные границы не всегда совпадают, вследствие чего это затрудняет принятие управленческих решений на уровне субъектов, районов, муниципальных образований и др.

При решении проблем рационального водопользования в рамках административно-территориального деления возникает целый ряд проблем методического и методологического характера:

— неопределенность критериев для оценки экологического состояния водных объектов;

— поливариантность взаимосвязей количественных и качественных характеристик водного объекта из-за региональных природных, антропогенных, климатических особенностей территории [17];

— отсутствие привязки гидрометеорологических данных к административно-территориальным единицам;

— отсутствие системного подхода в сборе и обработке данных, проблемы совместимости баз данных, формируемые различными организациями и ведомствами [18, 19].

Таким образом, ошибки в оценке водных ресурсов могут быть связаны с различными уровнями территориального планирования (муниципальный, региональный, национальный) и усугубляться транскалярностью исходных данных для оценки, т. е. различными форматами и разрешением данных.

В настоящей статье предложена методика оценки риска истощения и загрязнения водных объектов в рамках административно-территориального деления с использованием геоинформационных систем. На основе этой методики разработана система поддержки принятия решения при управлении водными ресурсами. Для апробации методики выбрана территория водосборного бассейна р. Уфы и муниципальные образования, расположенные на этой территории.

Цель настоящего исследования заключается в формировании системы поддержки принятия решений (методической основы), определение источников данных, получение результатов оценки рисков истощения и загрязнения территорий муниципальных образований.

### **Исходные данные**

Для разработки геоинформационной системы поддержки принятия решений выбран водосборный бассейн р. Уфы. Уфа — река III порядка Волжского бассейна, водосборная площадь которой располагается в пределах четырех субъектов

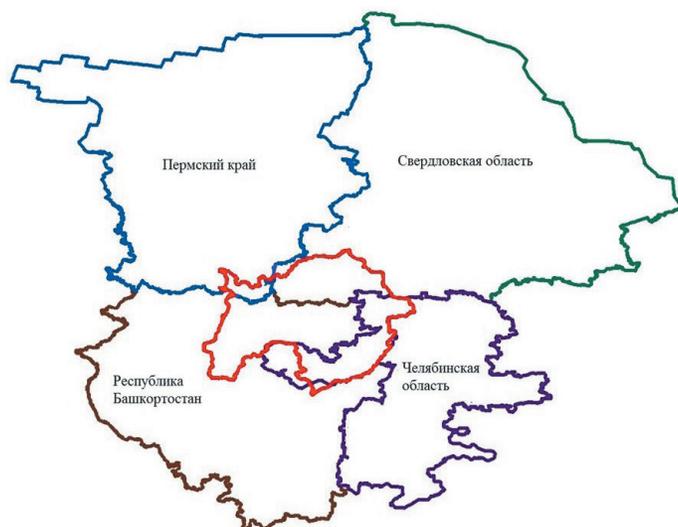


Рис. 1. Расположение водосборного бассейна р. Уфы.

Fig. 1. The river Ufa catchment area location.

РФ: Пермского края, Свердловской, Челябинской областей и Республики Башкортостан (РБ); самый крупный правосторонний приток р. Белой (рис. 1). Гидрографическая сеть бассейна р. Уфы насчитывает более 5000 водотоков разной длины [20].

Территория водосборного бассейна р. Уфы подразделяется на 25 водосборных бассейнов (табл. 1).

Таблица 1

Обозначение водосборов бассейна р. Уфы и координаты их устьев [21]

Designation of the River Ufa basin catchments and coordinates of their mouths [21]

| №  | Название поста                       | Условное обозначение | Период наблюдения                 | Координаты устья |       |
|----|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------|-------|
|    |                                      |                      |                                   | с.ш.             | в.д.  |
| 1  | р. Уфа — г. Нязепетровск             | UN                   | 1963—1987                         | 56,02            | 59,57 |
| 2  | р. Уфа — г. Михайловск               | UM                   | 1966—1969,<br>1971, 1974—<br>1987 | 56,41            | 59,09 |
| 3  | р. Уфа — г. Красноуфимск             | UK                   | 1963—1987                         | 56,61            | 57,79 |
| 4  | р. Уфа — с. Верхний Суян             | UV                   | 1966—1987                         | 56,04            | 57,27 |
| 5  | р. Уфа — Павловская ГЭС, нижний бьеф | UP                   | 1963—1987                         | 55,40            | 56,54 |
| 6  | р. Ай — с. Веселовка                 | AV                   | 1966—1987                         | 54,96            | 59,54 |
| 7  | р. Ай — с. Метели                    | AM                   | 1963—1987                         | 56,02            | 57,94 |
| 8  | р. Ай — г. Злагоуст                  | AZ                   | 1963—1979                         | 55,19            | 59,62 |
| 9  | р. Ай — с. Лаклы                     | AL                   | 1963—1987                         | 55,20            | 58,55 |
| 10 | р. Юрюзань — пгт. Вязовая            | JV                   | 1966—1987                         | 54,90            | 58,34 |

Окончание табл. 1

| №  | Название поста                       | Условное обозначение | Период наблюдения  | Координаты устья |       |
|----|--------------------------------------|----------------------|--------------------|------------------|-------|
|    |                                      |                      |                    | с.ш.             | в.д.  |
| 11 | р. Юрюзань — д. Чулпан               | JC                   | 1963—1987          | 55,29            | 58,12 |
| 12 | р. Юрюзань — пос. Агняш              | JA                   | 1963—1987          | 55,58            | 57,22 |
| 13 | р. Юрюзань — с. Екатериновка         | JE                   | 1963—1979,<br>1982 | 54,74            | 58,51 |
| 14 | р. Юрюзань — ж. д ст. Юрюзань        | JJ                   | 1966—1974          | 54,45            | 58,44 |
| 15 | р. Бисерть — с. Гайны                | BG                   | 1963—1987          | 56,72            | 58,03 |
| 16 | р. Тесьма — г. Златоуст              | TZ                   | 1963—1987          | 55,19            | 59,72 |
| 17 | р. Куса — пгт Магнитка               | KM                   | 1965—1987          | 55,34            | 59,68 |
| 18 | р. Большая Арша — д. Вознесенская    | BA                   | 1963—1987          | 55,54            | 59,63 |
| 19 | р. Тюй — д. Гумбино                  | TG                   | 1963—1987          | 55,99            | 57,04 |
| 20 | р. Сарс — с. Султанбеково            | SS                   | 1963—1987          | 56,04            | 57,14 |
| 21 | р. Тюлюк — с. Тюлюк                  | TT                   | 1965—1987          | 54,62            | 58,77 |
| 22 | р. Яманелга — выше ист. Тюба (Устье) | YE                   | 1971—1986          | 55,43            | 56,62 |
| 23 | р. Киги — д. Кондаковка              | KK                   | 1980—1987          | 55,60            | 58,48 |
| 24 | р. Большой Ик — д. Таишево           | VI                   | 1963—1987          | 55,76            | 58,44 |
| 25 | р. Катав — п. Верхний Катав          | VK                   | 1966—1987          | 54,62            | 58,29 |

На территории водосборного бассейна р. Уфы расположены 40 муниципальных образований (табл. 2).

Таблица 2

Перечень муниципальных образований,  
расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфы [22, 23]  
The list of municipalities located in the river Ufa catchment area [22, 23]

| №                       | Название муниципального образования | Площадь*, км <sup>2</sup> | Плотность населения, чел/<br>км <sup>2</sup> |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|
| <i>Пермский край</i>    |                                     |                           |  |
| 1                       | Чернушинский р-н                    | 318                       | 30,03  |
| 2                       | Октябрьский р-н                     | 1909                      | 7,81   |
| <i>Челябинская обл.</i> |                                     |                           |  |
| 3                       | Ашинский р-н                        | 328                       | 20,58  |
| 4                       | Катав-Ивановский р-н                | 2032                      | 8,44   |
| 5                       | Саткинский р-н                      | 650                       | 32,54  |
| 6                       | Нязепетровский р-н                  | 468                       | 4,63   |
| 7                       | Кусинский р-н                       | 1473                      | 17,24  |
| 8                       | Златоустовский городской округ (ГО) | 1706                      | 87,59  |
| 9                       | Верхнеуфалейский ГО                 | 1259                      | 18,83  |
| 10                      | Карабашский ГО                      | 215                       | 16,07  |
| 11                      | Кыштымский ГО                       | 204                       | 50,80  |
| 12                      | Каслинский р-н                      | 106                       | 11,10  |
| 13                      | Усть-Катавский ГО                   | 51                        | 36,58  |
| 14                      | Трехгорный ГО                       | 163                       | 200,40                                       |

Окончание табл. 2

| №                         | Название муниципального образования | Площадь*, км <sup>2</sup> | Плотность населения, чел/<br>км <sup>2</sup> |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|
| <i>Респ. Башкортостан</i> |                                     |                           |  |
| 15                        | Уфимский р-н                        | 253                       | 54,86  |
| 16                        | Бирский р-н                         | 15                        | 36,40  |
| 17                        | Мишкинский р-н                      | 168                       | 13,87  |
| 18                        | Балтачевский р-н                    | 24                        | 11,88  |
| 19                        | Благовещенский р-н                  | 1865                      | 21,86  |
| 20                        | ГО Уфа                              | 392                       | 1586,06                                      |
| 21                        | Иглинский р-н                       | 984                       | 24,75  |
| 22                        | Аскинский р-н                       | 1958                      | 7,42   |
| 23                        | Нуримановский р-н                   | 128                       | 8,10   |
| 24                        | Караидельский р-н                   | 763                       | 6,74   |
| 25                        | Салаватский р-н                     | 870                       | 11,09  |
| 26                        | Белорецкий р-н                      | 506                       | 9,00   |
| 27                        | Дуванский р-н                       | 65                        | 9,54   |
| 28                        | Мечетлинский р-н                    | 1561                      | 14,76  |
| 29                        | Кигинский р-н                       | 1607                      | 10,21  |
| 30                        | Белокатайский р-н                   | 2748                      | 6,05   |
| 31                        | Учалинский р-н                      | 64                        | 15,82  |
| <i>Свердловская обл.</i>  |                                     |                           |  |
| 32                        | Красноуфимский ГО                   | 2684                      | 7,40   |
| 33                        | Ачитский ГО                         | 1646                      | 7,46   |
| 34                        | Шалинский ГО                        | 105                       | 3,99   |
| 35                        | Аргинский ГО                        | 2779                      | 9,84   |
| 36                        | Нижнесергинский р-н                 | 3543                      | 10,65  |
| 37                        | Бисертский ГО                       | 1232                      | 7,69   |
| 38                        | ГО Первоуральск                     | 59                        | 69,65  |
| 39                        | ГО Ревда                            | 102                       | 57,10  |
| 40                        | Полевской ГО                        | 126                       | 44,23  |

\* Указана площадь муниципального образования, расположенного в границах водосборной территории р. Уфы

Карта-схема водосборов и административно-территориального деления водосборного бассейна р. Уфы представлена на рис. 2.

Как видно из рисунков 1 и 2, границы водосборов и муниципальных образований не совпадают. Одна административно-территориальная единица может быть расположена на территории нескольких водосборов.

В настоящей работе в качестве входных данных использованы: гидрологические показатели водотоков, геоинформационные данные, относящихся к водосборному бассейну р. Уфы, а также демографические данные.

**Гидрологические показатели:** по 25 створам, расположенным в пределах водосборной территории р. Уфа. Период исследования: 1963—1987 гг.

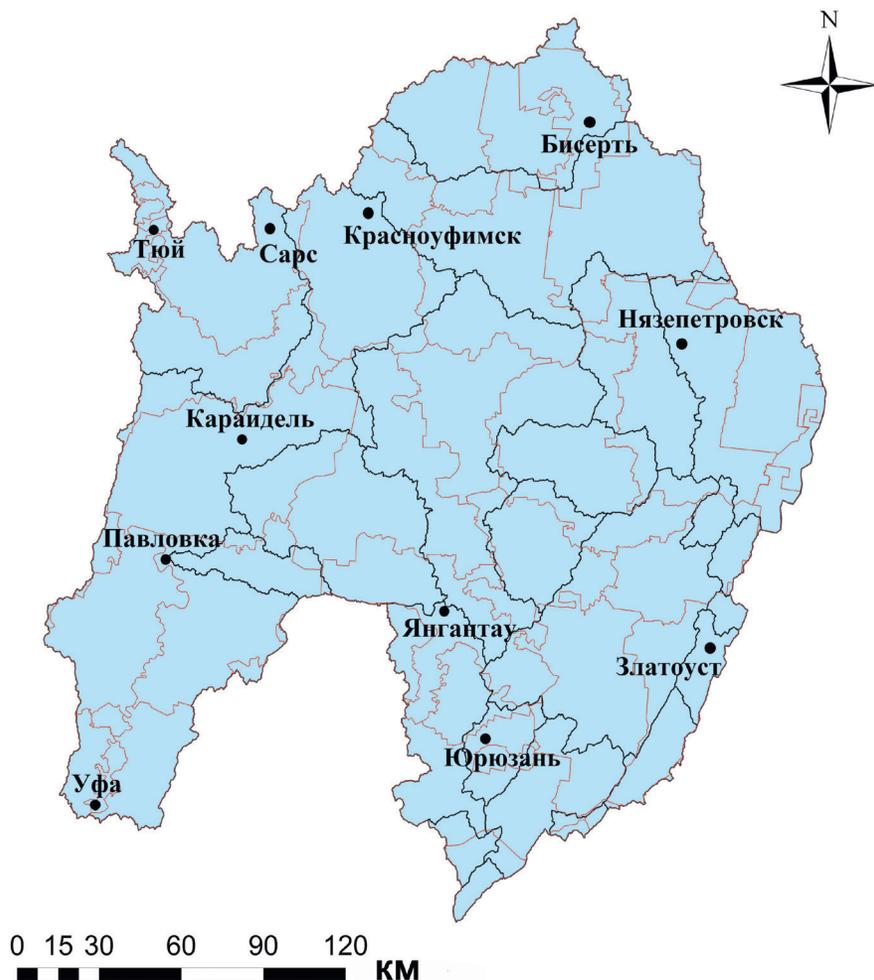


Рис. 2. Карта схема водосборного бассейна р. Уфы:  
красные линии — административно-территориальные границы;  
черные линии — границы водосборных бассейнов.

