

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 59

Научно-теоретический журнал

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

ISSN 2074-2762

РГГМУ
Санкт-Петербург
2020

УДК 3 + 502.52 + 55
ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Гидрометеорология и экология. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 59. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2020. 162 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*
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, ректор Института повышения квалификации Росгидромета; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Хуакни Л.**, PhD, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Джейр (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*
Шилин М.Б., д-р геогр. наук, проф. — *зам. главного редактора*
Гайдукова Е.В., канд. техн. наук, доцент — *отв. секретарь*
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.; **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; **Прощутинский 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; **Фролов И.Е.**, д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН; **Хоссфельд Уве**, PhD, университет Йена (Германия); **Шапрон Б.**, PhD, ведущий ученый Института морских исследований IFREMER (Франция); **Шукин Г.Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф.

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

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

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 07.02.2007 г.

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

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

ISSN 2074-2762

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2020
© Авторы публикаций, 2020

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

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

RUSSIAN JOURNAL OF HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN STATE
HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

№ 59

A theoretical research journal

*Published since October, 2005
4 issues a year*

ISSN 2074-2762

RSHU
St. Petersburg
2020

UDC 3 + 502.52 + 55

LBC 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Russian Journal of Hydrometeorology and Ecology. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 59. St. Petersburg: RSHU Publishers, 2020. 162 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*

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); **Kambolov 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; **Timofoeva A.G.**, PhD in Geography, Rector of the Institute for Advanced Studies of Roshydromet

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*

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

Shilin M.B., Grand PhD in Geography, Professor — *Deputy Editor in Chief*

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

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; **Frolov I.E.**, Grand PhD in Geography, 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); **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; **Proshutinskii 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 included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, which should publish the main results of theses for the Doctor and Candidate of sciences degree.

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

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

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

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

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

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

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

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

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2020

© Authors of publications, 2020

ISSN 2074-2762

Содержание

Геофизика

- М.Ю. Белевич.* О корректном использовании математических конструкций в физических моделях 7

Метеорология

- А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина.* Влияние метрик на определение точек бифуркации во временных рядах метеорологических величин 28

Гидрология

- А.Е. Баймаганбетов, Е.В. Гайдукова.* Применение метода стохастического фонового прогноза к речным бассейнам Казахстана 41
- С.А. Кондратьев, Ю.В. Карпечко, М.В. Шмакова.* Влияние вырубок леса на сток и вынос биогенных элементов с лесных водосборов Карелии (по данным математического моделирования) 51

Океанология

- В.С. Травкин, Т.В. Белоненко.* Оценка глубины зимней конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря и методы ее оценки 67

Экология

- Я.Ю. Блиновская, Л.И. Соколова, А.М. Лебедев, Н.Е. Казанова, А.Б. Тарасов.* Оценка состояния подводных ландшафтов в портовой акватории бухты Находка (Японское море) 84
- С.А. Кондратьев, А.Ю. Брюханов, Н.В. Игнатьева, А.Е. Лапенков, А.М. Расулова, А.В. Терехов, Н.С. Обломкова.* Экологические проблемы реки Новой (Санкт-Петербург) и пути их решения. 94

Геоинформатика

- В.В. Грызунов, А.О. Нестерова.* Структура живучей сети метеокомплексов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» 111
- М.О. Колбанёв, И.И. Палкин, Т.М. Татарникова.* О роли данных в цифровой экономике. 124

Социально-гуманитарные науки

- В.И. Биненко.* Вклад академика К.Я. Кондратьева в развитие метеорологии и экологии (к 100-летию со дня рождения) 137

В порядке дискуссии

- Д.И. Якушев.* Метод совместного представления датировок ископаемых объектов 150

Хроника

- К столетию со дня рождения Л.Т. Матвеева 159

CONTENTS

Geophysics

M. Belevich. On the correct use of mathematical constructions in physical models . . . 7

Meteorology

A.D. Kuznetsov, O.S. Seroukhova, T.E. Simakina. Influence of metrics on determination of bifurcation points in time series of meteorological values. . . 28

Hydrology

A.E. Baimaganbetov, E.V. Gaidukova. Application of the method of stochastic background forecast to Kazakhstan's river basins 41

S.A. Kondratyev, Yu.V. Karpechko, M.V. Shmakova. Influence of forest cutting down on runoff and nutrient removal from forest catchment of Karelia (according to mathematical modeling) 51

Oceanology

V.S. Travkin, T.V. Belonenko. Mixed layer depth in winter convection in the Lofoten Basin in the Norwegian Sea and assessment methods 67

Ecology

Ya.Yu. Blinovskaya, L.I. Sokolova, A.M. Lebedev, N.E. Kazanova, A.B. Tarasov. Underwater landscapes condition assessment in the Nakhodka bay (sea of Japan) port water area. 84

S.A. Kondratyev, A.Yu. Bruchanov, N.V. Ignatyeva, A.E. Lapenkov, A.M. Rasulova, A.V. Terekhov, N.S. Oblomkova. Ecological problems of the river Novaya (St. Petersburg) and ways to solve them. 94

Geoinformatics

V.V. Gryzunov, A.O. Nesterova. Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems "Industry 4.0" 111

M.O. Kolbanev, I.I. Palkin, T.M. Tatarnikova. Date. 124

Social science and humanities

V.I. Binenko. Contribution of Academician K.Ya. Kondratyev in the development of meteorology and ecology (to the 100th anniversary) . . . 137

In order of discussion

D.I. Yakushev. Method for consolidate representation of fossil objects dating 150

Chronicle 159

УДК 532.5:51-72

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-7-27

О корректном использовании математических конструкций в физических моделях

М.Ю. Белевич

Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Москва
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
mbelevich@yahoo.com

Обсуждаются физические ограничения, которым должны удовлетворять математические конструкции, используемые при разработке и модификации математических моделей. Все рассуждения иллюстрируются примерами из механики жидкости. Рассматриваются следующие темы: средства описания; корректный подход к модификации модели и физический смысл этапов построения модели и некоторые другие. Описываемые физические ограничения нередко остаются без должного внимания, что порой приводит к различным нежелательным последствиям. Это может быть чрезмерное усложнение задачи, неявная подмена заявленной задачи другой или, наконец, отсутствие решения у сформулированной проблемы.

Ключевые слова: математическая модель, физический смысл.

On the correct use of mathematical constructions in physical models

M. Belevich

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The physical limitations of the mathematical constructions used in developing or modifying mathematical models are discussed. All reasonings are illustrated by examples from fluid mechanics. The following topics are considered: means of description; correct approach to model modification and the physical meaning of model development stages.

In the first case, the method of describing physical objects using numbers as well as corresponding restrictions are investigated, followed by developing general recommendations on procedures for modifying mathematical models of fluid dynamics. The well-known procedure of averaging the viscous fluid model equations to obtain the turbulent fluid model is used as an illustration. Since we are considering the models of physical phenomena, it is natural to provide physical interpretation for each stage of model development. Unfortunately, some of the transformations used are often treated as purely technical tricks, therefore denoting the lack of the physical meaning in such cases, which does not make a mathematical procedure unacceptable, but does mark out the model's place which requires reasonable interpretation. In this paper, we are considering two variants of this kind of interpretation, namely the case of using imaginary quantities, and the case of applying integral transformations.

Meanwhile, all the above-mentioned restrictions are not always given due attention. Sometimes this leads to various undesirable consequences, including excessive task complication, implicit substitution of a declared problem with another one, or, finally, lack of solution to the formulated problem.

Keywords: mathematical model, physical meaning.

For citation: *M. Belevich. On the correct use of mathematical constructions in physical models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 7—27. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-7-27*

1. Введение

Несмотря на существование многих удачных математических моделей физических явлений, продолжают строиться новые модели и модифицироваться старые. Делается это, однако, не всегда корректно. В силу того что математические модели призваны описывать физические явления, они должны учитывать также определенные ограничения, которые накладывает физика рассматриваемых процессов на используемые математические конструкции. В первую очередь это связано со средствами описания, т. е. с числами, которые ставятся в соответствие физическим характеристикам. Чаще всего такие средства являются не просто числами, но числами, снабженными размерностью, и это предъявляет определенные требования к используемым математическим конструкциям. Другим общим ограничением является требование существования так называемого физического смысла на каждом этапе построения математической модели физического явления и т. п. К сожалению, иногда эти и другие ограничения во внимание не принимаются, что не может не сказаться на строящейся модели, формулируемой задаче и в конечном счете на ее решении или даже его существовании.

Поучительный пример подобного рода проанализирован в работе [1].

Различные ограничения математических конструкций в настоящей работе рассматриваются на примере модели движущейся жидкости. При этом важно иметь в виду, что здесь исследуется именно корректное построение математической модели, а не те или иные способы решения задач, связанных с подобной моделью.

Таким образом, с одной стороны, целью работы является демонстрация различных аспектов общей проблемы, которая заключается в вольном применении математических средств без должного учета их определений и физических ограничений. С другой стороны, здесь же рассматриваются возможные варианты разрешения указанной проблемы.

К числу обсуждаемых тем относятся:

- описание свойств физических объектов числами;
- различие между измеримыми (интегральными) и неизмеримыми (дифференциальными) характеристиками физических объектов;
- этапы построения моделей и их корректные модификации;
- физический смысл промежуточных шагов построения математических моделей.

Построение математической модели любого физического явления осуществляется путем выполнения ряда этапов, каждый из которых можно представить в виде следующей последовательности действий:

- 1) наблюдение явления и поиск наиболее значимой закономерности, которой подчиняются характеристики описываемого явления, т. е. поиск так называемого закона природы;

- 2) формулировка постулата, соответствующего найденному закону природы;
- 3) вывод уравнения модели, основанного на сформулированном постулате.

В случае если строящаяся модель явления оказывается незамкнутой (известных величин больше, чем уравнений в модели), весь цикл указанных выше действий (1—3) повторяется до тех пор, пока не будет получена замкнутая система уравнений.

Здесь важно обратить внимание на следующее. Во-первых, если постулаты формулируются на основе законов природы, т. е. закономерностей, извлеченных из данных измерений, то это означает, что они определяют соотношения между интегральными параметрами физических объектов, поскольку именно интегральные параметры доступны измерению. Во-вторых, при построении модели, базирующейся на нескольких законах природы, искомые функции вводятся последовательно, а не все сразу, одновременно. С каждым очередным постулатом связано появление некоторых новых искомых переменных (обычно одной). И, в-третьих, все постулаты, составляющие модель явления, независимы, и, следовательно, каждый из них может рассматриваться вне зависимости от того, сформулированы остальные постулаты или еще нет. Надо отметить, что исследований, специально посвященных обсуждению упомянутой проблемы, обнаружить в литературе не удалось. Часть из рассматриваемых здесь вопросов впервые затрагивалась в [2].

Структура предлагаемой работы такова. В п. 2 обсуждаются способы описания характеристик физических объектов числами и следующие из этого ограничения. Далее рассматривается последовательность определения (включения в модель) искомых переменных, обусловленная этапами создания модели, что, в свою очередь, очерчивает круг допустимых процедур, которые могут быть использованы в дальнейшем. В качестве иллюстрации используется широко применяемая процедура осреднения. Эти вопросы обсуждаются в п. 3. Ограничения, связанные с существованием физического смысла на каждом этапе построения модели, рассматриваются в п. 4. К сожалению, некоторые из применяемых процедур нередко трактуются как чисто технические приемы, и вопрос о физическом смысле в этом случае не ставится, что, по моему мнению, неверно. Отсутствие физического смысла некоторой математической процедуры, разумеется, не делает ее недопустимой, но помечает место, требующее разумной интерпретации. В п. 4 предлагается такая интерпретация некоторых используемых математических конструкций. Полученные результаты подытоживаются в п. 5.

2. Средства описания

2.1. «Физические числа»

Потребность в объективном описании явлений и оценках характеристик физических объектов привела в свое время к поиску универсальных средств описания, не зависящих от времени, места и наблюдателя. Такое средство было найдено, и им оказались числа. Для того чтобы математическую модель можно было построить, в первую очередь требуется снабдить свойства объекта или

явления физического мира числовыми эквивалентами, характеризующими эти свойства однозначно. Абсолютной связи между числом и каким-либо свойством физического объекта не существует, но всегда можно задать связь относительную.

Намереваясь охарактеризовать вещественным числом некоторое наблюдаемое свойство физического объекта (скажем, протяженность в пространстве), выбирают объект, обладающий аналогичным свойством (в данном случае протяженностью), рассматривают его как эталонный объект и связывают с этим свойством эталона число 1. Сравнение изучаемого объекта с выбранным эталоном позволяет далее указать, во сколько раз рассматриваемое свойство этого объекта отличается от эталонного. Такое сравнение дает возможность охарактеризовать наблюдаемое свойство объекта вещественным числом.

Переход к числам, таким образом, происходит по следующей схеме:

1) выбор свойства Π , подлежащего численной оценке;

2) выбор эталона E и оценка рассматриваемого свойства эталона $\Pi(E)$ числом*

$$Num(\Pi(E)) = 1, \quad (1)$$

3) оценка того же свойства $\Pi(B)$ у изучаемого объекта B путем сравнения с эталоном

$$Num(\Pi(E)) \cdot \Pi(B) = Num(\Pi(B)) \cdot \Pi(E) \quad (2)$$

или, с учетом (1),

$$\Pi(B) = Num(\Pi(B)) \cdot \Pi(E). \quad (3)$$

Здесь, первый пункт — указание того, что надлежит измерять, второй — выбор единицы измерения, а третий — собственно измерение**. Величина $Num(\Pi(B)) \in R^1$ — число, которое ассоциируется с $\Pi(B)$, т. е. со свойством Π физического объекта B ; $\Pi(E)$ — аналогичное свойство эталона. При этом $\Pi(E) \in SU$, где SU — система единиц измерения, т. е. совокупность независимых друг от друга эталонных свойств, выбранных для оценки соответствующих свойств объектов.

Из формулы (3) следует, что со свойством физического объекта $\Pi(B)$ фактически ассоциируется не вещественное число, элемент R^1 , а пара (число, эталон) = $(Num(\Pi(B)), \Pi(E))$, которая является элементом прямого произведения $R^1 \times SU$. Последнее обеспечивает однозначность сопоставления физической характеристике числового эквивалента. И поскольку этот эквивалент является не числом, а парой (число, эталон), его можно было бы назвать «физическим числом», т. е.

* Использовать, разумеется, можно любое вещественное число из множества вещественных чисел R^1 , но единица — простейший и наиболее удобный вариант.

** Если под свойством Π понимать, например, длину, то формула (3) читается буквально так: длина B равна Num длинам E .

числом, снабженным физической размерностью, каковой является название выбранного эталона.

Легко видеть, что в выражении (2) тело B и эталон E совершенно равноправны, что естественно, поскольку выбор в качестве эталона именно тела E обуславливается некими внешними причинами.

2.2. Величины измеряемые (меры) и вычисляемые (плотности)

Описанный выше переход к числам связан с измерениями. Все измеряемые свойства тел всегда характеризуют некоторое множество точек тела, рассматриваемого как единое целое. Такие свойства называются *интегральными параметрами* тела. Масса, объем, заряд, энергия — все это примеры измеряемых (интегральных) параметров. Интегральные параметры описываются так называемыми *мерами*, т. е. аддитивными функциями множеств (см., например, [3]), некоторые свойства которых эти параметры характеризуют.

Часто интерес представляют не только интегральные параметры, но и их распределение в исследуемом теле. В этом случае реальные физические тела моделируются так называемой сплошной средой, которая возникает в результате применения *гипотезы сплошности* к достаточно большой совокупности частиц, микроскопических по сравнению с масштабами изучаемого явления. Каждое дискретное физическое тело (например, совокупность молекул или звездное скопление), рассматриваемое как сплошная среда, заменяется континуумом точек, что дает возможность описывать свойства тела гладкими функциями (т. е. функциями, имеющими нужное число производных), определенными на этом континууме. Индивидуальность реальных частиц, составляющих тело, при этом теряется, и эволюция их свойств, таким образом, не изучается.

Любой интегральный параметр сплошной среды всегда характеризует континуум точек. Поскольку его значение в любой точке равно нулю, для математического описания свойств тел в точках вместо интегральных параметров используются их *плотности* или *дифференциальные (локальные) параметры*. Любой дифференциальный параметр определяется как предел отношения двух интегральных параметров, т. е. по существу является производной одной меры по другой (см. [4]). Формально это можно определить следующим образом.

Пусть $P_1 \subset B$ — часть тела B . Пусть P_2 , в свою очередь, часть P_1 , т. е. $P_2 \subset P_1$. И так далее. Построим цепочку $B \supset P_1 \supset P_2 \supset \dots \supset P_k \supset \dots \supset X$ такую, что все части P_k имеют только одну общую точку X . Пусть на теле B определены меры Π^1 и Π^2 . Соответственно, они определены и на частях P_k этого тела. Дифференциальный параметр π_{12} в точке X , т. е. производная меры Π^1 по мере Π^2 в этой точке определяется выражением

$$\pi_{12}(X) \equiv \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\Pi^1(P_k)}{\Pi^2(P_k)}.$$

Учитывая (3) для $\pi_{12}(X)$, получаем:

$$\pi_{12}(X) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{Num(\Pi^1(P_k)) \cdot \Pi^1(E_1)}{Num(\Pi^2(P_k)) \cdot \Pi^2(E_2)} = Num(\pi_{12}(X)) \cdot \frac{\Pi^1(E_1)}{\Pi^2(E_2)}, \quad (4)$$

где E_1 и E_2 суть соответствующие эталоны, а числовой множитель $Num(\pi_{12}(X))$ обозначает

$$Num(\pi_{12}(X)) \equiv \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{Num(\Pi^1(P_k))}{Num(\Pi^2(P_k))}.$$

Как видим, наряду с интегральными параметрами дифференциальные также ассоциируются с «физическими числами», однако их физические размерности оказываются дробными. Часто в качестве меры $\Pi^2(\cdot)$ используется объем и, обычно именно в этом случае соответствующая функция точки называется плотностью рассматриваемого интегрального параметра; однако возможны и иные варианты. Например, если $\Pi^2(\cdot)$ интерпретируется как временной интервал, тогда $\pi_{12}(X)$, называется скоростью изменения $\Pi^1(\cdot)$. В табл. 1 представлены примеры локальных параметров.

Таблица 1

Примеры локальных параметров
Examples of local parameters

Плотность	Отношение эталонов	Размерность в системе СИ
Скорость	L/T	метр/секунда
Плотность массы	M/L^3	килограмм/метр ³
Удельный объем	L^3/M^1	метр ³ /килограмм
Давление	$M/(LT^2)$	килограмм/(метр · секунда ²)

В этих примерах приведены размерности локальных параметров, т.е. $\frac{\Pi^1(E_1)}{\Pi^2(E_2)}$

(см. выражение (4)). Все они записываются как отношения единиц измерения (эталонов) соответствующих интегральных параметров. Несколько сложнее выглядит последний пример, однако и здесь имеется такое же отношение интегральных параметров. В отличие от измеряемых интегральных параметров среды дифференциальные параметры не измеряются в принципе. Они всегда вычисляются.

2.3. Ограничения в силу средств описания

Средства описания накладывают некоторые ограничения на возможные математические конструкции, используемые при построении моделей физических объектов. Простейшим ограничением такого рода является требование однородности математического выражения по размерности. Необходимость этого

ограничения становится очевидной, если на место обычно записываемых числовых функций $Num(\Pi(B))$ или $Num(\pi(X))$ подставлять пары в соответствии с (3) или (4). При отсутствии однородности по размерности размерные множители не удастся вынести за скобку и сократить. Само выражение в этом случае будет зависеть от используемых эталонов, что неверно и чего быть не должно.

Другим примером указанного ограничения может служить построение безразмерных комбинаций размерных величин. Так, если аргумент функции (например показательной, логарифмической и т. п.) представляет собой произведение размерных величин, то их размерности не могут быть произвольными, а должны обеспечивать безразмерность всего произведения. В противном случае математическое выражение будет лишено физического смысла, так как его значение будет зависеть от использованных эталонов и потому должно быть признано ошибочным. Такого рода грубые ошибки, как правило, не встречаются, однако часто встречается другая ошибка, также связанная с размерностью. Речь идет о работе с некоторыми интегральными преобразованиями (в частности, с преобразованием Фурье) и их физическими интерпретациями.

Интегральные преобразования (и преобразование Фурье в их числе) — часто используемый прием решения задач математической физики и метод получения уравнений, описывающих спектральные свойства изучаемого явления (см., например, [5, 6]).

В качестве иллюстрации рассмотрим многомерное преобразование Фурье-функции $f(\mathbf{x})$, где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$, $x_j \in \mathbb{R}^1$. Фурье-образ указанной функции имеет вид

$$F(\mathbf{k}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{x}) e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} d\mathbf{x},$$

где $\mathbf{k} = (k_1, \dots, k_n)$, $k_j \in \mathbb{R}^1$. В сугубо математических работах (где ни о каких размерных величинах речь не идет) обычно считается, что $\mathbf{k}$ и $\mathbf{x}$ являются элементами n -мерного евклидова пространства, т. е. векторного пространства* с определенным на нем скалярным произведением**, а выражение $\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}$ в показателе экспоненты таким скалярным произведением и считается (см., например, [7, 8] и др.).

В физических работах подобная интерпретация этого выражения, вообще говоря, неприемлема, поскольку переменная $\mathbf{x}$ обычно имеет некоторую физическую размерность $[\mathbf{x}]$, в то время как выражение $\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}$ должно быть безразмерным ($[\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}] = 1$). Отсюда следует, что размерность переменной $\mathbf{k}$ должна быть обратной размерности $[\mathbf{x}]$, т. е. $[\mathbf{k}] = [\mathbf{x}]^{-1}$, и, таким образом, величины $\mathbf{x}$ и $\mathbf{k}$ имеют разный физический смысл и оказываются элементами разных векторных

* Векторное пространство определяется как множество, для элементов которого указаны операции сложения элементов и умножения их на числа, результаты которых являются элементами того же множества.

** Скалярным произведением называется билинейная числовая функция, определенная на элементах векторного пространства.

пространств. Между тем скалярное произведение определено для элементов одного и того же векторного пространства (см., например, [9]). Это, в частности, означает возможность вычисления суммы двух произвольных элементов такого пространства, что из физических соображений в данном случае, очевидно, не имеет места, но что совершенно необходимо для описания, скажем, векторных величин их компонентами.

Отдельной проблемой является случай использования недекартовых координат, т. е. случай, когда точка $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ считается заданной координатами, отличными от декартовых. Пример такого рода приведен в монографии [10, с. 198], где рассматривается случай сферических пространственных координат. Однако с учетом сказанного выше рассуждения автора [10] вызывают сомнения. Кроме того, в этом случае остается неясной геометрическая интерпретация компонент волнового вектора.

Обсуждение этой проблемы и подхода к ее решению см. далее в п. 4.2.

3. Модификация модели физического явления

3.1. Построение модели явления и ее модификация

Построение любой модели складывается из последовательности этапов, каждый из которых связан с поиском очередного «закона природы», формулированием соответствующего ему постулата, выводом следующего из этого постулата уравнения и (возможным) определением новых искомых переменных. Вся последовательность заканчивается получением замкнутой системы уравнений модели, описывающей эволюцию некоторой совокупности свойств реального физического объекта.

Такая модель, как и любая другая, имеет свою область применения, за пределами которой она не работает. Чтобы расширить область применения, требуется построить новую модель. На первый взгляд, тут существуют два варианта действий. Можно проделать весь путь построения модели заново, по ходу дела внося изменения в то, что должно выглядеть по-новому. А можно, и это наиболее часто используемый вариант, взять уже готовую модель и внести в нее поправки, необходимые для расширения области применения. Второй подход, хотя и выглядит естественным, не всегда применяется корректно.

Если формулировка требуемых изменений возможна лишь в том случае, когда исходная модель полностью построена*, тогда оба варианта эквивалентны. Однако, если планируемое изменение может быть сформулировано уже на каком-то промежуточном этапе, указанные варианты оказываются различными, а сам этот этап помечает ту часть модели, которая может подвергнуться модификации. Иными словами, видоизменить можно лишь те переменные и уравнения, которые на данный момент имеются в модели. То, что модель еще не завершена, препятствием для модификации не является, поскольку все постулаты модели независимы и могут рассматриваться отдельно друг от друга. Остальные переменные и уравнения,

* Скажем, для этого требуется весь список искомых функций, который формируется лишь в конце построения модели.

возникающие на следующих этапах, также могут измениться, но уже вследствие осуществленной модификации. Легко видеть, что описанное проведение модификации эквивалентно построению модифицированной модели «с нуля», т. е. первому варианту. При этом постулаты исходной модели сохраняют свою независимость, как и должно быть.

На практике же обычно происходит иначе. Модификации подвергается вся исходная модель, даже в тех случаях, когда планируемое изменение может быть осуществлено на каком-либо промежуточном этапе. При этом исходная последовательность этапов построения модели нарушается, и независимость постулатов, образующих исходную модель, утрачивается. Результаты могут быть самыми неожиданными (см. [1] и нижеследующий пример).

3.2. Модификация модели вязкой жидкости

В качестве примера рассмотрим получение модели турбулентной жидкости путем модификации модели вязкой жидкости. Построение исходной модели осуществляется в четыре этапа, каждый из которых связан с выводом очередного дифференциального уравнения модели (табл. 2).

Таблица 2

Этапы построения модели вязкой жидкости			
Viscous Fluid Model developing stages			
Этап	Постулат	Уравнение	Искомые функции
1		Сохранение массы	
	$d_t M = 0$	$d_t \rho + \rho(\nabla, \vec{v}) = 0$	$\rho, \vec{v}$
2		Баланс импульса и определение тензора напряжений	
	$d_t \mathbf{m} = \mathbf{f}$	$\rho d_t \vec{v} = -\nabla p + 2\mu \text{div} \mathbf{D}$	$(\rho, \vec{v}), p$
3		Баланс энергии и определение температуры	
	$d_t \text{Energy} = W + Q$	$d_t T = \kappa \Delta T$	$(\rho, \vec{v}, p), T$
4		Уравнение состояния	
		$\rho = \rho(p, T)$	$\rho, \vec{v}, p, T$

В таблице использованы следующие обозначения.