Fig. 2. Schematic map of the river Ufa catchment:  
red lines — administrative and territorial boundaries; black lines — catchment area boundaries.

Проанализировано более 197 000 ежедневных данных о расходе, опубликованных в Гидрологических ежегодниках Уральского управления гидрометеорологической службы [24].

**Геоинформационные данные:** геоинформационные карты геологического строения; топографические карты исследуемой территории; цифровая модель рельефа (ЦМР).

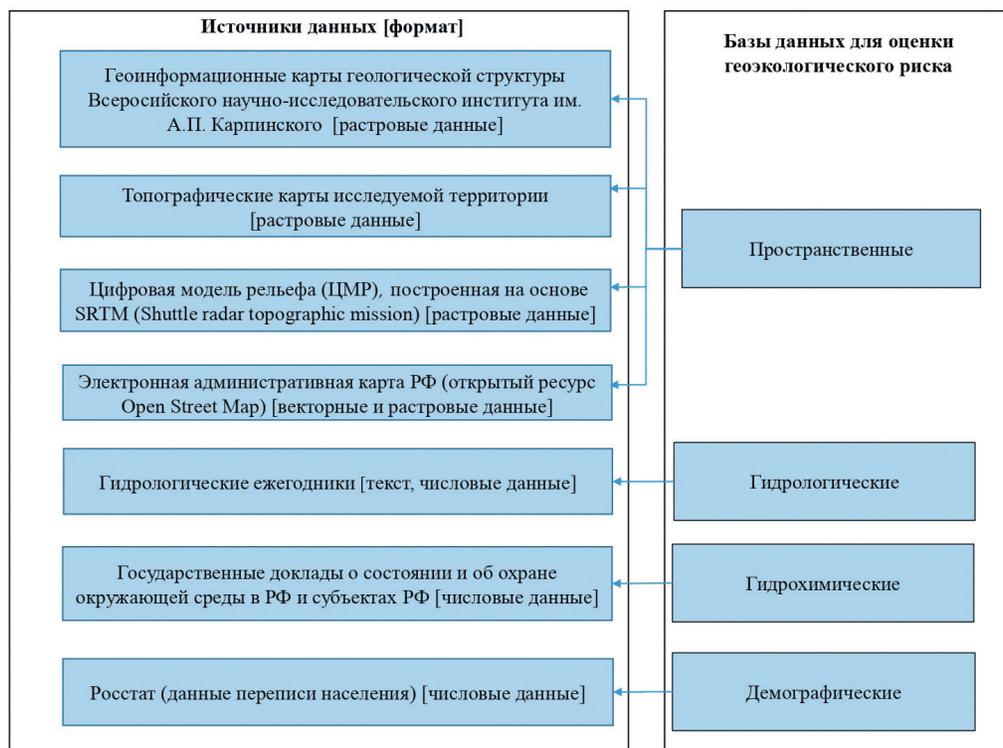


Рис. 3. Исходные данные для построения геоинформационной системы управления рисками загрязнения и истощения на водосборе р. Уфы.

Fig. 3. Initial data for a geographic information system for pollution and depletion risk management of the river Ufa catchment.

**Демографические данные:** население субъектов РФ, в которых расположен водосборный бассейн р. Уфа на 1 января 2020 г. [22].

На рис. 3 представлена систематизация исходной информации и ее распределение по базам данных. В качестве программного обеспечения для обработки и визуализации геоданных используются программы ArcGIS 10.1 и QGIS.

### Методика определения риска истощения и загрязнения

В настоящей работе расчет геоэкологического риска истощения и загрязнения водных ресурсов основывается на способе определению риска длительного (хронического) воздействия, разработанного Международным институтом оценки риска здоровью (А.В. Киселев, К.Б. Фридман) [15]. Данный подход к расчету риска адаптирован к отечественным нормативам и применим для различных составляющих окружающей среды (воздух, питьевая вода и т.д.). Оценка риска основана на линейно-экспоненциальной (1) и пороговой (2) математических моделях.

1. Линейно-экспоненциальная математическая модель:

$$Risk = 1 - \exp\left\{-Unit_{Risk} C^B t\right\}, \quad (1)$$

где  $Risk$  — потенциальный риск;  $Unit\_Risk$  — единица риска, определяемая как фактор пропорции роста риска в зависимости от величины действующей концентрации (дозы);  $C$  — реальная концентрация (или доза) вещества, оказывающая воздействие за время  $t$ ;  $B$  — коэффициент, учитывающий особенности токсических свойств вещества.

2. Пороговая модель:

$$Risk = H(C - C_m), \quad (2)$$

где  $H$  — функция Хевисайда,  $H(x) = 0$  при  $x < 0$  и  $H(x) = 1$   $x > 0$ ;  $C_m$  — пороговая концентрация.

Уравнение расчета потенциального риска наступления хронических эффектов (3):

$$Risk = 1 - \exp\left\{I_n(0,84) / \left(\frac{ПДК}{K_3}\right) / LADD\right\}, \quad (3)$$

где ПДК определяется как отношение минимальных пороговых концентраций загрязняющих веществ, вызывающих достоверный эффект токсического действия ( $C_{lim}$ ) и коэффициента запаса ( $K_{зап}$ ), принимаемый равным 100 для веществ с выраженной вероятностью отдаленных последствий и 10 для остальных веществ;  $K_3$  — коэффициент загрязнения;  $LADD$  (Lifetime Average Daily Dose) приравнивается к среднесуточной дозе за ожидаемую продолжительность жизни (ССДЖ). ССДЖ отражает различия между продолжительностью периода воздействия и сроком жизни человека, подвергающегося этому воздействию.

На основе работ [15—17] и с учетом моделей, описанных выше, риск загрязнения определялся по формуле:

$$Risk_{загр} = 1 - \exp\left\{\ln(0,84) \cdot \text{УКИЗВ} \cdot K_3 \cdot K_{зап}\right\}, \quad (4)$$

где УКИЗВ — удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков [16], который предусматривает оценку качества воды по концентрациям более широкого спектра загрязняющих веществ и степени загрязненности воды;  $K_{зап}$  — коэффициент запаса, принимаемый равным 10.

Риск истощения водных ресурсов определяется по формуле:

$$Risk_{ист} = 1 - \exp\left\{\ln(0,84) \cdot K_{ист} \cdot K_{п}\right\}, \quad (5)$$

где  $K_{ист}$  — коэффициент истощения водных ресурсов, определяется как

$$K_{ист} = \frac{V_{пов} + V_{под}}{Q_{год ст} \cdot S_{ВДС} \cdot K_{исп}}, \quad (6)$$

где  $V_{пов}$  — водоотбор поверхностных вод, тыс. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>;  $V_{под}$  — водоотбор подземных вод, тыс. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>;  $Q_{год ст}$  — среднемноголетний расход годового стока, м<sup>3</sup>/с;  $S_{ВДС}$  — действующая площадь водосборов, км<sup>2</sup>;  $K_{исп}$  определяется в зависимости

от геологической структуры поверхности. Поправочный коэффициент геологической структуры поверхности, содержащей карстовые осадочные породы, принимается как 1,5; не содержащей данный тип геологических пород — 1.

Средневзвешенный геоэкологический риск рассчитывается по формуле:

$$Risk_{cp} = 1 - \exp \frac{1}{2} \left\{ \ln(1 - Risk_{ист}) + \ln(1 - Risk_{загр}) \right\}, \quad (7)$$

где  $Risk_{ист}$ ,  $Risk_{загр}$  — показатели риска истощения и загрязнения, соответственно.

Ранжирование риска происходит в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Ранжирование значений риска

Risk values ranking

| Величина средневзвешенного риска $Risk_{cp}$ | Характеристика риска |
|--|----------------------|
| 0,00—0,25                                    | Слабая               |
| 0,25—0,50                                    | Средняя              |
| 0,50—0,75                                    | Сильная              |
| 0,75—1,00                                    | Очень сильная        |

### Методика определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц

Для определения риска истощения и загрязнения водных объектов на территории административно-территориальных единиц изложенная выше методика нуждается в преобразовании. В частности, все параметры, учитываемые в методике, пересчитываются на масштаб исследуемой административно-территориальной единицы (район, область, округ и др.). В настоящем исследовании расчет осуществляется для муниципальных образований, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфы. Перечень преобразований методики определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц приведен в табл. 4.

Таблица 4

Перечень преобразований методики определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц

The list of changes in the methodology for determining the depletion and pollution risk of water bodies inside the administrative and territorial units

| Обозначение параметра | Источник  | Адаптация для муниципальных образований   |
|-----------------------|---|---|
| $V_{пов}$ и $V_{под}$ | Росстат:<br>«Численность населения РФ по муниципальным образованиям на 1 января 2020 г.». [22]<br>Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды РФ». [25]<br>Данные по бытовому водопотреблению на душу населения. | Определение населения в каждом исследуемом муниципальном образовании (МО). По данным структуры водопользования, определение объемов бытового водопотребления для каждого МО (произведение объема душевого бытового водопотребления и количества человек, проживающих на территории каждого МО). |

| Обозначение параметра | Источник  | Адаптация для муниципальных образований  |
|-----------------------|---|--|
| $S_{\text{вдс}}$      | Электронные карты [26]: карта водосборных бассейнов; административно-территориальная карта.   | Определение площади каждого водосборного бассейна, находящегося на территории МО (т. к. административно-территориальные границы и границы водосборов зачастую не совпадают, то МО может включать в себя несколько частей площадей водосборных бассейнов).  |
| $Q_{\text{год ст}}$   | Гидрологический ежегодник Уральского и Башкирского отделений Гидрометцентра; данные о расходах воды в реках на исследуемой территории. [24]   | Определение среднего многолетнего значения расхода воды для каждого исследуемого водосбора.<br>Определение модуля стока $M$ для каждого водосборного бассейна (отношение расхода воды в реке к площади водосбора).<br>Определение годового стока каждого МО, как суммы произведений модуля стока каждого конкретного бассейна на площадь доли этого бассейна, принадлежащего каждому МО. |
| $K_{\text{исп}}$      | Карты геологического строения Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского. [27]   | Определяется по геологическим картам. Для каждого МО поправочный коэффициент $K_{\text{исп}}$ определяется в зависимости от геологической структуры большей части поверхности.   |
| $K_{\text{п}}$        | $K_{\text{п}}$ зависит от $K_{\text{исп}}$ .<br>Значение поправочного коэффициента в зависимости от коэффициента истощения. [17]  | См. данные в табл. 4.1.  |
| УКИЗВ                 | Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2011—2019 гг. [28]<br>Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2017—2019 гг. [29]<br>Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2007—2016 гг. [29]<br>Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края» 2000—2018 гг. [30]<br>Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2010—2019 гг. [31] | По данным докладов о состоянии окружающей среды определяются среднеемноголетние значения УКИЗВ. Значения УКИЗВ интерполируются на территории водосборного бассейна. По полученной интерполяции определяются среднее многолетнее значение УКИЗВ для каждого МО.   |
| $K_{\text{зап}}$      | Коэффициент запаса, принимаемый равным 10 [17].   |  |
| $K_3$                 | Коэффициент загрязнения зависит от значений УКИЗВ [17]  | См. данные в табл. 4.2.  |

Таблица 4.1

| $K_{ист}$ | $K_{п}$ |
|-----------|---------|
| 0,1—0,5   | 0,5     |
| 0,5—1,0   | 1,0     |
| 1,0—1,5   | 1,5     |
| 1,5—2,0   | 2,0     |
| 2,0—2,5   | 2,5     |

Таблица 4.2

| УКИЗВ    | Характеристика                      | $K_3$ |
|----------|-------------------------------------|-------|
| 0,2—1,0  | очень чистые, чистые                | 0,5   |
| 1,0—4,0  | умеренно загрязненные, загрязненные | 1,0   |
| 4,0—10,0 | грязные, очень грязные              | 1,5   |
| > 10,0   | чрезвычайно грязные                 | 2,0   |

### Определение риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфы

Водопотребление для каждого муниципального образования, расположенного на водосборной территории р. Уфы определяется на основе государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». Для каждого субъекта РФ этот показатель разный. Для примера на рис. 4 в виде графика приведена структура водопотребления Республики Башкортостан в период 2010—2018 гг.

Результаты расчета риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфы сведены в табл. 5.