Для интегральных параметров тела: M — масса, $\mathbf{m}$ — импульс, $\mathbf{f}$ — действующая сила, Energy — полная энергия, W — мощность действующей силы, Q — скорость нагрева.

Для дифференциальных параметров: ρ — плотность массы, $\vec{v}$ — скорость изменения места, p — давление, T — температура. В скобки заключены параметры, введенные на предыдущих этапах построения модели.

Кроме того, используются обозначения: t — время, μ — коэффициент динамической вязкости, κ — коэффициент температуропроводности, $\mathbf{D}$ — тензор скоростей деформации.

Модель турбулентной жидкости должна явно воспроизводить крупномасштабную (по сравнению с масштабами турбулентности) часть движений жидкости и параметрически учитывать мелкомасштабную часть движений (турбулентность). Иными словами, уравнения модифицированной модели должны, по замыслу, описывать осредненное движение точек среды вдоль сглаженных траекторий.

3.2.1. Стандартный подход

Любая модель, содержащая более одного постулата, создается поэтапно. Порядок, в соответствии с которым формулируются и используются постулаты, задает порядок определения и введения в модель искомым неизвестных величин. В том случае, когда построенная модель в дальнейшем модифицируется, в качестве объекта модификации обычно выступает уже полностью сформулированная модель. Другими словами, сначала строится первоначальный вариант модели, выводятся все уравнения и определяются (вводятся) все неизвестные, а затем вся эта замкнутая система уравнений подвергается модификации.

В обычно применяемой процедуре осреднения уравнений модели вязкой жидкости выполняются следующие шаги.

1. Все искомые переменные (обозначим их здесь буквами f_k) независимо друг от друга рассматриваются как случайные процессы (см., например, [11]).

2. Они записываются в виде суммы $f_k = \overline{f_k} + f'_k$ средней (сглаженной) $\overline{f_k}$ компоненты и случайной (флуктуирующей) f'_k составляющей.

3. После подстановки таких сумм в дифференциальные уравнения модели уравнения осредняются.

4. В качестве оператора осреднения используется линейный непрерывный проектор, удовлетворяющий условиям Рейнольдса.

В результате все нелинейные слагаемые порождают новые члены (ниже такой новый член обведен рамочкой):

$$\overline{f_k f_n} = \overline{f_k} \overline{f_n} + \boxed{\overline{f'_k f'_n}}.$$

Здесь надчеркиванием обозначено осреднение.

Такой подход приводит к труднообозримым выражениям с большим числом новых неизвестных функций и потому в «чистом» виде не используется. Вместо этого непосредственно перед осреднением принимается ряд упрощающих гипотез (типа несжимаемости среды, приближения Буссинеска и т. п.; см., например, [10,11] и др.), после чего фактическому осреднению подвергаются лишь компоненты скорости. В результате первыми двумя уравнениями модели турбулентной жидкости оказываются уравнение неразрывности несжимаемой среды и уравнение Рейнольдса. Описываемая процедура осреднения, таким образом, на деле не является общей и может быть использована лишь в том случае, когда удастся сформулировать указанные упрощения.

3.2.2. Альтернативный подход

Взглянем на проблему осреднения с иных позиций. Прежде всего, примем во внимание то, что в отличие от потенциально измеряемых интегральных параметров среды локальные характеристики (плотности, скорости и т. п.), определенные в точке, являются принципиально не измеряемыми* и должны вычисляться в соответствии с их определением и налагаемыми связями, т. е. системой уравнений (пример изменения локальных параметров при изменении уравнений модели в результате осреднения см. ниже, в п. 5). Отсюда следует, что исходные гидромеханические поля, какими бы изменчивыми они не были, в действительности не являются независимыми. Напротив, они тесно связаны друг с другом, и их связь задается некоторой системой уравнений. Все это означает, что случайное возмущение в любом из них порождает возмущения в остальных. При этом порождаемые возмущения таковы, что все поля по-прежнему удовлетворяют указанной системе уравнений. Другими словами, обсуждаемые возмущения не являются случайными и в отсутствие исходного возмущения тождественно равны нулю.

Если одно из гидромеханических полей выбрать в качестве независимого и именно у него допустить наличие случайной составляющей, тогда остальные поля, функционально с ним связанные, будут также содержать случайную составляющую. Напротив, остальные поля могут считаться гладкими (т. е. не содержащими случайной составляющей), если они вычисляются по сглаженному полю независимой величины. Такой величиной, очевидно, удобно считать некую первичную характеристику среды (в смысле очередности их появления при построении модели). Описываемый способ построения модифицированной модели использован в [1].

При построении модели жидкости исходными представлениями служат не зависящая от времени масса жидкости M и ее объем $V(t)$ (см., например, [12]). Можно легко показать, что скорость изменения объема $d_t V$ определяется векторным полем скорости $\vec{v}$. Так, если в некоторый отсчетный момент времени t_0 объем жидкости есть V_0 , то текущий объем вычисляется по формуле $V(t) = \int_{V_0} J dV$, где J — якобиан преобразования эйлеровых переменных в лагранжевы. Скорость изменения объема равна $d_t V = \int_{V_0} d_t J dV = \int_V \frac{1}{J} d_t J dV$. Поскольку в произвольной точке жидкости справедливо соотношение**

* Повсеместно используемое экспериментальное определение, т. е. измерение, различных локальных параметров (скорости, плотности, температуры, давления и т.п.) не должно вводить в заблуждение. В каждом таком случае измеряется отнюдь не предел отношения мер (интегральных параметров) в некоторой точке континуума, т. е. не то, чем является локальный параметр по определению, а отношение мер малых, но конечных объемов реальных жидкостей. Поскольку любой такой объем всегда содержит бесконечно много точек среды, каждое измерение само фактически является осреднением по этому объему.

** См., например, [13] или [14].

$$\frac{1}{J} d_t J = \operatorname{div} \vec{v}, \quad (5)$$

имеем

$$d_t V = \int_V \operatorname{div} \vec{v} dV. \quad (6)$$

Обратим внимание на то, что задача осреднения или разделения движений по масштабам может быть поставлена уже на этом шаге разработки модели, хотя ни плотность массы, ни плотности сил еще не были введены в рассмотрение и определены.

Таким образом, единственной зависящей от времени мерой, которая может содержать случайную компоненту, является объем жидкости. В соответствии с выражением (6) его эволюция определяется полем скорости. Вектор скорости $\vec{v}$ и якобиан J и есть те локальные характеристики движущейся жидкости, которые могут рассматриваться как первичные (в указанном выше смысле), в отличие от плотности массы, давления и т. п. Поскольку движущаяся среда обычно описывается в терминах скорости, удобно использовать скорость среды в качестве той характеристики, которая подвергается осреднению (тем более что это соответствует сложившейся практике). Иными словами, разумным выбором осредняемой характеристики представляется поле скорости точек жидкости. Остальные характеристики (плотность массы, давление и т. д.) вычисляются по сглаженному полю скорости, а потому не содержат случайных составляющих, и осреднению подвергаться не должны.

4. Физический смысл этапов построения модели

Поскольку в данной работе рассматриваются математические модели физических явлений, т. е. системы уравнений, допускающие физическую интерпретацию как самих уравнений, так и их решений, подобную же интерпретацию должен допускать и каждый шаг, выполняемый при построении модели. Это, однако, имеет место не всегда. Два характерных примера будут специально рассмотрены ниже.

В первую очередь это касается мнимых и комплексных чисел. Теория функций комплексных переменных предоставляет исследователю немало средств для решения стоящих перед ним задач, которые, будучи достаточно мощными, вместе с тем могут рассматриваться лишь как технические приемы, не имеющие физического смысла.

Другим примером такого рода могут служить различные интегральные преобразования. С физической интерпретацией лучше всего дело обстоит, видимо, у преобразования Фурье. Однако и здесь само преобразование по сути является техническим приемом.

4.1. Физический смысл мнимых величин

В классической физике комплексные числа не используются как средства описания. Их начинают применять в специальной теории относительности (см., например, [15]), но сами числа не несут при этом никакого физического смысла,

оставаясь техническим средством. Однако в статье [16] и ряде других они вводятся в модель для решения определенных технических проблем при задании координат в пространственно-временном континууме (пространстве событий) и при этом наделяются вполне очевидным физическим смыслом. Вот как это делается в упомянутой работе, посвященной построению причинно-обусловленной модели жидкости.

Будем рассматривать пространство событий W как прямое произведение мировой линии наблюдателя и трехмерного пространства одновременных (относительно времени наблюдателя t) событий. Отобразим пространство одновременных событий на R^3 , а мировую линию наблюдателя — на пространство мнимых чисел, которое обозначим через iR^1 . В результате возникает новое отображение $\phi' : W \rightarrow iR^1 \times R^3$, которое называется системой отсчета наблюдателя. Это отображение снабжает всякое событие $P \in W$ четырьмя числами $x_P = (x^0, x^1, x^2, x^3)$ — его координатами. Соответственно мировая линия точки тела определяется четырьмя функциями: $x^0(t)$, $x^1(t)$, $x^2(t)$, $x^3(t)$. Они задают координаты точки тела в любой момент времени. Мировая линия наблюдателя по определению есть $(x^0(t), 0, 0, 0)$. При этом полагается, что $dx^0 = i s dt$, где $i = \sqrt{-1}$, а s — фазовая скорость сигнала, с помощью которого проводятся наблюдения и измерения характеристик движения жидкости.

Такой прием, помимо того, что обеспечивает правильные знаки слагаемых в выражении для интервала между событиями, позволяет дать вполне осмысленную интерпретацию действительным и мнимым числам, а именно следующую. Поскольку события, связанные с наблюдателем, имеют вид $(x^0(t), 0, 0, 0)$, где $x^0(t) \in iR^1$, на его мировой линии существует единственное событие, все координаты которого являются вещественными числами $(0, 0, 0, 0)$. Это событие соответствует моменту времени $t = 0$, которое естественно интерпретировать как *настоящее время наблюдателя*. Все остальные события наблюдателя связаны с мнимым временем $i \cdot t$, и потому не являются действительными, т. е. не происходят сейчас. Часть таких событий осталась в *прошлом*, а другая часть случится в *будущем*. Важно, что ни та, ни другая часть событий не является настоящим, т. е. реальным. Поэтому логично связать те события, для которых $t < 0$, с прошлым наблюдателя, а те, для которых $t > 0$, с будущим этого же наблюдателя. То же касается всех прочих событий: действительными (реальными) считаются только события, одновременные с настоящим временем наблюдателя ($t = 0$). Совокупность событий $(0, x^1(0), x^2(0), x^3(0))$ образует границу между прошлым и будущим. Эти события суть настоящее.

Такова интерпретация точек пространства событий с позиции обсуждаемого наблюдателя. Любой иной наблюдатель будет интерпретировать ту же совокупность событий иначе, но и у него сохранится деление событий на прошлое, настоящее и будущее, и только события, относящиеся к его настоящему, будут описываться действительными числами, хотя сами события, вероятно, будут иными.

Надо сказать, что в случае классической механики и механики сплошных сред (т. е. в случае когда $s = \infty$) указанная одновременность является абсолютной. Это означает, что множество событий, образующих прошлое (будущее) для какого-либо наблюдателя, является таковым и для всех прочих одновременных с ним наблюдателей. Соответственно, у всех таких наблюдателей настоящее совпадает. Однако при $s < \infty$ (причинно-обусловленная теория) одновременность оказывается относительной, так как для разных наблюдателей пространства одновременных событий всегда различны. То же касается как прошлого, так и будущего, т. е. ни то, ни другое не является абсолютным, а у каждого наблюдателя они свои.

4.2. Физический смысл интегральных преобразований

Возможный подход к решению проблемы, описанной в п. 2.3, и лежащие в его основе мотивы иллюстрируются следующим примером, приведенным в [17].

Одномерное уравнение неразрывности и его «спектральный» аналог

Рассмотрим одномерное уравнение неразрывности. Здесь пространство событий W (т. е. пространство — время) является двумерным. Закон сохранения массы M тела записывается в виде

$$d_t M = 0. \quad (7)$$

Введя плотность массы $\rho(t, x)$, где t — время и x — пространственные декартовы координаты, запишем выражение для массы тела в виде

$$M(t) = \int_{x \in R^1} \rho(t, x) dx. \quad (8)$$

Положение жидкого тела на R^1 определяется как условие $\rho > 0$, и эйлеровы координаты множества точек, удовлетворяющих этому условию, вообще говоря, зависят от времени: $x = x(t)$.

Та же величина в терминах, не зависящих от времени лагранжевых пространственных координат $X = x(t_0)$, где t_0 — некоторый отсчетный момент времени, может быть записана следующим образом:

$$M(t) = \int_{X \in R^1} \rho(t, x(t, X)) dx(t, X) = \int_X \rho(t, X) J(t, X) dX. \quad (9)$$

Здесь $\rho(t, X) \equiv \rho(t, x(t, X))$, а $J(t, X) = \partial_x x$ — якобиан преобразования координат $(t, X) \mapsto (t, x)$, т. е. изменение элементарного объема в точке (t, x) .

Запишем теперь с помощью преобразования Фурье плотности массы в подынтегральных выражениях (9) в виде

$$\rho(t, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_k r(t, k) e^{ikx} dk, \quad \rho(t, X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_K \mathbf{r}(t, K) e^{iKX} dK, \quad (10)$$

где $r(t, k)$ и $\mathbf{r}(t, K)$ — Фурье-образы плотностей $\rho(t, x)$ и $\rho(t, X)$, выраженных в терминах координат (t, k) и (t, K) соответственно.

Подставляя последнее выражение (10) в формулу (9), получаем:

$$M = \int_X \left(J(t, X) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_K \mathbf{r}(t, K) e^{iKX} dK \right) dX = \int_K \mathbf{r}(t, K) \Upsilon(t, K) dK. \quad (11)$$

Здесь введено обозначение

$$\Upsilon(t, K) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_X J(t, X) e^{iKX} dX,$$

которое интерпретируется аналогично с якобианом $J(t, X)$ как изменение элементарного объема в точке (t, k) , т. е. как якобиан преобразования координат $(t, k) \mapsto (t, K)$, и в силу этого

$$\int_K \Upsilon(t, K) \mathbf{r}(t, K) dK = \int_k \mathbf{r}(t, k) dk = M. \quad (12)$$

Сравним выражения (8) и (12). Величина ρ — плотность массы, т. е. производная массы M по объему. Величина же r , очевидно, тоже плотность массы. Однако здесь в качестве меры, по которой вычисляется производная, выступает объем тела в области так называемых волновых чисел.

Рассмотрим снова закон сохранения (7). Подставив выражение (9) в уравнение (7), найдем:

$$d_t M = d_t \int_X \rho J dX = \int_X \frac{1}{J} d_t (\rho J) dx = 0. \quad (13)$$

И, полагая подынтегральное выражение непрерывным, получим одномерное уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{J} d_t (\rho J) = \partial_t \rho + \partial_x \rho v = 0, \quad v \equiv d_t x. \quad (14)$$

С другой стороны, подставив в уравнение (7) выражение (11), получим:

$$d_t M = d_t \int_K \Upsilon \mathbf{r} dK = \int_K \frac{1}{\Upsilon} d_t (r \Upsilon) dk = 0. \quad (15)$$

Полагая и в выражении (15) непрерывность подынтегрального выражения, получим спектральный вариант того же уравнения неразрывности:

$$\frac{1}{\Upsilon} d_t (r \Upsilon) = \partial_t r + \partial_k r v = 0. \quad (16)$$

Здесь $v \equiv d_t k$ интерпретируется как скорость изменения положения в пространстве (t, k) .

Отметим в результате следующие обстоятельства.

1. Оба уравнения неразрывности — и (14), и (16) — соответствуют одному и тому же интегральному закону сохранения массы (7).

2. Оба уравнения неразрывности — и (14), и его «спектральный» аналог (16) — совпадают с точностью до обозначений.

Для того чтобы предложить метод исследования подобных задач, можно рассмотреть дискретные варианты уравнения неразрывности, его спектрального аналога и их взаимосвязь, как это было сделано, например, в [2, 17].

5. Заключение (обсуждение)

Каков итог и что представляется важным?

Средства описания

Введение в рассмотрение «физических чисел» объясняет кажущееся очевидным, но формально произвольное требование однородности уравнений по размерности. Важными представляются как четкое различие интегральных параметров и их плотностей, так и потенциальная возможность измерения первых и принципиальная невозможность измерения вторых.

Кроме того, в процессе подготовки статьи неожиданно выяснилось, что одна часто используемая в физике математическая конструкция — скалярное произведение — вызывает непонимание. Проанализируем это понятие и его использование.

По определению скалярное произведение есть билинейная числовая функция, заданная на элементах векторного пространства. Векторное же пространство определяется (я опускаю детали) как множество с введенными на его элементах операциями сложения элементов и умножения их на числа.

Между тем во многих физических работах фигурируют конструкции, называемые скалярными произведениями самых разнообразных величин и, очевидно, принадлежащих различным векторным пространствам. Как это понимать? Очень просто: либо такая конструкция не является скалярным произведением, как в случае с экспонентой в преобразовании Фурье, либо это «закамуфлированное» скалярное произведение, что является следствием его линейности. Размерные коэффициенты маскируют «настоящее», математическое скалярное произведение. Поясню, что все это означает.

Например, плотность кинетической энергии k определяется выражением

$$k \equiv \frac{1}{2} \rho |\vec{v}|^2 = \frac{1}{2} \rho (\vec{v}, \vec{v}).$$

Квадрат модуля скорости, в свою очередь, определяется через скалярное произведение вектора скорости на себя. Здесь никакого противоречия с определением нет. Между тем, пользуясь линейностью, ту же величину можно записать иначе:

$$k = \frac{1}{2} (\rho \vec{v}, \vec{v}) = \frac{1}{2} (\vec{m}, \vec{v}),$$

где $\vec{m} \equiv \rho \vec{v}$ и называется, скажем, плотностью импульса. Здесь уже мы записали плотность кинетической энергии через скалярное произведение двух векторов, которые принадлежат разным векторным пространствам, имеют разную размерность и которые нельзя суммировать, ибо такая сумма будет лишена физического смысла. Однако легко видеть, что если дать себе труд вскрыть все физические наслоения и обнажить математическую основу, то противоречия определению скалярного произведения, скорее всего (как в данном примере), не обнаружатся.

Модификация модели явления

Модификация уже построенной модели может нарушать порядок определения искомых функций, а также порядок возможной формулировки задачи модификации модели. Рассмотренная выше стандартная модификация готовой модели приводит к необходимости осреднять все искомые функции, что чрезвычайно усложняет задачу. Напротив, модификация, проводимая путем построения новой модели «с нуля», не маскирует этап, на котором возможна постановка задачи осреднения, что ведет к цели без ненужных усложнений.

Приведенную в качестве исходной модель вязкой жидкости, в свою очередь, саму можно рассматривать как модификацию модели идеальной жидкости. Несмотря на то что на первый взгляд способы получения этих моделей различны (в случае вязкой жидкости это переопределение тензора напряжений в терминах тензора скоростей деформации, а в случае турбулентной жидкости — осреднение уравнений модели среды), по существу они могут быть сведены к одной математической процедуре, которая многократно описывалась и обсуждалась (см., например, работы [10, 11] и др.). Эта процедура — осреднение, и приводит она к тому, что движение среды разделяется по масштабам на крупномасштабное и мелкомасштабное. Каждая модель явно воспроизводит крупномасштабную (в некотором, заранее оговоренном, смысле) часть движений жидкости, тогда как мелкомасштабная часть движений описывается параметрически. Соответственно уравнения обеих моделей должны, по замыслу, описывать осредненное движение точек среды вдоль сглаженных траекторий. Они это и делают.

Однако замечательно то, что хоть разделение по масштабам производится в обоих случаях, в первом случае модификация (модели идеальной жидкости) проводится корректно и затрагивает лишь поле скорости, в соответствии с которым вычисляются остальные характеристики среды. Во втором же случае стандартное разделение движений по масштабам, как было указано, производится некорректно со всеми вытекающими последствиями.

Результат осреднения уравнения неразрывности

Скорость, записанная в виде $\vec{v} = \bar{\vec{v}} + \vec{v}'$, подставляется в уравнение неразрывности, и все уравнение осредняется:

$$\overline{\partial_t \rho + (\nabla, \rho(\vec{v} + \vec{v}'))} = 0 \Rightarrow \partial_t \bar{\rho} + (\nabla, \bar{\rho} \bar{\vec{v}}) + (\nabla, \bar{\rho} \vec{v}') = 0. \quad (17)$$

Здесь, как и ранее, чертой сверху $\bar{(\cdot)}$ обозначен оператор осреднения. Величина $\bar{\rho}$ — плотность массы, соответствующая осредненному (крупномасштабному) полю скорости $\bar{\vec{v}}$ при учете слагаемого $(\nabla, \bar{\rho} \vec{v}')$, описывающего диффузию плотности за счет мелкомасштабных флуктуаций скорости $\vec{v}'$ (см. [1]).

Следовательно, поле $\rho' = \rho - \bar{\rho}$ описывает отклонение поля плотности массы ρ , соответствующего полю скорости $\vec{v}$, от поля $\bar{\rho}$. Отсюда имеем

$$\overline{\rho \vec{v}} = \overline{(\bar{\rho} + \rho') \vec{v}} = \bar{\rho} \vec{v}, \quad (18)$$

где $\overline{\rho' \vec{v}}$ — плотность диффузионного потока массы. Если для полученного слагаемого использовать градиентную гипотезу, то

$$\overline{\rho' \vec{v}} \equiv -\mu_p \nabla \bar{\rho}. \quad (19)$$

Здесь μ_p — коэффициент диффузии плотности массы.

Теперь уравнение (17) с учетом выражения (18) может быть записано в виде

$$\partial_t \bar{\rho} + (\nabla, \bar{\rho} \vec{v}) + (\nabla, \overline{\rho' \vec{v}}) = 0 \quad (20)$$

либо

$$\delta_t \bar{\rho} + \bar{\rho} (\nabla, \vec{v}) + (\nabla, \overline{\rho' \vec{v}}) = 0, \quad (21)$$

где $\delta_t(\cdot) \equiv \partial_t(\cdot) + (\vec{v}, \nabla)(\cdot)$ отличается от $d_t(\cdot) \equiv \partial_t(\cdot) + (\vec{v}, \nabla)(\cdot)$ скоростью переноса. С учетом (19) уравнение (20) запишется в виде уравнения диффузии плотности:

$$\partial_t \bar{\rho} + (\nabla, \bar{\rho} \vec{v}) = (\nabla, \mu_p \nabla \bar{\rho}). \quad (22)$$

Если считать $\mu_p = \text{const}$, то правая часть уравнения (22) равна $\mu_p \Delta \bar{\rho}$.

В стандартном случае классической гидромеханики диффузией плотности, как правило, пренебрегают, т. е. полагают $\overline{\rho' \vec{v}} = 0$, и осредненное уравнение неразрывности записывают в виде

$$\partial_t \bar{\rho} + (\nabla, \bar{\rho} \vec{v}) = 0 \quad \text{или} \quad \delta_t \bar{\rho} + \bar{\rho} (\nabla, \vec{v}) = 0. \quad (23)$$

Уравнение (23) с точностью до обозначений совпадает с исходным уравнением неразрывности (см. табл. 2). Оно описывает поле плотности массы $\bar{\rho}$, соответствующее осредненному полю скорости $\vec{v}$.

В общем случае поля плотности массы, соответствующие различным полям скорости, описываются следующими уравнениями неразрывности, представленными в табл. 3.

Таблица 3

Плотность массы и уравнение неразрывности для различных полей скорости
Mass density and the continuity equation which correspond to different velocity fields

Скорость	Плотность	Уравнения неразрывности и условия несжимаемости		Учитываемые движения
$\vec{v}$	ρ	$d_t \rho + \rho(\nabla, \vec{v}) = 0$	$(\nabla, \vec{v}) = 0$	Все масштабы
$(\vec{v} + \vec{v}')$	$\bar{\rho}$	$\delta_t \bar{\rho} + \bar{\rho}(\nabla, \vec{v}) + (\nabla, \overline{\rho' \vec{v}}) = 0$	$(\nabla, \vec{v}) = 0$	Осредненные + диффузия
$\vec{v}$	$\bar{\rho}$	$\delta_t \bar{\rho} + \bar{\rho}(\nabla, \vec{v}) = 0$	$(\nabla, \vec{v}) = 0$	Осредненные без диффузии

Из общих соображений следует, что наиболее адекватным является уравнение неразрывности, учитывающее диффузию массы. В настоящее время, однако, это уравнение редко используется в приложениях (пример использования можно найти в [18]). Вместе с тем нужно иметь в виду, что часто применяемое приближение несжимаемой жидкости связано с разными уравнениями — в зависимости от используемого уравнения неразрывности, и всем этим уравнениям соответствует своя плотность массы, как показано в табл. 3.

Что означает термин «несжимаемость среды»?