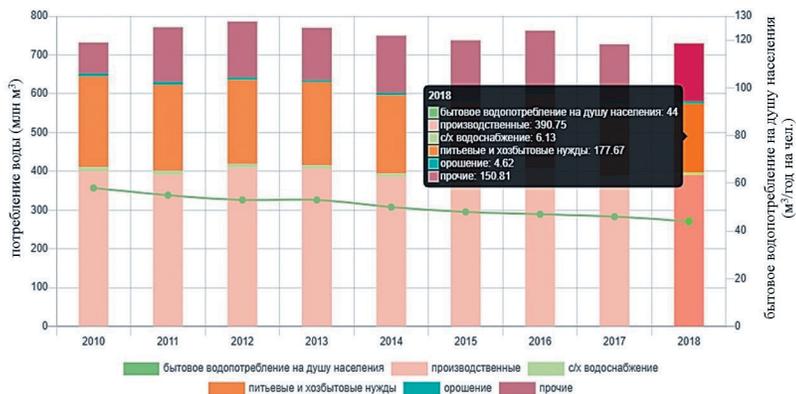


Рис. 4. Структура водопользования в Республике Башкортостан 2010—2018 гг. [25].

Fig. 4. Structure of water use in the Republic of Bashkortostan 2010—2018 [25].

Результаты расчета риска истощения водных объектов муниципальных образований (МО) на территории водосборного бассейна р. Уфы  
The results of the water bodies depletion risk calculated for municipalities in the river Ufa catchment area

| №                         | Название муниципального округа | $Q_{MO}$<br>м <sup>3</sup> /сек | Водопотребление на душу населения, тыс. м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup> /чел. | Водопотребление МО, тыс. м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup> | $K_{исп}$ | $K_{ист}$ | $K_{п}$ | $Risk_{ист}$ |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|--|-----------|-----------|---------|--------------|
| <i>Пермский край</i>      |                                |                                 |   |  |           |           |         |              |
| 1                         | Чернушинский р-н               | 1,78                            | 45  | 429729,30  | 1,5       | 0,51      | 0,5     | 0,0431       |
| 2                         | Октябрьский р-н                | 11,25                           | 45  | 701142,75  | 1,5       | 0,02      | 0,5     | 0,0018       |
| <i>Челябинская обл.</i>   |                                |                                 |   |  |           |           |         |              |
| 3                         | Ашинский р-н                   | 3,77                            | 59  | 398264,16  | 1,0       | 0,32      | 0,5     | 0,0277       |
| 4                         | Кагав-Ивановский р-н           | 23,37                           | 59  | 1011854,72   | 1,0       | 0,02      | 0,5     | 0,0019       |
| 5                         | Саткинский р-н                 | 18,51                           | 59  | 4611503,72   | 1,5       | 0,07      | 0,5     | 0,0060       |
| 6                         | Нязепетровский р-н             | 21,87                           | 59  | 948173,07  | 1,0       | 0,01      | 0,5     | 0,0011       |
| 7                         | Кусинский р-н                  | 9,66                            | 59  | 1551169,00   | 1,5       | 0,07      | 0,5     | 0,0061       |
| 8                         | Златоустовский ГО              | 13,65                           | 59  | 8816283,86   | 1,0       | 0,38      | 0,5     | 0,0325       |
| 9                         | Верхнеуфалейский ГО            | 9,19                            | 59  | 1398711,23   | 1,5       | 0,08      | 0,5     | 0,0070       |
| 10                        | Карабашский ГО                 | 1,57                            | 59  | 203847,95  | 1,5       | 0,40      | 0,5     | 0,0345       |
| 11                        | Кыштымский ГО                  | 1,49                            | 59  | 611428,80  | 1,5       | 1,34      | 1,5     | 0,2960       |
| 12                        | Каслинский р-н                 | 0,77                            | 59  | 69419,40   | 1,5       | 0,56      | 0,5     | 0,0480       |
| 13                        | Усть-Катавский ГО              | 7,57                            | 59  | 1454640,28   | 1,0       | 0,29      | 0,5     | 0,0245       |
| 14                        | Трехгорный ГО                  | 1,87                            | 59  | 1927246,80   | 1,0       | 6,31      | 2,5     | 0,9360       |
| <i>Респ. Башкортостан</i> |                                |                                 |   |  |           |           |         |              |
| 15                        | Уфимский р-н                   | 1,91                            | 44  | 610701,52  | 1,5       | 0,84      | 1,0     | 0,1366       |
| 16                        | Бирский р-н                    | 0,11                            | 44  | 24024,00   | 1,5       | 9,43      | 2,5     | 0,9836       |
| 17                        | Мишкинский р-н                 | 1,27                            | 44  | 102527,04  | 1,5       | 0,32      | 0,5     | 0,0276       |
| 18                        | Балтачевский р-н               | 0,18                            | 44  | 12545,28   | 1,5       | 1,92      | 2,0     | 0,4886       |
| 19                        | Благовещенский р-н             | 14,08                           | 44  | 1793831,60   | 1,5       | 0,05      | 0,5     | 0,0040       |
| 20                        | ГО Уфа                         | 2,96                            | 44  | 27356362,88  | 1,5       | 15,72     | 2,5     | 0,9989       |
| 21                        | Иглинский р-н                  | 7,43                            | 44  | 1071576,00   | 1,5       | 0,10      | 0,5     | 0,0085       |
| 22                        | Аскинский р-н                  | 14,78                           | 44  | 639247,84  | 1,5       | 0,01      | 0,5     | 0,0013       |
| 23                        | Нуримановский р-н              | 15,54                           | 44  | 919155,60  | 1,5       | 0,02      | 0,5     | 0,0013       |
| 24                        | Караидельский р-н              | 27,59                           | 44  | 1088078,64   | 1,5       | 0,01      | 0,5     | 0,0006       |
| 25                        | Салаватский р-н                | 15,87                           | 44  | 1057897,28   | 1,0       | 0,03      | 0,5     | 0,0027       |
| 26                        | Белорецкий р-н                 | 5,82                            | 44  | 200376,00  | 1,0       | 0,07      | 0,5     | 0,0059       |
| 27                        | Дуванский р-н                  | 22,79                           | 44  | 1360861,92   | 1,5       | 0,01      | 0,5     | 0,0011       |
| 28                        | Мечетлинский р-н               | 9,83                            | 44  | 1013775,84   | 1,5       | 0,04      | 0,5     | 0,0038       |
| 29                        | Кигинский р-н                  | 10,12                           | 44  | 721928,68  | 1,0       | 0,04      | 0,5     | 0,0039       |
| 30                        | Белокатайский р-н              | 20,03                           | 44  | 833472,20  | 1,0       | 0,01      | 0,5     | 0,0012       |
| 31                        | Учалинский р-н                 | 1,28                            | 44  | 44549,12   | 1,0       | 0,54      | 1,0     | 0,0905       |
| <i>Свердловская обл.</i>  |                                |                                 |   |  |           |           |         |              |
| 32                        | Красноуфимский ГО              | 17,45                           | 73  | 1449896,80   | 1,5       | 0,02      | 0,5     | 0,0018       |

Окончание табл. 5

| №  | Название муниципального округа | $Q_{MO}$<br>м <sup>3</sup> /сек | Водопотребление на душу населения, тыс. м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup> /чел. | Водопотребление МО, тыс. м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup> | $K_{исп}$ | $K_{ист}$ | $K_{п}$ | $Risk_{ист}$ |
|----|--------------------------------|---------------------------------|---|--|-----------|-----------|---------|--------------|
| 33 | Ачитский ГО                    | 11,69                           | 73  | 896378,68  | 1,5       | 0,03      | 0,5     | 0,0027       |
| 34 | Шалинский ГО                   | 0,75                            | 73  | 30583,35   | 1,0       | 0,39      | 0,5     | 0,0335       |
| 35 | Артинский ГО                   | 18,06                           | 73  | 1996211,28   | 1,5       | 0,03      | 0,5     | 0,0023       |
| 36 | Нижнесергинский р-н            | 25,16                           | 73  | 2754505,35   | 1,5       | 0,02      | 0,5     | 0,0018       |
| 37 | Бисертский ГО                  | 8,75                            | 73  | 691607,84  | 1,5       | 0,04      | 0,5     | 0,0037       |
| 38 | ГО Первоуральск                | 0,42                            | 73  | 299982,55  | 1,5       | 8,09      | 2,5     | 0,9706       |
| 39 | ГО Ревда                       | 0,72                            | 73  | 425166,60  | 1,5       | 3,84      | 2,5     | 0,8122       |
| 40 | Полевской ГО                   | 0,79                            | 73  | 406827,54  | 1,5       | 2,71      | 2,5     | 0,6933       |

### Определение риска загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований

Одним из коэффициентов, необходимых для определения риска загрязнения, является УКИЗВ, в настоящем исследовании — удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков (данные получены из УКИЗВ) определяется по средним многолетним данным ежегодных государственных докладов о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан, Пермского края, Челябинской и Свердловской областей [28—31].

Так как качество воды определяется в ограниченном количестве створов, данные УКИЗВ интерполированы на водосборную территорию р. Уфы (рис. 5).

По результатам интерполяции данных УКИЗВ определяются средние значения этого показателя для каждого муниципального образования.

### Расчет средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований

Результаты расчета средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов, расположенных на территории муниципальных образований в границах водосборного бассейна р. Уфы, приведены в табл. 6 и графически интерпретированы на рис. 6.

Величина средневзвешенного геоэкологического риска определялась путем ранжирования значения средневзвешенного риска согласно данным табл. 3. По рис. 6 видно, что большинство муниципальных образований водосборного бассейна относится к территориям с сильным и очень сильным риском истощения и загрязнения. В связи с этим принятие решений по управлению водными ресурсами основывается на анализе рисков истощения, загрязнения и средневзвешенного геоэкологического риска.

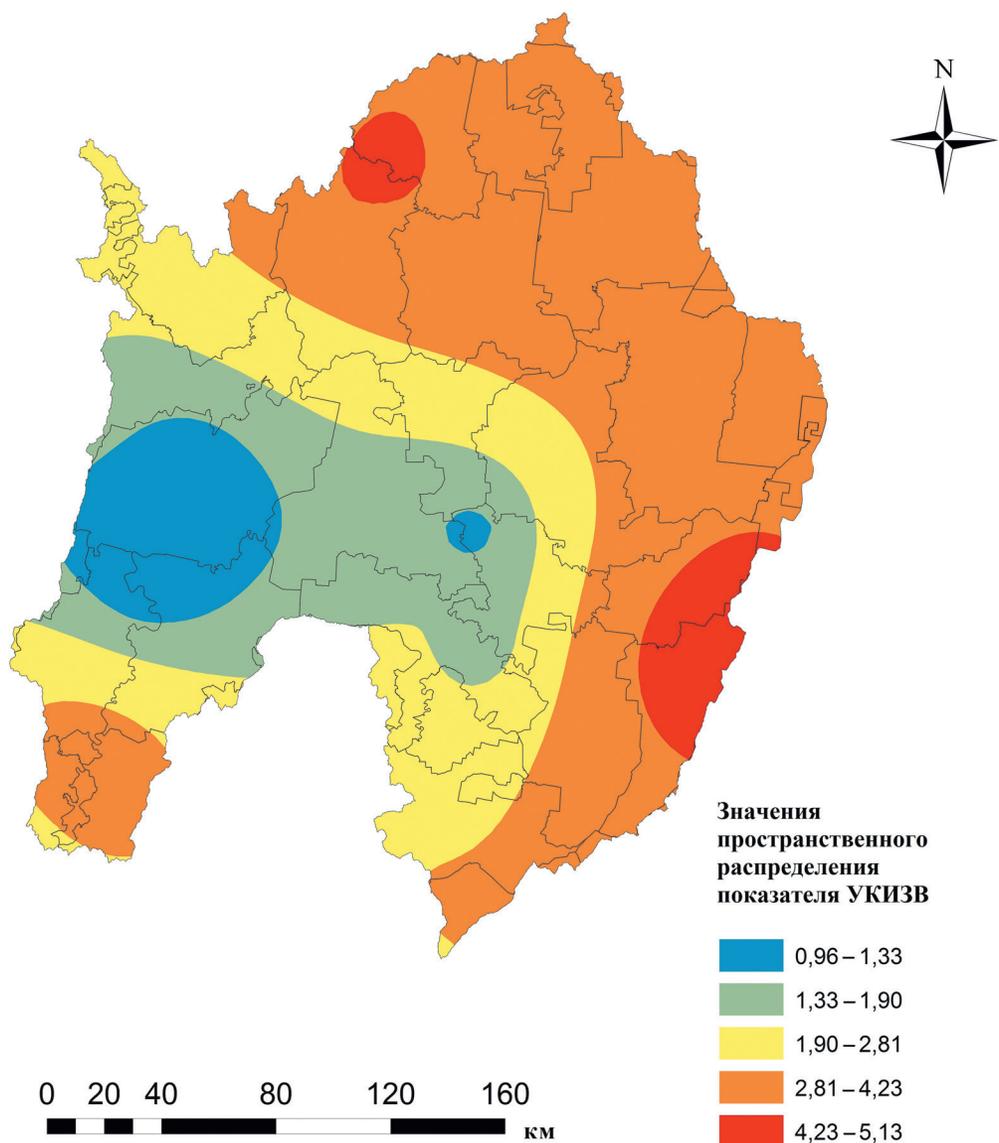


Рис. 5. Схема пространственного распределения показателя УКИЗВ по муниципальным образованиям, расположенным на территории водосборного бассейна р. Уфы.

Fig. 5. Scheme of the SCIWP spatial distribution by the municipalities located in the river Ufa catchment area.