Обозначая через J якобиан преобразования лагранжевых переменных в эйлеровы, определим несжимаемость равенством $d_t J = 0$. Отсюда, пользуясь уравнением неразрывности, записанным в терминах лагранжевых координат $d_t(\rho J) = 0$, получим цепочку следствий:

$$d_t(\rho J) = 0 \Rightarrow \frac{1}{J} d_t J = -\frac{1}{\rho} d_t \rho \stackrel{d_t J = 0}{\Rightarrow} \underbrace{d_t \rho = 0}_{(a)} \Rightarrow \underbrace{(\nabla, \vec{v}) = 0}_{(b)}.$$

Оба выражения — (a) и (b) — являются признаками несжимаемости среды, записанными в терминах плотности массы и скорости. Поскольку движение далее разделяется по масштабам и уравнения осредняются, изменяется также и смысл плотности массы (изменяются уравнения, описывающие это свойство). Признаки несжимаемости в новых терминах запишутся иначе. Осреднив выражение (b) в вышеприведенной цепочке, получим вариант записи условия несжимаемости:

$$0 = \overline{(\nabla, \vec{v})} = \overline{(\nabla, \vec{\bar{v}} + \vec{v'})} = (\nabla, \vec{\bar{v}}). \quad (24)$$

Из выражений (21) и (24) получим эквивалентное условие несжимаемости:

$$\delta_t \bar{\rho} + (\nabla, \bar{\rho'} \vec{v'}) = 0. \quad (25)$$

В свою очередь, если пренебречь диффузией плотности, т. е. положить $\overline{\rho' \vec{v}} = 0$, то условие несжимаемости примет вид $\delta_t \bar{\rho} = 0$. Таким образом, стандартное условие несжимаемости эквивалентно бездивергентности поля скорости лишь в пренебрежении диффузией плотности. Если диффузия плотности принимается в расчет, то исходное условие несжимаемости в результате осреднения приводит к бездивергентному полю скорости сжимаемой жидкости (см. табл. 3).

Физический смысл этапов построения модели

Если обсуждается математическая модель физического явления, то наличие внятной физической интерпретации каждого этапа ее построения является необходимым признаком правильности проведенных рассуждений. Отсутствие такой интерпретации означает ошибку интерпретации либо текущего, либо какого-то из предыдущих этапов. Из двух приведенных примеров первый (см. п. 4.1) выглядит

наиболее очевидным: все, что происходит не сейчас, не может считаться реальным. Второй пример (см. п. 4.2) не столь очевиден. Однако если предварительно рассмотреть дискретный аналог, как это было сделано в [2, 17], то интерпретация интегральных преобразований как замены базисных векторов соответствующего векторного пространства напрашивается (см., например, [19]). Тем более что такая интерпретация позволяет непротиворечиво истолковать конструкции в показателе экспоненты многомерного преобразования Фурье.

Благодарности

Я благодарен коллегам Н.Е. Вольцингеру и А.Я. Гольмштоку за полезные дискуссии и критику.

Работа выполнена в рамках темы № 0149-2019-0015 Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Acknowledgments

I am grateful to my colleagues Dr. A. Holmstock and N. Volzinger for helpful discussions and valuable comments.

This research was carried out in the framework of the theme 0149-2019-0015 of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Список литературы

1. Белевич М.Ю. Связь уравнений неразрывности и диффузии плотности // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 1. С. 73—82.
2. Belevich M. On physical limitations of mathematical constructions used in mathematical models // Pramana – J. Phys. 2019. 93: 33. <https://doi.org/10.1007/s12043-019-1788-1>
3. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1968.
4. Шварц Л. Анализ. Т. 1 / Пер. с франц. М., Мир, 1972. 824 с.
5. Захаров В.Е. Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости // ПМТФ. 1968. № 2. С. 86—94.
6. Юэн Г., Лейк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 179 с.
7. Рихтмайер Р. Принципы современной математической физики. Т. 1 / Пер. с англ. М., Мир, 1982, 488 с.
8. Bochner S., Chandrasekharan K. Fourier transforms. Princeton Univ. Press, 1949.
9. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1968.
10. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория / Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963. 680 с.
11. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. 641 с.
12. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / Пер. с англ. М.: Мир, 1975.
13. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1963.
14. Шутц Б. Геометрические методы математической физики / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 304 с.
15. Паули В. Теория относительности / Пер. с англ. М.: Наука, 1991. 328 с.
16. Belevich M. Causal description of non-relativistic dissipative fluid motion // Acta Mechanica. 2003. V. 161 P. 65—80. <https://doi.org/10.1007/s00707-002-0983-0>
17. Белевич М.Ю. О спектральной форме уравнений гидромеханики // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 37. С. 44—53; 2015. № 38. С. 59—65; 2015. № 40. С. 81—95.

18. Елизарова Т.Г., Шеретов Ю.В. Теоретическое и численное исследование квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 2. С. 239—255.
19. Wolf K. Integral Transforms in Science and Engineering. Plenum Press, 1979.

References

1. Belevich M.Yu. Relationship between the continuity equation and the mass density diffusion equation. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. Fundamental and applied hydrophysics, 2016, 1(9):73–82. [In Russian].
2. Belevich M. On physical limitations of mathematical constructions used in mathematical models. *Pramana – J. Phys.*, 2019, 93: 33. <https://doi.org/10.1007/s12043-019-1788-1>
3. Kolmogorov A.N. and S.V. Fomin. Introductory Real Analysis. New York, Dover Publications, 1975.
4. Schwartz L. *Analyse Mathématique*. V. 1. Hermann, 1967.
5. Zakharov V.E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1972, 9(2): 190–194.
6. Yuen H.C. and B.M. Lake. Nonlinear dynamics of deep-water gravity waves. *Advances in Applied Mechanics*, 1982, 22: 67–229.
7. Richtmyer, R.D. Principles of Advanced Mathematical Physics, vol.1. Springer-Verlag N.Y. 1978.
8. Bochner S., Chandrasekharan K. Fourier transforms. Princeton Univ. Press, 1949.
9. Kurosh A.G. Lectures on General Algebra. New York, 1963, 335 p.
10. Hinze J.O. Turbulence. An Introduction to its mechanism and theory. McGraw-Hill N.Y. 1959.
11. Monin A.S. and A.M. Yaglom. Statistical Fluid Mechanics. V. 1. MIT Press, Cambridge, 1971.
12. Truesdell C. First Course in Rational Continuum Mechanics. Academic Press, 1977.
13. Serrin J. Mathematical principles of classical fluid mechanics. *Handbuch der Physik*, Bd VIII/1. Springer Verlag, 1959: 125–263.
14. Schutz, B.F. Geometrical Methods of Mathematical Physics. Cambridge: Cambridge University Press 1980. 250 p.
15. Pauli W. Theory of relativity. New York: Pergamon, 1958.
16. Belevich M. Causal description of non-relativistic dissipative fluid motion, *Acta Mechanica*. 2003, 161: 65–80. <https://doi.org/10.1007/s00707-002-0983-0>
17. Belevich M. On the spectral form of the Fluid Mechanics equations. *Uchonye Zapiski RGGMU*, 2014, 37: 44–53; 2015, 38: 59–65; 2015, 40: 81–95 [in Russian].
18. Elizarova T.G. and Sheretov Yu.V. Theoretical and numerical investigation of quasigasdynamic and quasihydrodynamic equations. *J. of Comput. Mathem. and Mathem. Phys.* 2001, 41: 219–234.
19. Wolf K. Integral Transforms in Science and Engineering. Plenum Press, 1979.

Статья поступила 28.02.2020

Принята после доработки к публикации 06.05.2020

Информация об авторе

Белевич Михаил Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института океанологии РАН им. П.П. Ширишова, доцент кафедры прикладной океанографии Российского государственного гидрометеорологического университета; e-mail: mbelevich@ioras.nw.ru, mbelevich@yahoo.com

Information about the author

Belevich Michael, PhD, Leading Research Associate, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Lab. of Geophys. Boundary Layers; Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University, Chair of Applied Oceanography.

Влияние метрик на определение точек бифуркации во временных рядах метеорологических величин

А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
kuznetsov1946@inbox.ru

Исследовано влияние вида метрики и способа задания «разделяющего» полинома на результаты нахождения точек бифуркации во временных рядах метеорологических величин. В качестве индикатора для определения положения точки бифуркации использовались полиномы от нулевой до третьей степени. В качестве метрик, позволяющих определить оптимальное положение этих полиномов внутри исследуемого временного ряда, были рассмотрены следующие: среднеквадратическое отклонение, евклидова метрика, манхеттенское и относительное расстояние.

Апробация предложенного алгоритма выполнена на временных рядах мгновенной и осредненной температуры воздуха и атмосферного давления. Установлено, что для рассмотренных временных рядов наилучшие результаты дает использование в качестве метрики манхеттенского расстояния.

Ключевые слова: временные ряды метеорологических величин, анализ временных рядов, временной тренд, метрики, точки бифуркации.

Influence of metrics on determination of bifurcation points in time series of meteorological values

A.D.Kuznetsov, O.S. Seroukhova, T.E. Simakina

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The influence of a metric kind and a method of setting the "dividing" polynomial on the results of finding bifurcation points in time series of meteorological values has been studied. The bifurcation point reflects the moment of change of the established system mode, caused by a significant change in the factors that generate the process under study. This article searches for a moment when the direction of the process changes in the time series of measurement data as the boundary between local trends. Zero to third degree polynomials have served as an indicator for determining the position of the bifurcation point. As the metrics allowing to determine the optimal position of these polynomials within the time series under investigation the following ones have been considered: standard deviation, Euclidean metric, Manhattan and relative distance. The statistical significance of the split is checked using the Fischer test.

The proposed algorithm has been tested on time series of instantaneous and averaged air temperature and atmospheric pressure. The degree of the initial variation unexplained by the model is used as an estimate of the approximation accuracy. The use of Manhattan distance as a metric has been found to be the best for the time series considered.

The approach proposed in this paper can be applied in the future, in particular, when determining the start time of climate change in different regions of our planet.

Keywords: time series of meteorological values, time series analysis, time trend, metrics, bifurcation points.

For citation: *A.D. Kuznetsov, O.S. Seroukhova, T.E. Simakina. Influence of Metrics on Determination of Bifurcation Points in Time Series of Meteorological Values. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 28—40. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-28-40*

Введение

В настоящее время существует большое число работ, посвященных исследованию временных рядов с помощью рассмотрения «поведения» трендов на отдельных участках такого ряда [5—12]. В частности, это работы, посвященные изменениям климата Земли как в далеком прошлом, так и в настоящее время.

Однако задача оптимального построения нескольких трендов на заданном отрезке временного ряда в силу целого ряда объективных причин не имеет однозначного решения. Во-первых, по одному и тому же набору данных можно построить бесконечное множество трендов. Во-вторых, если предполагается, что за рассматриваемый период происходило нескольких разветвлений в характере временного процесса, то конкретный вид трендов во многом будет зависеть от выбора моментов времени, определяющих разделение на исследуемом отрезке временного ряда на интервалы, на которых сохранялась устойчивая тенденция динамики процесса [2, 5].

Разделение временного ряда на отдельные участки — это процесс нахождения точек бифуркации (ТБ): $t_{\text{ТБ}}$ [5, 8, 9]. В общем случае бифуркация — это разветвление, раздвоение. В наиболее близкой для нас теории колебаний бифуркация — это перестройка характера движения реальной системы. Тогда точка бифуркации представляет собой смену установившегося режима работы системы. Применительно к анализу трендов временного ряда под точкой бифуркации мы будем понимать смену (границу) между локальными линейными трендами, т. е. точку, в которой происходит изменение направленности процесса.

Примерами наличия точки бифуркации в природных процессах является разделение процесса накопления снега на склоне и момента схода лавины; временной ход приземной температуры воздуха при изменении режима инсоляции и др. В то же время определение положения точек бифуркации позволяет определить момент, когда факторы, определяющие временной процесс, изменяются. Корректное определение таких моментов представляет как научный, так и практический интерес.

Схематично ситуация наличия точки бифуркации изображена на рис. 1 [9, 10]. Здесь отчетливо проявляются временные флуктуации параметра y , и в то же время визуально видно разделение описываемого временным рядом процесса на значения левее отмеченной точки бифуркации (линия 1) и правее этой временной точки (линия 2). Этот же пример показывает, что в случае игнорирования наличия точки бифуркации описание временного процесса с помощью общего тренда (линия 3) приводит к «вымыванию» того факта, что в данном временном ряду был момент, когда существенно изменились факторы, его порождающие. Кроме того, из анализа рис. 1 следует неоднозначность в определении точки бифуркации из-за наличия

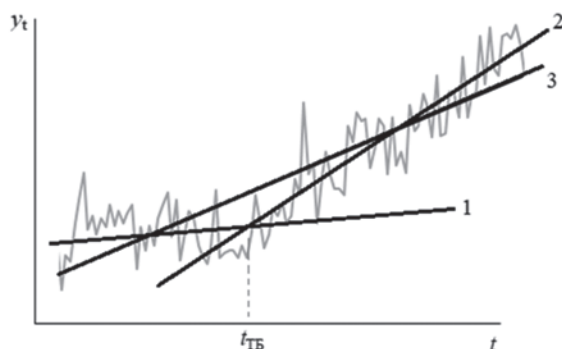


Рис. 1. Изменение характера тенденции временного ряда.

1 — тренд первого участка ряда, 2 — тренд второго участка ряда, 3 — тренд всего ряда.

Fig. 1. Changing the nature of a time series trend.

1 — the trend of the first section of the row, 2 — the trend of the second section of the row,
3 — the trend of the entire series.

флуктуаций. Поскольку флуктуации всегда присутствуют, то этот момент также следует учитывать. Пример анализа влияния флуктуаций на определение положения точки бифуркации рассмотрен в работе [5].

Для определения положения точек бифуркации в данной работе использовано построение семейства временных трендов, наилучшим образом (с точки зрения используемых метрик) описывающих заданный отрезок временного ряда. Основная цель данной работы — апробировать предложенный алгоритм и на конкретных примерах показать наличие целого ансамбля результатов при использовании различных полиномов и метрик. При этом используемые временные ряды служат только для иллюстрации полученных результатов. Рассматривается построение статистической модели и апробация ее успешности с использованием количественных критериев на фактических и модельных временных рядах метеорологических величин. Предложенный в данной работе подход в дальнейшем может быть применен, например, при определении моментов времени, когда начались климатические изменения в различных регионах нашей планеты, или при ответе на вопрос, что стало увеличиваться раньше: выбросы углекислого газа или температура воздуха [5, 12].

Алгоритм поиска точек бифуркации

Как и в работе [5], в основе исследования алгоритма определения положения точек бифуркации внутри временного ряда лежит сравнение между собой разных отрезков такого ряда с их статистической моделью. В качестве моделей в данной работе, как и в работе [6], рассматриваются полиномы разных степеней (обозначим M как степень полинома), начиная от полинома нулевой степени. Для количественной оценки «близости» временного ряда и его модели могут быть использованы различные метрики, число которых в данной работе ограничено четырьмя [5, 13].

Определение положения точек бифуркации включает последовательное выполнение следующих этапов:

- выбор числа ТБ (B), которое будет определяться в данном временном ряду;
- выбор статистической модели для всех $(B + 1)$ отрезков временного ряда — в данной работе это определение степени аппроксимирующего полинома M ;
- выбор вида метрики, используемой для количественной оценки близости элементов каждого из $(B + 1)$ отрезка временного ряда с их моделью;
- формирование на основе прямого перебора внутри временного ряда $(B + 1)$ отрезков разной длины: в зависимости от степени полинома минимальная длина отрезка не может быть меньше $(M + 1)$;
- оценка успешности каждого такого разбиения с помощью выбранной метрики;
- по минимуму суммы метрик для $(B + 1)$ отрезков временного ряда определение оптимального разбиения и, соответственно, нахождение потенциальных положений точек бифуркации;
- проверка статистической значимости разбиения с помощью критерия Фишера.

Как видно из рассмотрения перечисленных этапов, весь процесс нахождения положения точек бифуркации во многом носит субъективный характер и, следовательно, зависит от опыта и квалификации исследователя. Однако это не умаляет важности данного этапа анализа свойств временных рядов, так как открывает новые возможности в интерпретации описываемых этими рядами процессов как в прошлом, так и в будущем (в построении прогнозов).

Алгоритм определения положения одной точки бифуркации ($B = 1$) с использованием полиномов нулевой ($M = 0$) и первой ($M = 1$) степени детально рассмотрен в работе [5] для случая, когда в качестве метрики используется сумма среднеквадратических отклонений значений временного ряда от соответствующих им значений статистической модели. В данной работе число используемых метрик расширено до четырех, а степень используемых полиномов меняется от нуля до трех.

Обозначим значения временного ряда из n значений как вектор $\mathbf{x}$, а соответствующие им значения модели как $\mathbf{y}$. Тогда используемые метрики, позволяющие количественно оценить расстояние между отрезками временного ряда и соответствующими значениями математической модели, можно записать следующим образом [5, 13]:

среднеквадратичное отклонение (СКО)

$$\rho_{\text{ско}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, n) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (1)$$

стандартная евклидова метрика (СЕМ)

$$\rho_{\text{Е}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (2)$$

манхеттенское расстояние (MP)

$$\rho_M(\mathbf{x}, \mathbf{y}, n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (3)$$

относительное расстояние (OP)

$$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i + y_i|} \quad (4)$$

при $|x_i + y_i| \neq 0$.

Рассмотрим случай, когда ряд делится на два отрезка. Метрики, определяемые соотношениями (1) — (4), вычисляются для двух отрезков временного ряда: $(1 - n_1)$ и $((n_1 + 1) - n)$. Суммарное «расстояние» двух отрезков временного ряда от его математической модели будет определяться в виде

$$SS(n_1) = \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, n_1) + \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, n - n_1). \quad (5)$$

Для поиска точки бифуркации внутри исследуемого временного ряда необходимо последовательно произвести расчет всех значений параметра $SS(n_i)$, где $i = 1 + M, 2 + M, \dots, n - M$. Таким образом, точка бифуркации будет определяться положением экстремума параметра $SS(n_i)$, т. е. значением n_i , при котором параметр SS будет иметь минимум. Иллюстрация изменения параметра SS в процессе перемещения предполагаемой точки бифуркации n_i от $i = 1$ до $i = 43$ ($M = 0$) представлена на рис. 2. В рассматриваемом примере в качестве положения точки бифуркации будет выбран момент времени, соответствующий 21-му порядковому номеру измерения в исследуемом временном ряду.

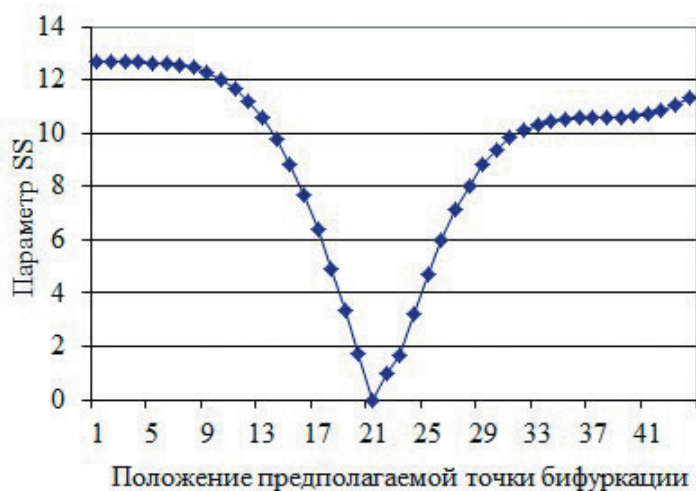


Рис. 2. Пример поиска ТБ по значению параметра SS.

Fig. 2. Example of TB search by SS value.

Для количественной оценки «эффективности» произведенного разделения ряда на отрезки можно использовать сравнение значений среднеквадратического отклонения для всего ряда $\sigma_{\text{ряда}}$, когда его временной тренд определяется полиномом степени M , и суммарного среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{ступ}}$ его отрезков. В случае двух отрезков суммарное среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле [5]

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 \cdot n_1 + \sigma_2^2 \cdot (n - n_1)}{(n - 1)}}, \quad (6)$$

где n — общая длина временного ряда; n_1 и $(n - n_1)$ — длина соответственно первого и второго отрезков ряда, разделенных точкой бифуркации; σ_1 и σ_2 — среднеквадратические отклонения значений фактического временного ряда от модельных, построенных полиномами заданной степени для двух отрезков соответственно.

Для оценки значимости проведенного разделения следует сравнить значение критерия Фишера

$$F = \frac{\sigma_{\text{ряда}}^2}{\sigma_{\text{ступ}}^2} \quad (7)$$

с критическим его значением $F_{\text{кр}}$. Если выполняется неравенство $F > F_{\text{кр}}$, то будем считать, что проведенное разделение статистически значимо с заданной при определении $F_{\text{кр}}$ доверительной вероятностью α .

Апробация алгоритма

Для проведения исследования влияния вида метрики и степени аппроксимирующего временной тренд полинома на результат определения положения точки бифуркации использовались временные ряды, описывающие изменчивость температуры воздуха и атмосферного давления в различных временных масштабах.

Типичные результаты, полученные при аппроксимации двух отрезков временных рядов с помощью различных метрик (формулы (1) — (6)), приведены на рис. 3—5.

Первый исследуемый ряд — фрагмент суточного хода температуры воздуха, состоящий из данных 98 измерений с интервалом 15 мин, представлен на рис. 3. Среднеквадратическое отклонение ряда составляет 1,19 °С, средняя температура –2,93 °С (ряд 1) [14]. С учетом анализа суточного хода температуры воздуха в данном случае фактической ТБ может служить отсчет № 34, а представленные на рис. 3 графики показывают, насколько положение ТБ может варьировать в зависимости от выбранной метрики и степени аппроксимирующего полинома.

Второй ряд (ряд 2), представленный на рис. 4, — временной ход атмосферного давления (среднее значение 1007,22 гПа, среднеквадратическое отклонение 5,78 гПа, число измерений 1010, интервал измерений 15 мин) [14]. С учетом проведенного анализа моментом смены характера протекающего синоптического процесса должен служить отсчет № 775.

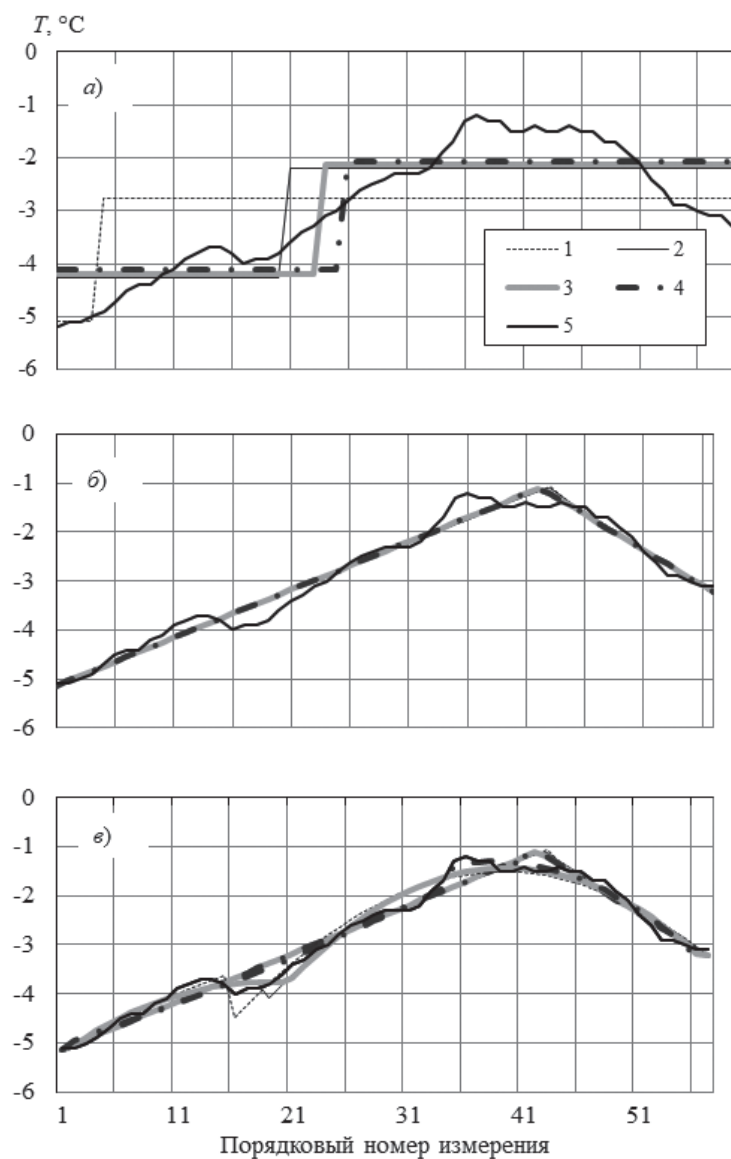


Рис. 3. Временные ряды мгновенных значений температуры и модели, полученные с помощью четырех метрик.

a — нулевая степень полинома, $б$ — первая, $в$ — вторая.
 1 — СКО, 2 — СЕМ, 3 — МР, 4 — ОР, 5 — фактический ряд.

Fig. 3. Time series of instantaneous values of temperature and models obtained using four metrics.

a — zero, $б$ — first, $в$ — second degrees.
 1 — СКО, 2 — СЕМ, 3 — МР, 4 — ОР, 5 — the actual number.