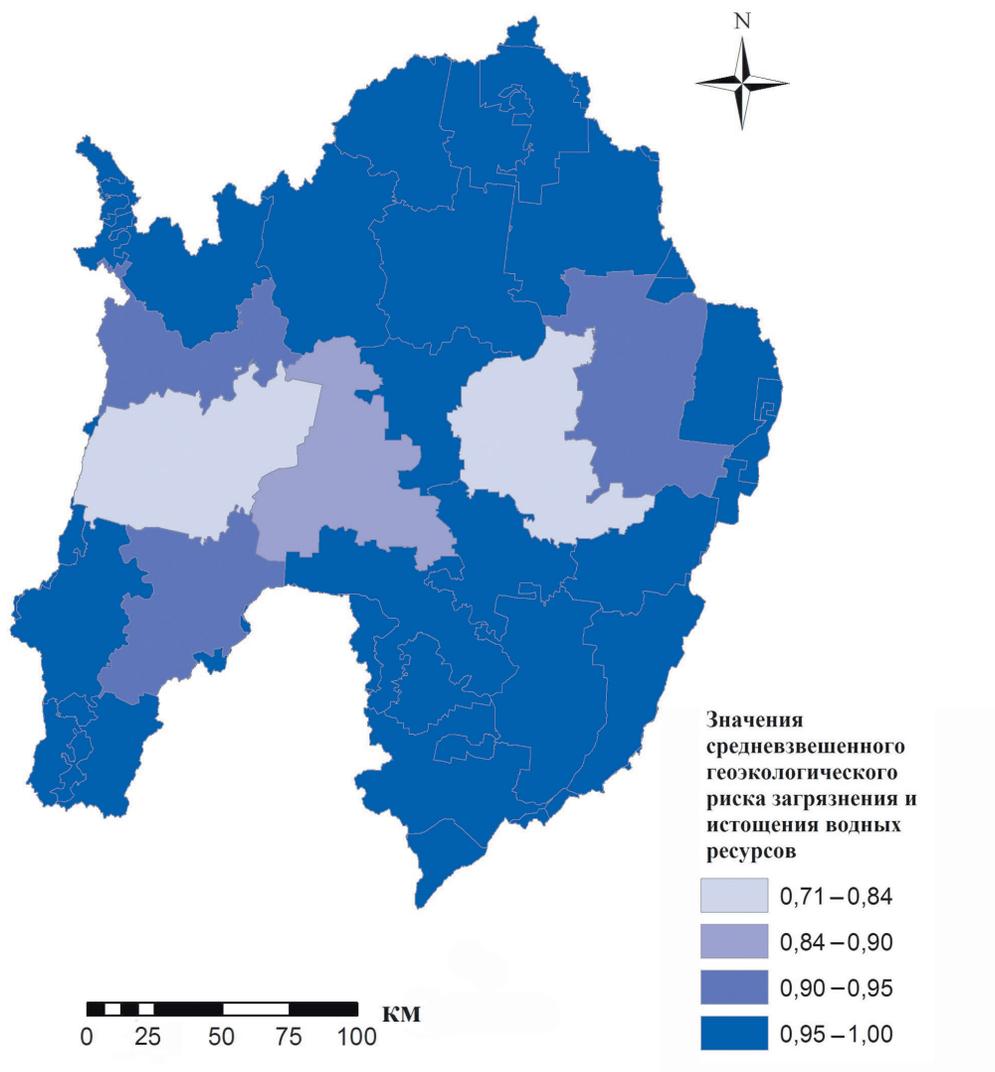


Рис. 6. Пространственное распределение средневзвешенного геоэкологического риска и загрязнения водных ресурсов муниципальных образований, расположенных на территории водосбора р. Уфы.

Fig. 6. Spatial distribution of the average weighted geoecological risk of water resources depletion and pollution for municipalities located in the river Ufa catchment area.

Результаты расчета риска истощения и загрязнения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфы

The results of the water bodies depletion and pollution risk calculations of municipalities in the river Ufa catchment area

| №                         | Название муниципального округа | УКИЗВ | $K_3$ | $Risk_{зар}$ | $Risk_{cp}$ |
|---------------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------|-------------|
| <i>Пермский край</i>      |                                |       |       |              |             |
| 1                         | Чернушинский р-н               | 2,48  | 1,0   | 0,9868       | 0,89        |
| 2                         | Октябрьский р-н                | 2,45  | 1,0   | 0,9860       | 0,88        |
| <i>Челябинская обл.</i>   |                                |       |       |              |             |
| 3                         | Ашинский р-н                   | 2,10  | 1,0   | 0,9743       | 0,84        |
| 4                         | Катав-Ивановский р-н           | 2,60  | 1,0   | 0,9893       | 0,90        |
| 5                         | Саткинский р-н                 | 3,40  | 1,0   | 0,9973       | 0,95        |
| 6                         | Нязепетровский р-н             | 3,60  | 1,0   | 0,9981       | 0,96        |
| 7                         | Кусинский р-н                  | 4,40  | 1,5   | 0,9999       | 1,00        |
| 8                         | Златоустовский ГО              | 4,55  | 1,5   | 0,9999       | 1,00        |
| 9                         | Верхнеуфалейский ГО            | 3,77  | 1,0   | 0,9986       | 0,96        |
| 10                        | Карабашский ГО                 | 4,10  | 1,5   | 0,9999       | 1,00        |
| 11                        | Кыштымский ГО                  | 3,90  | 1,0   | 0,9988       | 0,97        |
| 12                        | Каслинский р-н                 | 3,88  | 1,0   | 0,9988       | 0,97        |
| 13                        | Усть-Катавский ГО              | 2,13  | 1,0   | 0,9756       | 0,85        |
| 14                        | Трехгорный ГО                  | 2,62  | 1,0   | 0,9896       | 0,97        |
| <i>Респ. Башкортостан</i> |                                |       |       |              |             |
| 15                        | Уфимский р-н                   | 3,28  | 1,0   | 0,9967       | 0,95        |
| 16                        | Бирский р-н                    | 2,05  | 1,0   | 0,9719       | 0,98        |
| 17                        | Мишкинский р-н                 | 1,43  | 1,0   | 0,9173       | 0,72        |
| 18                        | Балтачевский р-н               | 1,38  | 1,0   | 0,9098       | 0,79        |
| 19                        | Благовещенский р-н             | 1,75  | 1,0   | 0,9527       | 0,78        |
| 20                        | ГО Уфа                         | 3,40  | 1,0   | 0,9973       | 1,00        |
| 21                        | Иглинский р-н                  | 3,20  | 1,0   | 0,9962       | 0,94        |
| 22                        | Аскинский р-н                  | 1,67  | 1,0   | 0,9456       | 0,77        |
| 23                        | Нуримановский р-н              | 1,42  | 1,0   | 0,9159       | 0,71        |
| 24                        | Караидельский р-н              | 0,99  | 0,5   | 0,5781       | 0,35        |
| 25                        | Салаватский р-н                | 1,83  | 1,0   | 0,9589       | 0,80        |
| 26                        | Белорецкий р-н                 | 3,10  | 1,0   | 0,9955       | 0,93        |
| 27                        | Дуванский р-н                  | 1,58  | 1,0   | 0,9364       | 0,75        |
| 28                        | Мечетлинский р-н               | 2,10  | 1,0   | 0,9743       | 0,84        |
| 29                        | Кигинский р-н                  | 2,00  | 1,0   | 0,9694       | 0,83        |
| 30                        | Белокатайский р-н              | 2,80  | 1,0   | 0,9924       | 0,91        |
| 31                        | Учалинский р-н                 | 3,30  | 1,0   | 0,9968       | 0,95        |
| <i>Свердловская обл.</i>  |                                |       |       |              |             |
| 32                        | Красноуфимский ГО              | 3,60  | 1,0   | 0,9981       | 0,96        |
| 33                        | Ачитский ГО                    | 4,20  | 1,5   | 0,9999       | 1,00        |

| №  | Название муниципального округа | УКИЗВ | $K_3$ | $Risk_{заг}$ | $Risk_{ср}$ |
|----|--------------------------------|-------|-------|--------------|-------------|
| 34 | Шалинский ГО                   | 4,16  | 1,5   | 0,9999       | 1,00        |
| 35 | Артинский ГО                   | 3,75  | 1,0   | 0,9986       | 0,96        |
| 36 | Нижнесергинский р-н            | 3,90  | 1,0   | 0,9989       | 0,97        |
| 37 | Бисертский ГО                  | 4,05  | 1,5   | 0,9999       | 0,99        |
| 38 | ГО Первоуральск                | 4,10  | 1,5   | 0,9999       | 1,00        |
| 39 | ГО Ревда                       | 3,80  | 1,0   | 0,9987       | 0,98        |
| 40 | Полевской ГО                   | 3,81  | 1,0   | 0,9987       | 0,98        |

### Система поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами

Управленческие решения рекомендуется принимать исходя из значений средневзвешенного геоэкологического риска, а также рисков истощения, загрязнения. Алгоритм принятия решений представлен в виде схемы на рис. 7 и состоит из нескольких этапов.

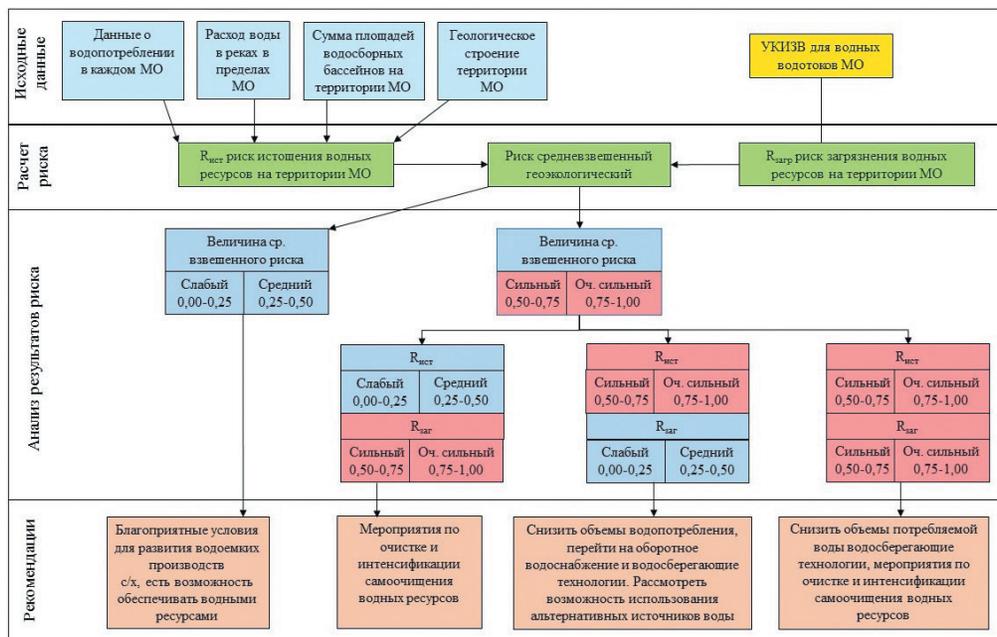


Рис. 7. Схема алгоритма принятия управленческих решений на основе анализа риска загрязнения и истощения водосборной территории.

Fig. 7. Scheme of the decision making algorithm based on the analysis of the catchment area pollution and depletion risk.

1. Сбор исходных данных для муниципальных образований. В качестве исходных данных используются:

- данные о водопотреблении в каждом;
- расход воды в реках в пределах муниципальных образований;
- сумма площадей водосборных бассейнов на территории;
- геологическое строение территории;
- УКИЗВ для водных объектов.

2. На втором этапе происходит расчет рисков загрязнения, истощения и средневзвешенного геоэкологического риска водных объектов на территории муниципальных образований согласно формулам (4)—(7).

3. На третьем этапе происходит анализ результатов расчета рисков. На основе совокупности полученных результатов формируются рекомендации.

4. Заключительный этап алгоритма — рекомендации. Как видно из рис. 7, если средневзвешенный геоэкологический риск характеризуется как слабый или средний, то рассматриваемая территория муниципального образования может быть пригодна для применения водоемких технологий и транспортировки водных ресурсов в соседние муниципалитеты.

Если средневзвешенный геоэкологический риск для одного из муниципальных образований характеризуется как сильный или очень сильный, то следует рассмотреть в отдельности риски истощения и загрязнения в данном муниципальном образовании. В случае, когда риск истощения слабый или средний, а уровень риска загрязнения определяется как сильный или очень сильный, то для данного муниципального образования необходимы мероприятия по очистке воды и интенсификации процессов самоочищения. В случае антибатного изменения рисков, т. е. риск истощения превышает риск загрязнения, рекомендуется снизить объемы водопотребления и перейти на водосберегающие технологии.

Если оба оцениваемых риска характеризуются как сильные или очень сильные — то рекомендуется снизить объемы водопотребления, применить водоочистные системы и реализовать мероприятия по интенсификации самоочищения, а также рассмотреть возможность использования альтернативных путей водоснабжения.

### **Заключение**

В настоящем исследовании установлено, что ошибки в оценке водных ресурсов могут быть связаны с различными подходами к планированию территории (муниципальный, региональный, национальный) и усугубляться транскалярностью исходных данных для оценки, т. е. различными форматами и разрешением данных.

В этой связи для обеспечения единого подхода к оценке водных ресурсов разработана геоинформационная система для определения геоэкологического риска на водосборной территории, основанная на обработке разнородных пространственных данных в границах административно-территориального деления. Представлен алгоритм поддержки принятия решений при управлении водными

ресурсами на территории муниципального образования, включающий в себя определение рисков истощения и загрязнения водных объектов для административно-территориальных единиц. Показано, что по результатам оценки риска истощения и загрязнения водных ресурсов предлагается комплекс мероприятий по более эффективному управлению водными ресурсами на территории.

Приведены результаты расчета геоэкологического риска загрязнения и истощения поверхностных водных ресурсов для каждого из 40 районов расположенного на территории водосборного бассейна р. Уфы. Установлено, что минимальный риск отмечается в Караидельском районе (РБ) — 0,35, максимальный — 0,99 — сразу для 8 районов Челябинской и Свердловской областей.

Установлено, что высокие показатели рисков истощения и загрязнения говорят о необходимости сокращения объемов потребления воды и интенсификации водоочистных мероприятий на этих территориях (включая возможность альтернативного водоснабжения). Все остальные исследуемые муниципальные образования характеризуются значениями слабого и среднего риска истощения, сильного и очень сильного риска загрязнения. В качестве рекомендуемых мероприятий могут быть предложены: сокращение объема сбросов, очистка водных объектов, интенсификация самоочищения водных ресурсов.

Важно отметить, что разработанная система отвечает требованию постоянного обновления и дополнения входных данных, что становится важным в условиях современных климатических изменений.

### Список литературы

1. Деревяго И.П., Дубенко С.А. Экономические инструменты управления водными ресурсами и объектами и водохозяйственными системами в Республике Беларусь: тематические материалы проекта «Водная инициатива ЕС плюс для Восточного партнерства». Минск: БГТУ, 2019. 304 с.
2. Колбанёв М.О., Палкин И.И., Татарникова Т.М. Вызовы цифровой экономики // Ученые записки РГГМУ. 2020. № 58. С. 156—167. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-156-167.
3. Strager M.P., Fletcher J.J., Strager J.M., Yuill C. Watershed analysis with GIS: the watershed characterization and modeling system software application // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36, Issue 7. P. 970—976. doi: 10.1016/j.cageo.2010.01.003.
4. Hewett C.J., Doyle M.A., Quinn P.F. Hydroinformatics framework to aid decision-making for catchment management // Journal of Hydroinformatics. 2010. Vol. 12(2). P. 119—139. doi: 10.2166/hydro.2009.022.
5. Rong Y. Practical environmental statistics and data analysis. ILM publications, 2011. 269 p.
6. Rohmat F.I.W., Gates T.K., Labadie J.W. Enabling improved water and environmental management in an irrigated river basin using multi-agent optimization of reservoir operations // Environmental modelling and software. 2021. Vol. 135, 104909. P. 1—13. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104909.
7. Cyr-Gagnon J., Rodriguez M.J. Optimizing data management for municipal source water protection // Land use policy. 2021. Vol. 100, 103788. P. 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.12.035.
8. Nayan N.K., Das A., Mukerji A., Mazumder T., Bera S. Spatio-temporal dynamics of water resources of Hyderabad Metropolitan Area and its relationship with urbanization // Land Use Policy. 2020. Vol. 99, 105010. P. 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105010.
9. Isnain Z., Ghaffar S.N.A. Using the geographical information system (GIS) and remote sensing techniques for mapping the groundwater potential zones in Kg Timbang Dayang, Kota Belud, Sabah // Water Conservation And Management. 2020. Vol. 4(1). P. 57—60. doi: 10.26480/wcm.01.2020.57.60.
10. Abbas M.R., Hason M.M., Ahmad B.B., Rasib A.W.B., Abbas T.R. Variations size investigation in vegetation and surface waterbody for Central Part of Iraq using satellite imagery bands // 2nd International

- Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 928. P. 1—12. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022064.
11. *Ротанова И.Н.* Геоинформационные методы и системы в управлении регионом (на материалах проектов конкурса «РФФИ—СИБИРЬ» (Алтайский край)) // Вестник российского фонда фундаментальных исследований. 2018. № 4 (100). С. 62—66. doi: 10.22204/2410-4639-2018-100-04-62-66.
  12. *Yousaf W., Awan W.K., Kamran M., Ahmad S.R.* A paradigm of GIS and remote sensing for crop water deficit assessment in near real time to improve irrigation distribution plan // *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 234, 106443. P. 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106443>.
  13. *Mallik S., Mishra U., Paul N.* Groundwater suitability analysis for drinking using GIS based fuzzy logic // *Ecological indicators*. 2021. Vol. 121. P. 1—10. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107179.
  14. *Li N.* Early warning expert decision system of water resource management based on Cloud Computing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1648. P. 1—5. doi: 10.1088/1742-6596/1648/4/042096.
  15. *Щербинина С.В.* Эколого-гидрологическая оценка состояния речных водосборов для уточнения комплекса водоохраных мероприятий (на примере Воронежской области): дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2006. 154 с.
  16. *Nafikova E., Elizaryev A., Ismagilov A., Dorosh I., Khaidarshin A., Alexandrov D.* Assessment of geoeological conditions and the depletion risk of the river Belaya catchment area // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. P. 1—8. doi: 10.1051/e3sconf/202015702003.
  17. *Красногорская, Н.Н., Нафикова Э.В.* Геоэкологическая оценка и прогнозирование опасных природно-техногенных процессов на водосборе реки. Уфа: Инновационное машиностроение, 2015. 242 с.
  18. *Kebo S., Bunch M.J.* Canadian ENGOs in governance of water resources: information needs and monitoring practices// *Environmental monitoring and assessment*. 2013. Vol. 185 (11). P. 9451—9460. doi: 10.1007/s10661-013-3264-6.
  19. *Hunt V.M., Jakobi S.K., Knutson M.G., Lonsdorf E.V.* A data management system for long-term natural resource monitoring and management projects with multiple cooperators// *Wildlife Society Bulletin*. 2015. Vol. 39 (3). P. 464—471. doi: 10.1002/wsb.547.
  20. *Красногорская Н.Н., Белозёрова Е.А., Мусина С.А., Нафикова Э.В.* Фрактальная модель вероятности паводковых наводнений на примере бассейна реки Уфа // XIV Международная научно-техническая конференция «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2018)». 2018. С. 143—148.
  21. Официальный сайт Всероссийского научно исследовательского института гидрометеорологической информации. Каталог гидрологических постов ФГБУ «ВНИИГМИ—МЦД» Район 76. Кама. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data> (дата обращения 02.09.2017).
  22. Бюллетень «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2020 года»: [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 02.02.2021).
  23. Официальный сайт некоммерческого веб-картографического проекта по созданию подробной свободной и бесплатной географической карты мира: [Электронный ресурс]. URL: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88> (дата обращения 11.11.2020).
  24. Гидрологические ежегодники. 1963—1987. Т.4. Вып. 5—7.
  25. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году»: [Электронный ресурс]. URL: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/o-doklade/> (дата обращения 17.12.2020).
  26. *Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А.* Методология определения фрактальной размерности водосборной территории // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 62. С. 52—74. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-52-74.
  27. Официальный сайт Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского: [Электронный ресурс]. URL: <https://vsegei.ru/ru/> (дата обращения 11.11.2020).
  28. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2011—2019 гг.: [Электронный ресурс]. URL: <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/> (дата обращения 17.12.2020).

29. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2019 году: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mineco174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic> (дата обращения 17.12.2020).
30. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.permecology.ru/ежегодный-экологический-доклад/ежегодный-экологический-доклад-2019/> (дата обращения 17.12.2020).
31. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2019 году» Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области: [Электронный ресурс]. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126> (дата обращения 17.12.2020).

### References

1. Derevyago I.P., Dubenok S.A. *Ekonomicheskie instrumenty upravleniya vodnymi resursami i ob"ektami i vodohozyajstvennymi sistemami v Respublike Belarus': tematicheskie materialy proekta «Vodnaya iniciativa ES plyus dlya Vostochnogo partnerstva»*. Economic instruments for managing water resources and facilities and water systems in the Republic of Belarus: thematic materials of the project "EU Water Initiative Plus for the Eastern Partnership". Minsk: BSTU, 2019: 304 p. [In Russian].
2. Kolbanev M.O., Palkin I.I., Tatarnikova T.M. Challenges of the digital economy. *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of RSHU. 2020, 58: 156—167. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-156-167. [In Russian].
3. Strager M.P., Fletcher J.J., Strager J.M., Yuill C. Watershed analysis with GIS: the watershed characterization and modeling system software application. *Computers & Geosciences*. 2010, 36 (7): 970—976 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.01.003>.
4. Hewett C.J., Doyle M.A., Quinn P.F. Hydroinformatics framework to aid decision—making for catchment management. *Journal of Hydroinformatics*. 2010, 12 (2): 119—139. doi: 10.2166/hydro.2009.022.
5. Rong Y. *Practical environmental statistics and data analysis*. ILM publications. 2011: 269 p.
6. Rohmat F.I.W., Gates T.K., Labadie J.W. Enabling improved water and environmental management in an irrigated river basin using multi—agent optimization of reservoir operations. *Environmental modeling and software*. 2021, (135) 104909: 1—13. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104909.
7. Cyr-Gagnon J., Rodriguez M.J. Optimizing data management for municipal source water protection. *Land use policy*. 2021, (100) 103788: 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.12.035.
8. Nayan N. K., Das A., Mukerji A., Mazumder T., Bera S. Spatio-temporal dynamics of water resources of Hyderabad Metropolitan Area and its relationship with urbanization. *Land Use Policy*. 2020, (99) 105010: 1—12. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.105010.
9. Isnain Z., Ghaffar S.N.A. Using the geographical information system (GIS) and remote sensing techniques for mapping the groundwater potential zones in Kg Timbang Dayang, Kota Belud, Sabah. *Water Conservation And Management*. 2020, 4(1): 57—60. doi: 10.26480/wcm.01.2020.57.60.
10. Abbas M.R., Hason M.M., Ahmad B.B., Rasib A.W.B., Abbas T.R. Variations size investigation in vegetation and surface waterbody for Central Part of Iraq using satellite imagery bands. 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, 928: 1—12. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022064.
11. Rotanova I.N. Geoinformation methods and systems in regional management (on the materials of the projects of the competition "RFBR—SIBERIA" (Altai Territory)). *Vestnik rossijskogo fonda fundamental'nyh issledovanij*. Bulletin of the Russian Foundation for Fundamental Research. 2018, 4 (100): 62—66. doi: 10.22204 / 2410-4639-2018-100-04-62-66. [In Russian].
12. Yousaf W., Awan W.K., Kamran M., Ahmad S.R. A paradigm of GIS and remote sensing for crop water deficit assessment in near real time to improve irrigation distribution plan. *Agricultural Water Management*. 2021, (234) 106443: 1—15. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106443.
13. Mallik S., Mishra U., Paul N. Groundwater suitability analysis for drinking using GIS based fuzzy logic. *Ecological indicators*. 2021, 121: 1—10. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107179.
14. Li N. Early warning expert decision system of water resource management based on Cloud Computing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, 1648: 1—5. doi: 10.1088/1742—6596/1648/4/042096.
15. Shcherbinina S.V. *Ekologo-gidrologicheskaya ocenka sostoyaniya rechnyh vodosborov dlya utocheniya kompleksa vodoohrannyh meropriyatij (na primere Voronezhskoj oblasti)*. Ecological and

- hydrological assessment of the state of river catchments to clarify the complex of water protection measures (on the example of the Voronezh region). Phd Dis. Voronezh, 2006: 154 p. [In Russian].
16. Nafikova E., Elizaryev A., Ismagilov A., Dorosh I., Khaidarshin A., Alexandrov D. Assessment of geoeological conditions and the depletion risk of the river Belaya catchment area. E3S Web of Conferences. 2020, 157: 1—8. doi: 10.1051/e3sconf/202015702003.
  17. Krasnogorskaya, N.N., Nafikova E.V. *Geoekologicheskaya ocenka i prognozirovanie opasnykh prirodno-tekhnogennykh processov na vodosbore reki*. Geoeological assessment and forecasting of hazardous natural and technogenic processes in the catchment area of the river. Ufa: Innovative mechanical engineering, 2015: 242 p. [In Russian].
  18. Kebo S., Bunch M.J. Canadian ENGOs in governance of water resources: information needs and monitoring practice. Environmental monitoring and assessment. 2013, 185 (11): 9451—9460. doi: 10.1007/s10661-013-3264-6.
  19. Hunt V.M., Jakobi S.K., Knutson, M.G., Lonsdorf E.V. A data management system for long-term natural resource monitoring and management projects with multiple cooperators. Wildlife Society Bulletin. 2015, 39 (3): 464—471. doi: 10.1002/wsb.547.
  20. Krasnogorskaya N.N., Belozeroва E.A., Musina S.A., Nafikova E.V. Fractal model of the probability of flood floods on the example of the Ufa river basin. *XIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2018)"*. XIV International Scientific and Technical Conference "Science, Education, Production in Solving Environmental Problems (Ecology-2018)". 2018: 143—148. [In Russian].
  21. *Ofitsial'nyi sait Vserossiiskogo nauchno issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoi informatsii. Katalog gidrologicheskikh postov FGBU «VNIIGMI—MTsD» Raion 76. Kama*. Official site of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information. Catalog of hydrological posts of FGBI "VNIIGMI—MCD" District 76. Kama. Available at: <http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data>. [In Russian].
  22. Bulletin "Population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2020". Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>. [In Russian].
  23. *Ofitsial'nyi sait nekommercheskogo veb-kartograficheskogo proekta po sozdaniyu podrobnoi svobodnoi i besplatnoi geograficheskoi karty mira*. The official site of the non-commercial web cartographic project for the creation of a detailed free geographic map of the world. Available at: <http://openstreetmap.ru/#map=3/62/88>. [In Russian].
  24. *Gidrologicheskie ezhegodniki*. Hydrological Yearbooks. 1963—1987: 4 (5—7). [In Russian].
  25. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu»*. State report "About the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018". Available at: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/o-doklade>. [In Russian].
  26. Krasnogorskaya N.N., Belozeroва E.A. Methodology for determining the catchment area fractal dimension. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2021, 62: 52—74. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-52-74.
  27. *Ofitsial'nyi sait Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. A.P. Karpinskogo*. Official site of the Russian Research Institute named after A.P. Karpinsky Available at: <https://vsegei.ru/ru>. [In Russian].
  28. *Gosudarstvennyi doklad o sostoianii prirodnykh resursov i okruzhaiushchei sredy respubliki Bashkortostan v 2011—2019 gg.* State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan in 2011—2019. Available at: <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures>. [In Russian].
  29. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Cheliabinskoi oblasti v 2019 godu*. Report on the environmental situation in the Chelyabinsk region in 2019. Available at: <http://www.mineco174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic>. [In Russian].
  30. *Doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Permskogo kraia»*. Report "On the state and protection of the environment of the Perm region." Available at: <http://www.permecology.ru/annual-ecological-report/annual-ecological-report-2019>. [In Russian].
  31. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Sverdlovskoi oblasti v 2019 godu» Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Sverdlovskoi oblasti*. State report "On the state and

protection of the environment of the Sverdlovsk region in 2019". Ministry of Natural Resources and Environment of the Sverdlovsk Region. Available at: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126>. [In Russian].