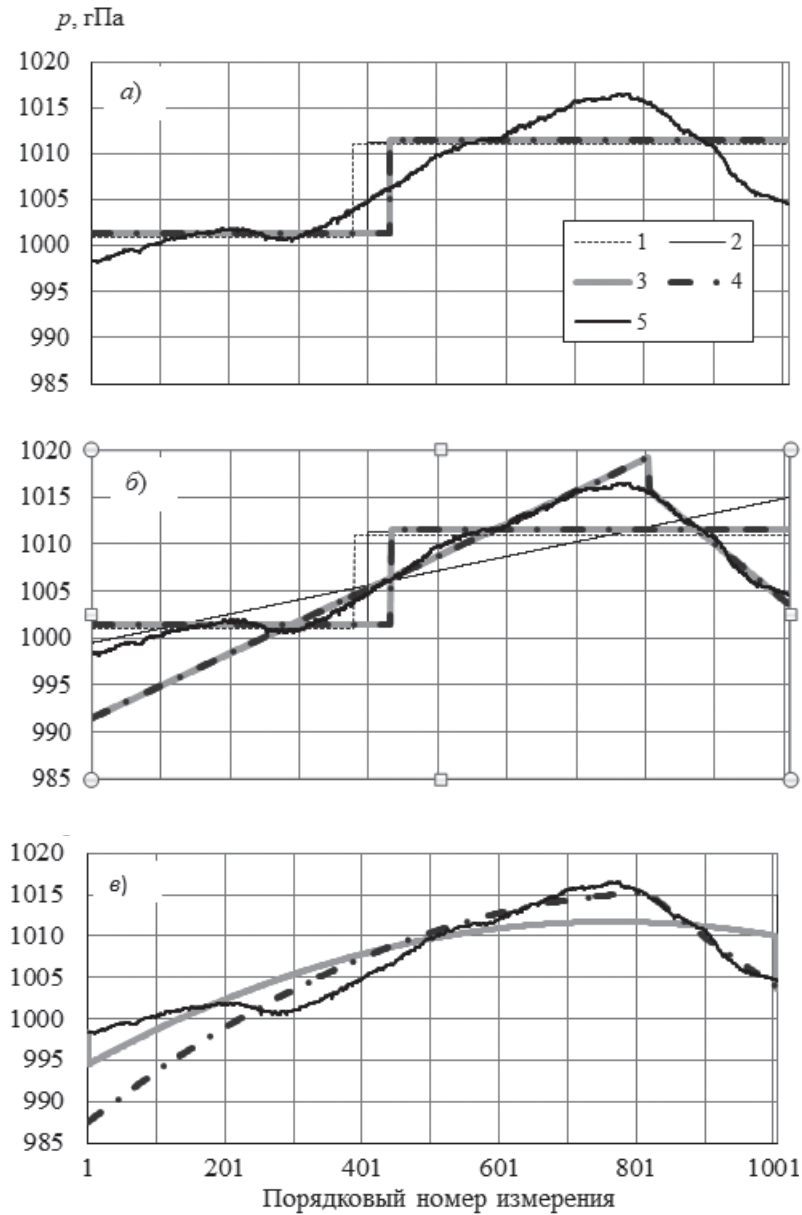


Рис. 4. Временные ряды давления и модели, полученные с помощью четырех метрик.

a — нулевая степень полинома, b — первая, c — вторая.
 1 — СКО, 2 — СЕМ, 3 — МР, 4 — ОР, 5 — фактический ряд.

Fig. 4. Pressure time series and models obtained using four metrics.

a — zero, b — first, c — second degrees.
 1 — СКО, 2 — СЕМ, 3 — МР, 4 — ОР, 5 — the actual number.

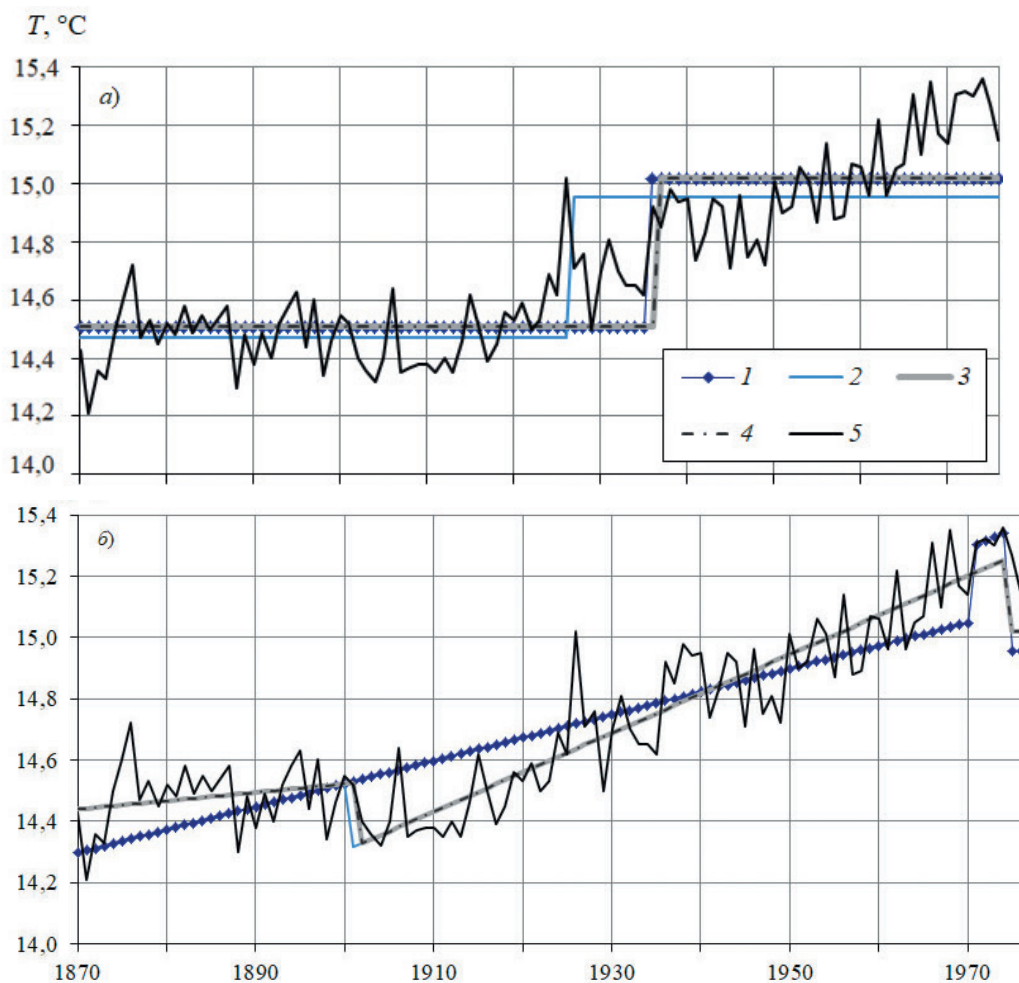


Рис. 5. Временные ряды модельной климатической температуры воздуха и модели, полученные с помощью четырех метрик.

a — полином нулевой степени, b — полином первой степени.

1 — СКО, 2 — СЕМ, 3 — МР, 4 — ОР, 5 — фактический ряд.

Fig. 5. Time series of climatic air temperature and models obtained using four metrics.

a — zero, b — first degrees.

1 — СКО, 2 — СЕМ, 3 — МР, 4 — ОР, 5 — the actual number.

Кроме того, несомненно, интересный по своим результатам модельный климатический ряд, имитирующий изменение глобальной температуры воздуха с 1870 по 1980 г. с шагом в 1 год (ряд 3), [12] представлен на рис. 5 (средняя температура 14,7 $^{\circ}\text{C}$, среднеквадратическое отклонение ряда 0,29 $^{\circ}\text{C}$). Точкой бифуркации является 1909 г., когда скорость повышения температуры заметно увеличилась.

Значения среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{ступ}}$ аппроксимации отрезков слева и справа от точки бифуркации для трех рядов при использовании полиномов разных степеней и четырех метрик представлены в табл. 1. Также в таблице для каждого случая приведены порядковые номера, определяющие положение точек бифуркации в рассматриваемых рядах температуры и давления воздуха, рассчитанный критерий Фишера F (см. формулу (7)) и его критическое значение при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Во всех случаях (кроме одного) выполняется неравенство $F > F_{\text{кр}}$, т. е. проведенное разделение статистически значимо.

Таблица 1

Расчетное значение критерия Фишера и
соответствующее ему положение точки бифуркации, разделенные косой чертой
Calculation of Fisher 's criterion
and its corresponding bifurcation point position separated by slash

Метрика	Степень полинома	Ряд 1	Ряд 2	Ряд 3
СЕМ	0	3,25/21	3,76/401	3,29/1936
	1	32,11/44	2,48/2	6,95/1902
	2	55,32/20	3,97/30	6,95/1974
	3	98,34/18	26,16/4	6,95/1873
СКО	0	1,26/4	3,5/379	3,29/1926
	1	32,11/44	2,48/2	4,29/1971
	2	39,23/16	4,0/3	4,29/1974
	3	39,23/4	26,16/4	6,95/1873
МР	0	3,57/23	4,0/433	3,74/1936
	1	35,40/43	5,06/807	6,95/1902
	2	62,94/21	3,97/3	6,95/1976
	3	117,03/18	26,16/4	8,41/1976
ОР	0	3,25/25	3,76/433	6,95/1936
	1	32,11/43	2,48/807	6,95/1902
	2	55,32/35	3,97/3	8,41/1976
	3	98,34/39	26,16/4	6,95/1976

Примечание. Ряд 1: $\sigma_{\text{ряда}} = 1,19$ °C, $F_{\text{кр}} = 1,55$, ТБ = 34; ряд 2: $\sigma_{\text{ряда}} = 5,78$ °C, $F_{\text{кр}} = 1,11$, ТБ = 775; ряд 3: $\sigma_{\text{ряда}} = 0,29$ °C, $F_{\text{кр}} = 1,37$, ТБ = 1909 г.

Из таблицы видно, что результаты работы алгоритма сильно различаются в зависимости от метрики и степени полинома. Если в качестве оценки точности аппроксимации принять степень необъясненной моделью исходной вариации $\sigma_{\text{ступ}}^2 / \sigma_{\text{ряда}}^2$, выраженную в процентах, то можно сказать следующее. Наибольшие ошибки получены при аппроксимации полиномом нулевой степени с использованием всех метрик. Типичные значения $\sigma_{\text{ступ}}^2 / \sigma_{\text{ряда}}^2$ в этом случае составляют 30 %.

Повышение степени полинома заметнее всего сказывается на аппроксимации ряда I — фрагмента суточного хода температуры воздуха; типичные значения $\sigma_{\text{ступ}}^2 / \sigma_{\text{ряда}}^2$ здесь составляют 1—3 %. Наилучшим с точки зрения локализации ТБ

в этом ряду оказался полином 2-й степени при использовании метрики относительного расстояния.

Ряд давления точнее всего аппроксимирован полиномом 3-й степени — ошибка составила 4 % независимо от используемой метрики. Однако минимальным расхождение в положении ТБ оказалось при использовании полинома 1-й степени и двух метрик: манхэттенское расстояние и относительное расстояние.

Самой низкой точность оказалась при аппроксимации модельной температуры. При использовании полинома 2-й степени с метрикой манхэттенское расстояние и полинома 3-й степени с метрикой относительное расстояние значение $\sigma^2_{\text{ступ}}/\sigma^2_{\text{ряда}}$ составило 12 %. Ближайшее местоположение ТБ к 1909 г. также получено при использовании этих метрик, однако с полиномами 1-й степени.

Заключение

Анализ полученного материала позволяет рекомендовать для реализации процесса определения положения точки бифуркации использование полиномов степеней от 1-й до 3-й и двух метрик: манхэттенское расстояние и относительное расстояние.

В то же время, как это часто бывает при попытке найти универсальный алгоритм на все возможные на практике случаи, предоставление одного строго регламентированного применения данного алгоритма не представляется возможным. Однако это не умаляет его практической ценности, так как проведение серии расчетов с различными метриками и степенями использованных полиномов дает исследователю богатый материал для более детального анализа тех процессов, которые определяют тот или иной временной ряд.

Проведенное исследование показало, что предложенный подход позволяет в определенной степени автоматизировать процесс определения положения точки бифуркации. В будущем авторы планируют обобщить предложенный подход для нахождения нескольких точек бифуркации внутри исследуемого ряда.

Список литературы

1. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд-во РГГМУ, 2008. 407 с.
2. *Ефременко Д.С., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С.* Об одном алгоритме выявления локальных трендов при анализе метеорологических временных рядов // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 132—141.
3. *Губанов В.А.* Выделение тренда из временных рядов макроэкономических показателей // Научные труды Института народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2005. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-trenda-iz-vremennyh-ryadov-makroekonomicheskikh-pokazateley> (дата обращения: 26.02.2020).
4. *Алдошкина Е.С., Кузнецов А.Д., Пугачев А.А., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Чукин В.В.* Опыт использования аппарата нейронных сетей для анализа и прогноза временного ряда температуры воздуха // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 11. С. 91—100.
5. *Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Алгоритмы поиска момента смены тренда во временных рядах метеорологических величин // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 3. С. 74—89.

6. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. К вопросу о выделении аддитивных составляющих временного ряда приземной температуры воздуха // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 32. С. 55—65.
7. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Текущее прогнозирование экологических измерений на основе поиска аналогов / В сб.: Доклады XI Научно-прикладной международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли». Санкт-Петербург, 16—18 октября 2018 г. СПб: Астерион, 2018. С. 84—92.
8. Зулпукаров М.-Г.М., Малинецкий Г.Г., Подлазов А.В. Пример решения обратной задачи теории бифуркаций в динамической системе с шумом // Изв. Вузов. ПНД. 2005. Т. 13, № 5—6.
9. Анищенко В.С., Вадивасона Т.Е. Лекции по нелинейной динамике. Учеб. пособие для вузов, Ижевск: изд-во НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 516 с.
10. Сажин Ю.В., Иванова И.А. Эконометрика. Учебник. Саранск: изд-во Мордов. гос. ун-та 2014. 316 с.
11. Ричард Т. Количественные методы анализа хозяйственной деятельности / Пер. с англ. М.: Дело и Сервис, 1999. 432 с.
12. Логинов В.Ф., Микушкина В.С. Изменение климата: тренды, циклы, паузы. Минск: Беларуская навука, 2017. 179 с.
13. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Оценка возможностей метода аналогов для текущего прогноза температуры воздуха // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2019. № 1 (58). С. 101—116.
14. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции. Часть 2. Цифровая обработка данных автоматических метеорологических станций. Практикум. СПб: РГГМУ, 2016. 99 с.