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 30.03.2021*

*Принята к публикации после доработки 09.09.2021*

### ***Сведения об авторах***

*Красногорская Наталия Николаевна*, д-р техн. наук, профессор, научный консультант НПП ООО «Юнисол», [nk.ufa@mail.ru](mailto:nk.ufa@mail.ru).

*Белозерова Елена Алексеевна*, начальник отдела внедрения информационных технологий и инноваций в медицинскую деятельность, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения России», [elena.belozerova.ufa@gmail.com](mailto:elena.belozerova.ufa@gmail.com).

### ***Information about author***

*Krasnogorskaja Natalija Nikolaevna*, Grand PhD (Tech. Sci.), scientific consultant, NPP Unisol LLC.

*Belozerova Elena Alexeevna*, Head of the IT and Innovations Department, Bashkir state medicine university.

## **Территориальная дифференциация водных и наземных геосистем с использованием данных космических сенсоров**

***А.В. Бочаров<sup>1</sup>, И.Н. Межеумов<sup>1</sup>, П.М. Пахомов<sup>1</sup>, С.Д. Хижняк<sup>1</sup>,  
О.А. Тихомиров<sup>1</sup>, С.И. Биденко<sup>2</sup>, П.Н. Кравченко<sup>3</sup>***

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Тверь, bochalex@bk.ru

<sup>2</sup> ПАО «Интелтех», Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва

Выделение границ водоемов и ареалов распространения водной растительности достаточно важная задача для оценки состояния, динамики развития и определения устойчивости экосистем водных объектов. В статье предложен алгоритм для выделения границ водных объектов и определения в них зон распространения воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). Для реализации, предлагаемой в статье методики могут быть использованы данные космических сенсоров производящих съемку поверхности Земли в красном и ближнем ИК-участках спектра.

*Ключевые слова:* границы водных объектов, водная растительность, дистанционное зондирование Земли, Landsat.

## **Territorial differentiation of water and terrestrial geosystems using data from space sensors**

***A.V. Bocharov<sup>1</sup>, I.N. Mezheumov<sup>1</sup>, P.M. Pakhomov<sup>1</sup>, S.D. Khizhnyak<sup>1</sup>,  
O.A. Tikhomirov<sup>1</sup>, S.I. Bidenko<sup>2</sup>, P.N. Kravchenko<sup>3</sup>***

<sup>1</sup> FGBOU VO «Tver State University», Tver, Russia

<sup>2</sup> PAO «Inteltech», Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Moscow University named after S.Yu. Witte, Moscow, Russia

Identifying the boundaries of water bodies and areas of distribution of aquatic vegetation is a rather important task for assessing the state, dynamics of development and determining the stability of ecosystems of water bodies. The article proposes an algorithm for identifying the boundaries of water bodies and determining the zones of distribution of air-water vegetation in them based on multispectral data of remote sensing of the Earth. For the implementation of the methodology proposed in the article, the data of space sensors that survey the Earth's surface in the red and near-IR regions of the spectrum can be used.

In the course of the research, the spectral features of water bodies and aquatic vegetation were established. It was found that the best contrast of the water surface and land is observed in the near-IR range (5th channel of the Landsat-8 satellite (845—885 nm)). To create a mask for the boundaries of the reservoir, it is proposed to use the division of the image pixels by the value of reflectivity into two groups (water and land). In our case, the threshold value of the reflection coefficient between the pixels of satellite images corresponding to land and water surface was about 0.15.

On the basis of field surveys, a search for individual spectral characteristics of zones of development of air-water vegetation was carried out. The identification of these zones in inland water bodies is complicated by the large amount of impurities in the waters, which makes the reflection spectra of water masses and aquatic vegetation similar. Studies have shown that the presence of aquatic vegetation manifests itself

in an increase in reflectance values in the visible and near-IR ranges. It was experimentally established that the areas of development of air-water vegetation are manifested in the excess of reflectivity values in the near-IR range (5th channel of the Landsat-8 satellite (845—885 nm)) over the red one (4th channel (630—680 nm)).

*Keywords:* boundaries of water bodies, aquatic vegetation, Earth remote sensing, Landsat.

**For citation:** *A.V. Bocharov, I.N. Mezheumov, P.M. Pakhomov, S.D. Khizhnyak, O.A. Tikhomirov, S.I. Bidenko, P.N. Kravchenko. Territorial differentiation of water and terrestrial geosystems using data from space sensors. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 726—737. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-726-737*

## Введение

Для исследования водоемов, в особенности прибрежных экотонных зон, существует необходимость точного выделения действительных границ береговой линии. Экотон представляет собой переход между двумя и более различными группировками [1] — они имеют существенное значение в сохранении биоразнообразия и важны для изучения. Экотонная зона между сушей и водой зачастую занята водной растительностью, и это усложняет выделение границ объектов. Воздушно-водная растительность может простираться на сотни метров от береговой линии. Водная растительность играет значительную роль в регулировании процессов, в занятых ей местах обитания. Она защищает береговые линии от эрозии, улавливает взвешенные твердые частицы, производит выделение большого количества углерода и азота. Выделение ареалов распространения водной растительности достаточно важная задача для оценки состояния, динамики развития и определения устойчивости экосистем водных объектов. Цель работы состоит в повышении эффективности определения границ водных объектов и выделении зон распространения воздушно-водной растительности по данным дистанционного зондирования Земли.

Опыт применения данных дистанционного зондирования для выделения границ водных объектов приводится в работах Студеникина А.В. [2], Кутузова А.В. [3], Катаева М.Ю. [4], Alesheikh A.A. [5], Nijland W. [6], Rasulya A. [7] и др. Исследованиям воздушно-водной растительности по данным дистанционного зондирования посвящены работы Власова Б.П. [8], Филоненко И.В. [9], Zhao D. [10], Sawaya K.E. [11], Midwood J.D. [12] и др.

## Материалы и методы

Известны три основных способа определения границы водного объекта и зон распространения воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли: визуальное дешифрирование, сегментация изображений, классификация на основе индексных изображений [13].

1) *Выделение границ объектов с использованием визуального дешифрирования космических снимков.* Наиболее простой способ, не требующий специализированного программного обеспечения и квалификации оператора. Вместе с тем он отличается низкой точностью результатов и при больших размерах объектов достаточно трудоемкий.

2) *Использование алгоритмов сегментации изображений.* Возможны два алгоритма классификации, «без обучения» (ISODATA) [14] и «с обучением» (метод минимального расстояния, метод максимального правдоподобия, метод спектральной корреляции SAM и др.). Результаты сохраняются в виде тематических изображений, классы которых соотносят с группами объектов на земной поверхности. Применение данного способа позволяет получать результаты с высокой степенью автоматизации. К недостаткам следует отнести неконтролируемость результатов при использовании классификации без обучения, а так же сложность выбора подходящих параметров при использовании классификации с обучением.

3) *Применение индексных изображений,* получаемых путем обработки много-спектральных космических снимков. Наиболее популярными являются: нормализованный вегетационный индекс (NDVI) [15]; почвенный вегетационный индекс (SAVI) [16]; нормализованный разностный водный индекс (NDWI) [17] и др. На основании значений пикселей индексных изображений производится классификация объектов. Данный способ достаточно удобен и наиболее распространен. К тому же некоторые продукты ДДЗ поставляются с рассчитанными значениями NDVI. Но данный способ не позволяет контролировать классификацию, а также не эффективен при выделении экотонных зон между водной поверхностью и сушей.

Приведенные выше методики имеют существенные ограничения для исследования прибрежной экотонной зоны. Это подтолкнуло к поиску возможностей для повышения качества исследований. В результате экспериментальных изысканий была разработана методика, позволяющая повысить эффективность определения границ водных объектов и выделения зон распространения воздушно-водной растительности.

В данном исследовании источником данных дистанционного зондирования были многоспектральные снимки спутника Landsat-8. Это свободно распространяемые данные. Они размещаются в открытом доступе на серверах Геологической службы США. Перед использованием все снимки подвергались радиометрической калибровке и атмосферной коррекции и имели значения пикселей в виде коэффициентов отражения ( $r$ ). Для реализации предлагаемой в статье методики могут быть использованы данные с других сенсоров производящих съемку поверхности Земли в красном и ближнем ИК-участках спектра.

Вода поглощает электромагнитное излучение в ИК диапазоне, поэтому данной участок спектра информативен для определения границы между сушей и водными объектами, которая не очевидно различима в видимом свете. Для Landsat-8 наилучший контраст водной поверхности и суши имеет 5-й канал (845—885 нм) (рис. 1). Для определения границ (создания маски) водоема предлагается использовать разделение пикселей снимка в этой спектральной зоне по значению отражательной способности на группы (вода и суша) [18].

Расчет порогового значения между группами пикселей предлагается производить на основе профилей переходной зоны. Для расчета порогового значения при помощи ГИС-редактора составляется несколько графиков профилей прибрежной зоны в ближнем ИК-диапазоне, содержащих береговую зону и водную поверхность (рис. 2 а). Использование нескольких профилей позволяет повысить

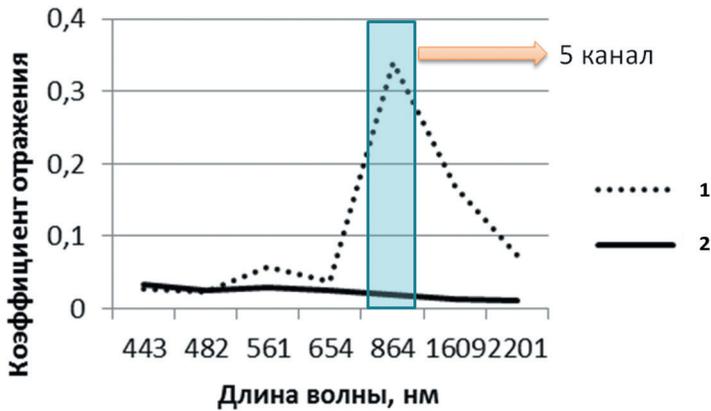


Рис. 1. Характерные коэффициенты отражения водной поверхности и суши (по снимку Landsat):

1 — луг, 2 — водохранилище.

Fig. 1. Typical reflection coefficients of the water surface and land (according to the Landsat image):

1 — meadow, 2 — reservoir.

репрезентативность получаемых данных. Еще более информативным для определения порогового значения между сушей и водоемом является использование распределения значений отражательной способности пикселей для полигонального участка прибрежной зоны (рис. 2 в). Этот подход отличается большей трудоемкостью, поэтому в заявленном способе он предлагается как дополнительный. На рисунках 2 б и 2 в наблюдаем, что пиксели космического снимка, соответствующие водной поверхности, имеют низкие значения коэффициента отражения, в то время как пиксели, соответствующие суше, характеризуются более высокой отражательной способностью.

Опытным путем установлено, что в большинстве случаев для Европейской части России пороговое значение коэффициента отражения (для спектральной зоны, соответствующей 5 каналу сенсора Landsat 8) между пикселями спутниковых снимков, соответствующих суши и водной поверхности, составляет около 0,15.

$$r_{845-885} < 0,15 \text{ — водная поверхность} \quad (1)$$

$$r_{845-885} \geq 0,15 \text{ — суша}$$

При необходимости адаптации заявляемого способа для других территорий, либо при использовании других алгоритмов атмосферной коррекции, пороговое значение может быть откорректировано, чтобы соответствовать местным условиям. При этом следует учитывать, что оно должно находиться в интервале от 0,1 до 0,2. Значение коэффициента отражения пикселя спутникового снимка ниже 0,1 однозначно относит его к чистой водной поверхности, а значение выше 0,2 — к суше. При этом пиксели, имеющие отражательную способность, меньше порогового показателя, интерпретируются как поверхность, занятая водой и водной растительностью.

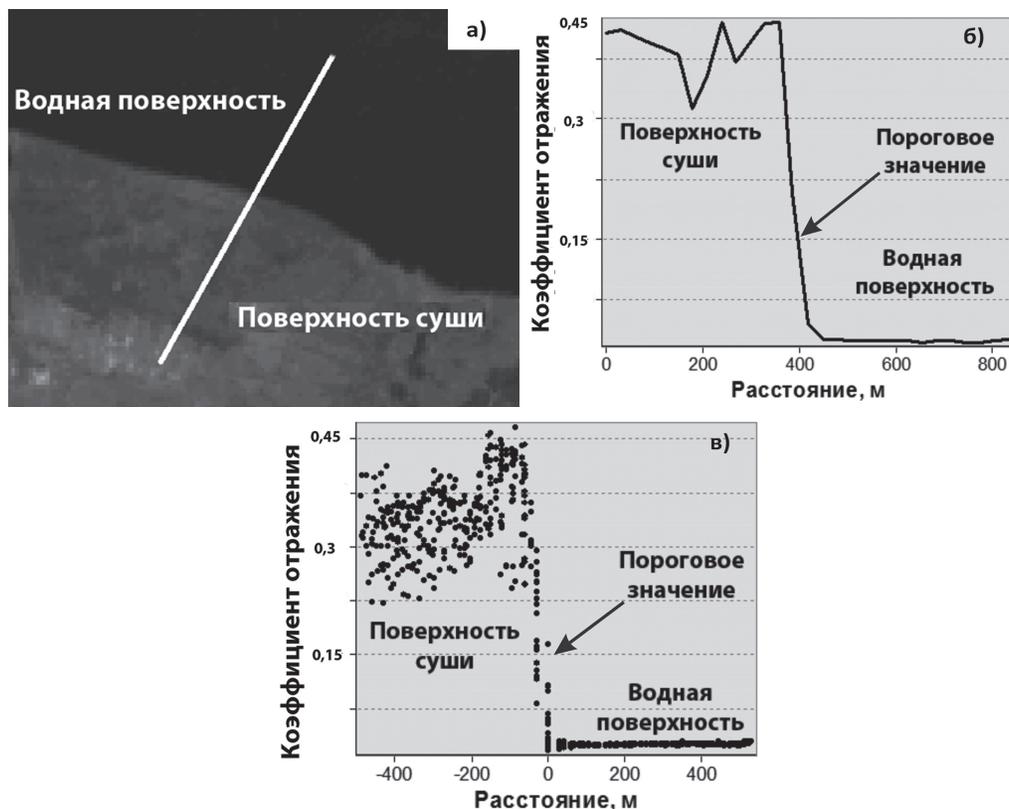


Рис. 2. Пример расчета границ водоема на основе деления пикселей ИК-канала по пороговому значению коэффициентов отражения:

- а)* профиль прибрежной зоны на снимке Landsat в ИК-канале;
- б)* график значений коэффициентов отражения прибрежной зоны в ИК-канале;
- в)* пример распределения значений пикселей на участке прибрежной зоны в ИК-канале.

Fig. 2. An example of calculating the boundaries of a reservoir based on the division of pixels of the IR channel based on the threshold value of the reflection coefficients:

- a)* the profile of the coastal zone in the Landsat image in the IR channel;
- b)* a graph of the values of the reflection coefficients of the coastal zone in the IR channel;
- v)* an example of the distribution of pixel values in the coastal zone in the IR channel.

Воздушно-водная растительность, как правило, располагается в прибрежной мелководной зоне, и задача ее определения по данным космической съемки сводится к поиску соответствующих ей пикселей из общего числа пикселей водного объекта. Идентификация данных зон во внутренних водоемах усложняется большим количеством примесей в водах, что делает спектры отражения водных масс и отражения водной растительности сходными. В ходе проведенных исследований на основании космических снимков и многократных полевых обследований Ивановского водохранилища были выявлены индивидуальные спектральные

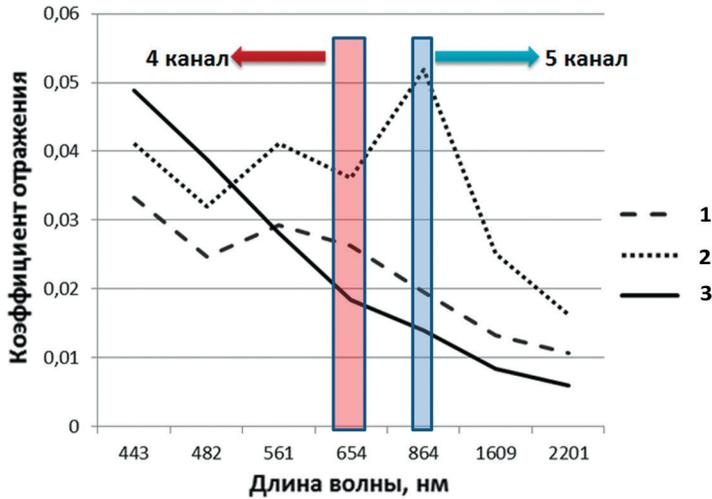


Рис. 3. Коэффициенты отражения водной поверхности и воздушно-водной растительности: 1 — водохранилище; 2 — воздушно-водная растительность; 3 — чистая морская вода.

Fig. 3. Reflection coefficients of water surface and air-water vegetation:

1 — reservoir; 2 — air-water vegetation; 3 — clean sea water.

характеристики зон развития воздушно-водной растительности. Исследования показали, что присутствие водной растительности проявляется в повышении значений отражательной способности в видимом и ближнем ИК диапазонах (рис. 3). Для Landsat-8 наиболее значительное увеличение отражательной способности наблюдается в 5 канале.

Общее увеличение отражательной способности водной поверхности может быть обусловлено повышением концентрации хлорофилла либо показателя мутности. Поэтому для определения ареалов распространенности воздушно-водной растительности эффективным оказалось использование сравнительной оценки значений пикселей снимков в ближнем ИК диапазоне относительно красного участка спектра. Экспериментально установлено, что участки развития воздушно-водной растительности проявляются в превышении значений отражательной способности в ближнем ИК (5 канал Landsat-8 (845—885 нм)) над красным (4 канал Landsat-8 (630—680 нм)).

Для выделения ареалов воздушно-водной растительности необходимо эффективно оценивать наклон спектра отражения на участке 630—885 нм. Для этого предлагается использовать коэффициент, характеризующий угол наклона спектра ( $k$ ), который рассчитывается по следующей формуле:

$$k = r_{630-680} / r_{845-885} \quad (2)$$

если  $k < 1$ , то значения пикселя относятся к воздушно-водной растительности, если  $k \geq 1$ , то значения пикселя относятся к водной поверхности, не покрытой воздушно-водной растительностью.

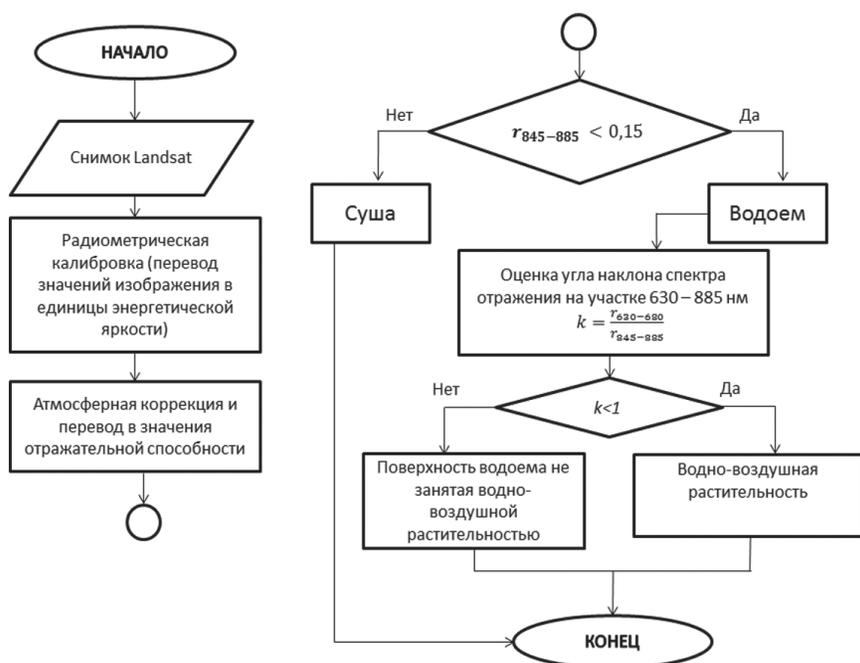


Рис. 4. Алгоритм определения зон распространения воздушно-водной растительности по данным дистанционного зондирования Земли.

Fig. 4. Algorithm for determining the distribution zones of air-water vegetation according to Earth remote sensing data.

Общая схема алгоритма, предлагаемого для выделения областей распространения воздушно-водной растительности по данным Landsat-8, представлена на рис. 4.

### Результаты исследований

Определение границ водной поверхности Иваньковского водохранилища проводилось по снимку Landsat 8 от 4 июля 2015 г. Для повышения точности результатов на основе панхроматического канала Landsat-8 выполнялось увеличение разрешения снимков с 30 м/пиксель до 15 м/пиксель. После повышения разрешения снимки подвергались радиометрической калибровке и атмосферной коррекции на основе модели пропускания излучения атмосферой MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), а затем переводу к виду коэффициентов отражательной способности от 0 до 1.

На основании разработанного алгоритма были выделены границы Иваньковского водохранилища (рис. 5) и участки распространения воздушно-водной растительности в его акватории (рис. 6). Для данного водоема характерно почти повсеместное развитие воздушно-водной растительности в прибрежной зоне.



Рис. 5. Границы водных объектов, выделенные по снимку Landsat (Иваньковское водохранилище и близлежащие водоемы).

Fig. 5. Boundaries of water bodies highlighted by the Landsat image (Ivankovskoe reservoir and nearby water bodies).

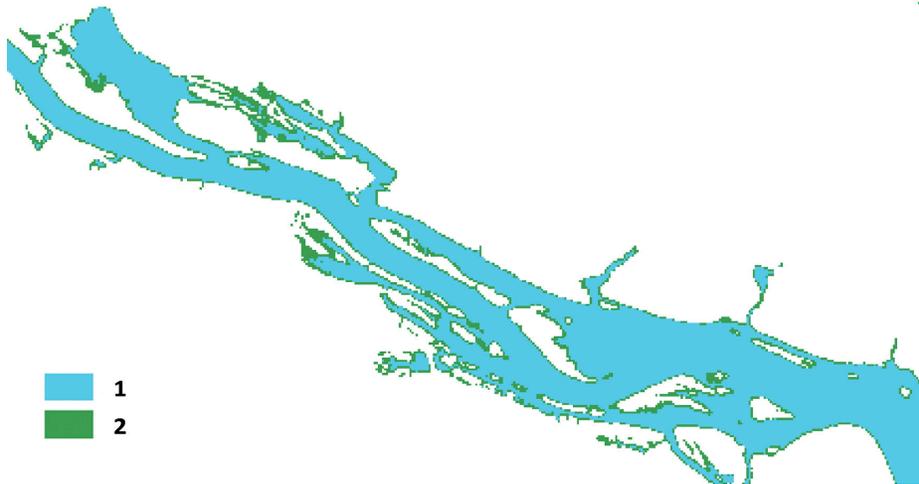


Рис. 6. Пример выделения по космическому снимку Landsat-8 областей распространения воздушно-водной растительности (4 июля 2015 г., Волжский плес, район пос. Старое Мелково):

1 — водная поверхность без воздушно-водной растительности; 2 — участки развития воздушно-водной растительности.

Fig. 6. An example of identifying areas of distribution of air-water vegetation based on the Landsat-8 satellite image (July 4, 2015, Volzhsky reach, area of the village of Staroe Melkovo):

1 — water surface without air—water vegetation; 2 — areas of development of air-water vegetation.

На момент исследования площадь водохранилища составляла 229,6 км<sup>2</sup>, а площадь, занятая воздушно-водной растительностью — 27,4 км<sup>2</sup>. Согласно полученным результатам, распространение воздушно-водной растительности составляет 12 % от площади водохранилища. Морфометрические данные по отдельным частям водоема приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Морфометрические характеристики Иваньковского водохранилища  
(по данным Landsat 8)

Morphometric characteristics of the Ivankovskoe reservoir (according to Landsat 8)

| Плес         | Площадь, км <sup>2</sup> | Длина береговой линии (с островами), км | Площадь, занятая воздушно-водной растительностью, км <sup>2</sup> | Доля поверхности водоема, занятой воздушно-водной растительностью, % |
|--------------|--------------------------|---|---|--|
| Волжский     | 65,6                     | 454                                     | 9,1   | 13,9   |
| Шошинский    | 62,9                     | 425                                     | 9,4   | 14,9   |
| Иваньковский | 101,1                    | 354                                     | 8,9   | 11,3   |
| Весь водоем  | 229,6                    | 1233                                    | 27,4  | 11,9   |

### Заключение

Предлагаемая методика может стать хорошим инструментом для камеральной обработки данных дистанционного зондирования. Выделение границ водоема можно использовать для оценки прохождения паводков и половодий, уточнения кадастровых карт и других задач. Применение предлагаемой методики выделения воздушно-водной растительности позволяет получать оперативные сведения и вести мониторинг трансформации аквальных комплексов. Это особенно актуально для равнинных водохранилищ, в которых в течение десятилетий после затопления происходят процессы развития водной растительности.

Точность выделения объектов ограничивается размером пикселей космических снимков. Для Landsat-8 при использовании панхроматического канала она составляет 15 м. Точность отнесения пикселя к классу (вода — суша — воздушно-водная растительность) зависит от порогового значения пикселей в спектральной полосе 845—885 нм и от значения коэффициента, характеризующего наклон спектра отражения на участке 630—885 нм, которые могут при необходимости быть скорректированы под местные условия или съемочную аппаратуру.

Следует отметить, что проведенные исследования показали, что содержание взвесей и растворенных веществ в водах большинства внутренних водоемов не позволяют использовать данные дистанционного зондирования для получения устойчивых результатов при определении водной растительности полностью погруженной в воду. Поэтому при необходимости проведения экологических исследований водоема дистанционными методами предлагается ограничиваться только определением воздушно-водной растительности.

На разработанные методики был получен патент на изобретение № 2750853 «Способ выделения границ водных объектов и ареалов распространения

воздушно-водной растительности по многоспектральным данным дистанционного зондирования Земли» [19].

### Список литературы

1. *Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
2. *Студеникин А.В., Филиппов О.В.* Автоматизированные технологии обработки материалов ДЗЗ в комплексном мониторинге Волгоградского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 192—198.
3. *Кутузов А.В.* Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода—суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64—72.
4. *Катаев М.Ю., Бекеров А.А.* Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 4. С. 105—108.
5. *Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N.* Coastline change detection using remote sensing // Int. J. Environ. Sci. Tech. 2007. Issue 4 (1). P. 61—66.
6. *Nijland W., Reshitnyk L., Rubidge E.* Satellite remote sensing of canopy-forming kelp on a complex coastline: a novel procedure using the Landsat image archive // Remote Sensing of Environment. 2018. Issue 220. P. 41—50. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.032.
7. *Rasulya A., Naghdifar R., Rasoli M.* Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques // Procedia Environmental Sciences. 2010. Issue 2. P. 416—426. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.046.
8. *Власов Б.П., Грищенкова Н.Д., Сивенков А.Ю.* Геоэкологическая информативность данных дистанционного зондирования Земли при изучении высшей водной растительности // Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ): сборник научных статей. Минск, 2019. С. 254—258.
9. *Филоненко И.В., Комарова А.С.* Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. № 4. С. 63—72.
10. *Zhao D., Jiang H., Yang T., Cai Y., Xu D., An S.* Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu Lake using an improved classification tree with modified thresholds // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 95, Issue 1. P. 98—107. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.007.
11. *Sawaya K.E., Olmanson L.G., Heinert N.J., Brezonik P.L., Bauer M.E.* Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery // Remote Sensing of Environment. 2003. Issue 88. P. 144—156. doi: 10.1016/j.rse.2003.04.006.
12. *Midwood J.D., Chow-Fraser P.* Mapping Floating and Emergent Aquatic Vegetation in Coastal Wetlands of Eastern Georgian Bay, Lake Huron, Canada // Wetlands. 2010. Issue 30. P. 1141—1152. doi: 10.1007/s13157-010-0105-z.
13. *Чичкова Е.Ф., Кондратьев С.А., Рыжиков Д.М., Тимофеев А.С., Шмакова М.В.* Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогеоэкологической нагрузки на финский залив // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 43. С. 246—254.
14. *Ball G.H., Hall D.J.* Isodata: a method of data analysis and pattern classification. Stanford Research Institute, 1965.
15. *Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W.* Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition // Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI. 1969. P. 97—131.
16. *Huete A.R.* A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. Vol. 25, Issue 3. P. 295—309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
17. *Gao B.* NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, Issue 3. P. 257—266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
18. *Бочаров А.В., Тихомиров О.А.* Использование данных дистанционного зондирования для оценки изменений прибрежной зоны водохранилищ // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 4(4). С. 625—632.

19. Бочаров А.В., Межеумов И.Н., Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Тихомиров О.А. Способ выделения границ водных объектов и ареалов распространения воздушно-водной растительности по многогоспектральным данным дистанционного зондирования Земли: МПК G01N 21/25. Патент РФ, № 2020128629. 2020.

### References

1. Odum Y. Fundamentals of Ecology. Moscow: Mir, 1975: 740 p. [In Russian].
2. Studenikin A.V., Filippov O.V., Automated technologies for processing remote sensing data in the integrated monitoring of the Volgograd reservoir. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2011, 8, 3: 192—198. [In Russian].
3. Kutuzov A.V. Using remote sensing data for monitoring water-land systems on lowland reservoirs (on the example of the Tsimlyansk reservoir). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2011, 6: 64—72. [In Russian].
4. Kataev M.Y., Bekerov A.A. Methods of detecting water bodies by multispectral satellite measurements. *Doklady TUSURa*. Reports of TUSUR. 2017, 20, 4: 105—108 [In Russian].
5. Alesheikh A. A., Ghorbanali A., Nouri N. Coastline change detection using remote sensing. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 2007, 4 (1): 61—66.
6. Nijland W., Reshitnyk L., Rubidge E. Satellite remote sensing of canopy-forming kelp on a complex coastline: a novel procedure using the Landsat image archive. *Remote Sensing of Environment*. 2018, 220: 41—50. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.032.
7. Rasulya A., Naghdifar R., Rasoli M. Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques. *Procedia Environmental Sciences*. 2010, 2: 416—426. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.046.
8. Vlasov B.P., Grishchenkova N.D., Sivenkov A.Y. Geoecological information content of Earth remote sensing data in the study of higher aquatic vegetation. *Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia osobo okhraniamykh prirodnykh territorii (OOPT): sbornik nauchnykh statei*. Current state and development prospects of specially protected natural areas (SPNA): collection of scientific articles. Minsk, 2019: 254—258 [In Belarus].
9. Filonenko I.V., Komarova A.S. Long-term dynamics of the area of overgrowing with coastal aquatic vegetation of the lake Vozhe. *Printsipy ekologii*. Principles of Ecology. 2015, 4: 63—72 [In Russian].
10. Zhao D., Jiang H., Yang T., Cai Y., Xu D., An S. Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu Lake using an improved classification tree with modified thresholds. *Journal of Environmental Management*. 2012, 95, 1: 98—107. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.007.
11. Sawaya K.E., Olmanson L.G., Heinert N.J., Brezonik P.L., Bauer M.E. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2003, 88: 144—156. doi: 10.1016/j.rse.2003.04.006.
12. Midwood J.D., Chow-Fraser P. Mapping Floating and Emergent Aquatic Vegetation in Coastal Wetlands of Eastern Georgian Bay, Lake Huron, Canada. *Wetlands*. 2010, 30: 1141—1152. doi: 10.1007/s13157-010-0105-z.
13. Chichkova E.F., Kondratyev S.A., Ryzhikov D.M., Timofeev A.S., Shmakova M.V. Identification of the land surface types on Landsat satellite data to assess the nutrient load on the Gulf of Finland. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2016, 43: 246—254 [In Russian].
14. Ball G.H., Hall D.J. *Isodata: a method of data analysis and pattern classification*. Stanford Research Institute. 1965.
15. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI. 1969: 97—131.
16. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988, 25, 3: 295—309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
17. Gao B. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996, 58, 3: 257—266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

18. *Bocharov A.V., Tikhomirov O.A.* Using remote sensing data to assess changes in the coastal zone of reservoirs. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015, 17, 4 (4): 625—632 [In Russian].
19. *Bocharov A.V., Mezheumov I.N., Pakhomov P.M., Khizhnyak S.D., Tikhomirov O.A.* Method for determining the boundaries of water bodies and areas of distribution of semi-aquatic species based on multispectral data of remote sensing of the Earth: МРК G01N 21/25. Patent RF, no. 2020128629, 2020. [In Russian].

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 24.05.2021*

*Принята к публикации после доработки 26.10.2021*

### ***Сведения об авторах***

*Бочаров Александр Вячеславович*, ассистент кафедры физической географии и экологии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», bochalex@bk.ru.

*Межеумов Игорь Николаевич*, канд. хим. наук, ведущий инженер отдела сопровождения проектной деятельности УНИ ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Mezheumov.IN@tversu.ru.

*Пахомов Павел Михайлович*, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой физической химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», pavel.pakhomov@mail.ru.

*Хижняк Светлана Дмитриевна*, канд. хим. наук, доцент кафедры физической химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», sveta\_khizhnyak@mail.ru.

*Тихомиров Олег Алексеевич*, д-р геогр. наук, доцент, зав. кафедрой физической географии и экологии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», tikhomirovoa@mail.ru.

*Биденко Сергей Иванович*, д-р техн. наук, профессор, советник генерального конструктора, ПАО «Интелтех», BidenkoSI@inteltech.ru.

*Кравченко Павел Николаевич*, канд. геогр. наук, зам. проректора по научной работе, Московский университет им. С.Ю. Витте, PKravchenko@muiv.ru.

### ***Information about authors***

*Bocharov Alexander Vyacheslavovich*, Assistant, Department of Physical Geography and Ecology, “Tver State University”.

*Mezheumov Igor Nikolaevich*, PhD (Chem. Sci.), Leading Engineer, Project Support Department, Scientific Research Directorate, “Tver State University”.

*Pakhomov Pavel Mikhailovich*, Grand PhD (Chem. Sci.), Prof., Head of the Department of Physical Chemistry, “Tver State University”.

*Khizhnyak Svetlana Dmitrievna*, PhD (Chem. Sci.), Associate Professor, Department of Physical Chemistry, “Tver State University”.

*Tikhomirov Oleg Alekseevich*, Grand PhD (Geog. Sci.), Associate Professor, Head of Department of Physical Geography and Ecology, “Tver State University”.

*Bidenko Sergey Ivanovich*, Grand PhD (Tech. Sci.), Professor, Adviser on General Designer, PAO “Inteltech”.

*Kravchenko Pavel Nikolaevich*, PhD (Geog. Sci.), deputy Vice-rector for research, Moscow University named after S.Yu. Witte.

УДК 001.83:[332.14+502.3+551.583](063)(98) doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-738-740

**Международная научно-практическая конференция  
«Дни Арктики в Санкт-Петербурге — 2021:  
международное научное сотрудничество в Арктике  
в эпоху изменения климата»**

25—26 ноября 2021 г. Российским государственным гидрометеорологическим университетом совместно с Университетом МГИМО была проведена Международная научно-практическая конференция «Дни Арктики в Санкт-Петербурге — 2021: международное научное сотрудничество в Арктике в эпоху изменения климата» по линии российско-французского форума гражданских обществ «Трианонский Диалог».

На церемонии открытия конференции присутствовали лидеры дипломатического корпуса Франции, представители Комитета по делам Арктики в СПб, Комитета Совета Федерации Федерального Собрания РФ по федеративному устройству, региональной политике, местному самоуправлению и делам Севера, Комитета по межнациональным отношениям и реализации миграционной политики в СПб, а также представители Республики Саха (Якутия). Всего в работе конференции приняли участие более ста человек из разных стран мира: России, Франции, Норвегии, Испании и др.



Участники пленарного заседания конференции.

Модератором Пленарного заседания, прошедшего в первый день мероприятия, выступил и.о. проректора по научной работе РГГМУ, проректор по развитию РГГМУ *Денис Валентинович Леонтьев*.

На торжественной части конференции были зачитаны приветственные слова от ректора РГГМУ *Валерия Леонидовича Михеева*, члена-корреспондента РАН, специального представителя Президента Российской Федерации по международному сотрудничеству в Арктике и Антарктике *Артура Николаевича Чилингарова*.

Заместитель председателя Комитета по делам Арктики Правительства Санкт-Петербурга *Андрей Юрьевич Анохин* поздравил с началом работы конференции и зачитал приветственное слово Председателя Комитета *Германа Германовича Широкова* к делегатам конференции: «...сейчас Российская Федерация вступила в двухлетнее председательство в Арктическом совете, международное научное сотрудничество по ключевым вопросам арктической повестки становится особенно значимым. Решение проблем адаптации арктических территорий к изменениям климата является одним из приоритетов концепции председательства нашей страны в Арктическом совете в 2021—2023 гг...».

Обратился к гостям и Епископ Нарьян-Марский и Мезенский *Владыка Иаков*, отметив важность дальнейшего сотрудничества в деле возрождения Русской Арктики.

Не остались в стороне и представители французской стороны. Генеральный Консул Франции в Санкт-Петербурге, директор Санкт-Петербургского филиала Французского института в России *Pascal Sliwanski* также высказался



Выступление на круглом столе: «Экономические аспекты развития Арктики».



Молодые участники конференции на заседании круглого стола.

о необходимости укрепления международных партнерских отношений в интересах процветания Арктики.

В рамках пленарного заседания со специальными докладами выступили председатель правления Института палеонтологии человека *Henry de Lumley* и главный научный сотрудник Национального научно-исследовательского центра Франции *Marie-Antoinette de Lumley*. От РГГМУ свой доклад о влиянии физико-химических процессов на изменчивость арктического озона представил профессор кафедры метеорологических прогнозов *Сергей Павлович Смышляев*.

Во второй день работы конференции были проведены четыре круглых стола, где участники обсудили широкий круг вопросов, затрагивающих развитие Арктического региона:

- изменение климата и устойчивое развитие Арктического региона;
- экономические аспекты развития Арктики;
- экосистемы Арктического региона в условиях глобальных изменений;
- социально-экономические аспекты развития Арктики.

После мероприятия для гостей была проведена экскурсия на ледокол «Красин».

29—30 ноября мероприятие продолжилось международным конкурсом «Климатон» (Climathon), на котором обсуждались идеи по борьбе с изменением климата в Арктическом регионе, где свои проекты по защите Арктики представили команды студентов из МГИМО, РГГМУ и ИТМО.



НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 65

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Начальник РИО А.В. Ляхтейнен*  
*Технический редактор М.В. Иванова*

---

Подписано в печать 15.12.2021. Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times New Roman.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,5375. Тираж 500 экз. Заказ № 1168.  
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

---