References

1. Malinin V.N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii*. Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2008. 408 p. [In Russian].
2. Efremenko D.S., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S. About one algorithm for identifying local trends in the analysis of meteorological time series. *Uchenye Zapiski RGGMU*. Scientific notes RSHU. 2016, 45: 132-141. [In Russian].
3. Gubanov V.A. Isolation of a trend from the time series of macroeconomic indicators. Scientific works of Institute of Economic Forecasting RAS. *Nauchnyye trudy Instituta arodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN*. 2005, 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-trenda-iz-vremennyh-ryadov-makroekonomicheskikh-pokazateley> (accessed: 02.26.2020). [In Russian].
4. Aldoshkina E.S., Kuznetsov A.D., Pugachev A.A., Seroukhova O.S., Simakina T.E., Chukin V.V. The experience of using the apparatus of neural networks for analysis and forecasting the time series of air temperature. *Uchenye Zapiski RGGMU*. Scientific notes RSHU 2009, 11: 91-100. [In Russian].
5. Kuznetsov A.D., Saenko A.G., Seroukhova O.S., Simakina T.E. Algorithms for finding the moment of a trend change in the time series of meteorological variables. *Vestnik TvGU*. Bulletin of the Tver State University. Series: Applied Mathematics. 2019, 3: 74-89. [In Russian].
6. Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E. On the issue of highlighting the additive components of the time series of surface air temperature. *Uchenye Zapiski RGGMU*. Scientific notes RSHU. 2013, 32: 55—65. [In Russian].
7. Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E. Current forecasting of environmental measurements based on the search for analogues. *Materialy Konferencii*. Collection of reports of the XI scientifically-applied international conference “Natural and anthropogenic aerosols” in St. Petersburg, October 16-18, 2018. St. Petersburg: Asterion, 2018: 84-92. [In Russian].
8. Zulpukarov M.-G.M., Malinetskiy G.G., Podlazov A.V. An example of solving the inverse problem of bifurcation theory in a dynamical system with noise. *Izv. Universit. PND*. 2005, 13, 5. [In Russian].
9. Anisichenko V.S., Vadivasona T.E. Lectures on nonlinear dynamics. Textbook manual for universities. *Lektsii po nelineynoy dinamike*. Izhevsk: Publishing House of the Scientific and Research Center “Regular and chaotic dynamics”, 2011. 516 p. [In Russian].

10. Sazhin Yu.V., Ivanova I.A. Econometrics. Textbook. *Ekonometrika*. Mordovian State University Publishing House, 2014: 316 p. [In Russian].
11. Richard T. Quantitative methods of analysis of economic activity. *Kolichestvennyye metody analiza khozyaystvennoy deyatel'nosti*. Izv. Universit. PND. 1999 432 p. [In Russian].
12. Loginov V.F., Mikushkina V.S. Climate change Trends, cycles, pauses. *Izmeneniye klimata: trendy, tsikly, pauzy*. Minsk: Belarusian Science, 2017:179 p. [In Russian].
13. Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S., Simakina T.E. Evaluation of the capabilities of the analogues method for the current air temperature forecast. *Vestnik TvGU*. Bulletin of Tver State University, Series "Applied Mathematics". 2019, 1 (58): 101-116. [In Russian].
14. Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S. *Avtomaticheskiye meteorologicheskiye stantsii. Chast' 2. Tsifrovaya obrabotka dannykh avtomaticheskikh meteorologicheskikh stantsiy*. Automatic weather stations. Part 2. Digital processing of data from automatic weather stations. Tutorial. St. Petersburg: RGGMU, 2016: 99 p. [In Russian].

Статья поступила 16.03.2020

Принята после доработки к публикации 06.05.2020

Сведения об авторах

Кузнецов Анатолий Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры экспериментальной физики Российского государственного гидрометеорологического университета; e-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

Сероухова Ольга Станиславовна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета; e-mail: seroukhova@inbox.ru

Симакина Татьяна Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета; e-mail: tatiana.simakina@gmail.com

Information about authors

Kuznetsov Anatoly Dmitrievich, Grand PhD (Phys. Mat. Sci.), Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University

Seroukhova Olga Stanislavovna, PhD (Phys. Mat. Sci.), Associate Professor, Department of Meteorology, Climatology and Atmosphere Protection, Russian State Hydrometeorological University

Simakina Tatyana Evgenievna, PhD (Phys. Mat. Sci.), Associate Professor, Department of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University

УДК [556.16.06+556.16.072]:556.535.3
(282.256.164.6+282.256.166)

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-41-50

Применение метода стохастического фоновго прогноза к речным бассейнам Казахстана

А.Е. Баймаганбетов, Е.В. Гайдукова

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
oderiut@mail.ru

Рассматривается метод стохастического фоновго прогноза, основанный на решении системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов. Метод применяется к рекам бассейна рек Есиль и Тобыл, которые протекают на территории Республики Казахстан. Делаются поверочные прогнозы первого и второго начальных моментов для периода половодья с суточной заблаговременностью. Получено, что первый момент прогнозируется более надежно, чем второй. Прогноз подобных статистических характеристик позволяет получить кривые обеспеченности, необходимые для производственных функций отраслей экономики Казахстана.

Ключевые слова: стохастическое моделирование, гидрологический прогноз, суточные стока, статистические характеристики, реки Казахстана.

Application of the method of stochastic background forecast to Kazakhstan's river basins

A.E. Baimaganbetov, E.V. Gaidukova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The production functions of water-dependent sectors of the economy along with labor and capital investments include natural resources, in particular, the hydrological characteristics (norm, variation and skewness coefficients) determining the river flow dynamics.

The purpose of the study is to test the method of stochastic forecasting of hydrological characteristics with lead time of 24 hours for the catchments of Northern Kazakhstan during the spring flood, which is characterized by a sharp rise and fall.

The stochastic background forecasting method is based on solving a system of differential equations for initial statistical moments. Only average daily values of water discharge, which does change during the day but is not measured and recorded, are usually taken into account, making a statistical generalization of intraday variations in water discharges. The solution of simultaneous equations for the initial moments with daily resolution is the predicted values of the first three moments, characterizing the average daily value, the variation of water flow within a day and the deviation of the average value from the modal one (coefficient of skewness).

Verification forecasts of the first and second initial moments have been made for the flood period with lead time of 24 hours. Optimization of the forecast system parameters has been carried out on 30 days preceding the forecast release date. It has been found that the first moment is predicted more reliably rather than the second one.

The forecast of such statistical characteristics allows to obtain the frequency curve necessary for the production functions of the Kazakhstan economical sectors.

Keywords: stochastic modeling, hydrological forecast, daily runoff layers, statistical characteristics, Kazakhstan rivers.

For citation: A.E. Baimaganbetov, E.V. Gaidukova. Application of the method of stochastic background forecast to Kazakhstan's river basins. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 41—50. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-41-50

Введение

Многие отрасли экономики, деятельность которых тесно связана с использованием водных ресурсов, нуждаются в гидрологических прогнозах. Надежный прогноз позволяет оптимизировать хозяйственную деятельность с учетом потребностей производства.

Производственные функции водозависимых отраслей экономики, отдельных предприятий и водопотребителей включают в себя трудовые ресурсы, капиталовложения и природные ресурсы [1], от которых зависит выпуск продукции, безопасность эксплуатации сооружений, экологическая безопасность и т. п. (в зависимости от характера водопользования). Самым динамичным компонентом природных ресурсов является вода, точнее так называемые расчетные гидрологические характеристики (норма, коэффициенты вариации и асимметрии), определяющие изменения речного стока. Широко распространены модели, основанные на динамических закономерностях, но они не учитывают элементы случайности в формировании стока (см., например, [2]). Однако существуют методы, основанные на стохастических дифференциальных уравнениях, позволяющие моделировать и прогнозировать нестационарные гидрологические случайные процессы, включая внутригодовую динамику (см., например, [3]).

Цель исследования, представленного в статье, заключается в апробации метода стохастического фонового прогноза гидрологических характеристик с заблаговременностью сутки на водосборах Северного Казахстана в период весеннего половодья, которое характеризуется резкими подъемом и спадом.

Метод стохастического фонового прогноза стоковых характеристик

Динамический прогноз ограничивается указанием конкретных значений расходов (уровней) в узлах расчетной сетки. Такой строго детерминистический подход игнорирует случайные факторы формирования стока, а также погрешности задания начальных данных, параметров моделей и внешних воздействий (ход прогнозных осадков). В гидрологических расчетах, ориентирующихся на производственные функции водозависимых отраслей экономики, используются вероятностные оценки расходов и уровней воды. Знание кривых распределений плотности вероятности расходов $p(Q)$ или уровней $p(H)$ (или прогнозных распределений) позволяет приписывать любому прогнозному значению расхода (уровня) вероятность его появления. Это расширяет возможности оценки риска принятия ошибочных решений для экономики.

Для перехода от динамического прогноза к стохастическому можно использовать уравнение Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК), стохастически обобщающего модель для речного стока $\tau dQ/dt + Q/k = \dot{X}$ [4]. В модель вводятся обозначения $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$, $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$, где k — коэффициент стока; τ — время релаксации речного бассейна; $\dot{X}$ — интенсивность осадков; $\tilde{c}$ и $\tilde{N}$ — белые гауссовские шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$.

Применив известную в теории случайных процессов процедуру стохастического обобщения [4], получим уравнение

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(A(Q,t)p(Q,t)) + 0,5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(B(Q,t)p(Q,t)), \quad (1)$$

где $A(Q,t)$ и $B(Q,t)$ — коэффициенты сноса и диффузии.

Это уравнение уже можно применить для решения поставленной задачи. Однако на практике достаточно ограничиться системой обыкновенных дифференциальных уравнений [5], аппроксимирующих уравнение (1):

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 + \bar{N} - 0,5G_{\tilde{N}}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 4 \cdot 3,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_i — начальные статистические моменты i -го порядка. Первых трех уравнений достаточно для получения эволюции асимметричных вероятностных распределений.

Возможны различные варианты параметризации системы (2). С учетом того что $c = 1/k\tau$, $N = \dot{X}/\tau$ и при этом k и τ известны из оптимизации модели, а $\dot{X}$ — из метеопрогноза, необходимо определить только интенсивности $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ из первых трех уравнений системы (2) при известных m_1 , m_2 и m_3 . Они могут быть определены на основе 30-дневных наблюдений за стоком в створе, для которого дается прогноз.

В течение суток происходят изменения расходов воды, которые не измеряются и не фиксируются, — на практике используют только среднесуточные значения, делая как бы статистическое обобщение внутрисуточных вариаций расходов воды.

Решением системы уравнений для начальных моментов (2) являются прогнозные значения трех первых моментов, которые характеризуют среднесуточное значение, вариацию расходов воды внутри суток $(Cv = \sqrt{m_2 - m_1^2}/m_1)$ и отклонение среднего значения от модального $(Cs = (m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3)/(Cv^3m_1^3))$.

Апробация метода на речных бассейнах Казахстана

Объектами исследования было выбрано 11 гидрологических пунктов в бассейнах рек Есиль и Тобыл (табл. 1), расположенных на территории Казахстана. Водосборы не объединены, так как между ними находится бессточная область с многочисленными сезонными водоемами. Использовались следующие исходные данные за 60 суток периода половодья 2014 года: среднесуточные расходы воды, среднесуточная температура воздуха, сумма осадков за сутки и снегозапасы на дату начала половодья.

Таблица 1

Список гидрологических пунктов в бассейнах рек Есиль и Тобыл

List of hydrological stations in the Esil and Tobil river basins

Река — пункт	Площадь водосбора, км ²	Репрезентативная метеостанция
Жабай — с. Атбасар	8530	Атбасар
Калкутан — с. Калкутан	16500	Новомарковка
Есиль — с. Турген	3240	Акколь
Желкуар — с. Чайковский	4324	Жетыкара
Тобыл — с. Гришенка	13100	Тобыл
Аят — с. Варваринка	9020	Рудный
Тобыл — г. Костанай	28000	Костанай
Тобыл — с. Милютинка	32700	Жетыкара
Уй — с. Уйское	36752	Михайловка
Есиль — с. Токсан би	90000	Атбасар
Шагалалы — с. Павловка	1750	Акколь

Оптимизация параметров прогнозной системы производилась на предшествующих дате выпуска прогноза 30 сутках, позволяющих получать статистические моменты с меньшей погрешностью. Процедура динамической параметризации взята из работы [6, с. 9—11]. Поверочные прогнозы вероятностных моментов были сделаны на следующие тридцать суток с суточной заблаговременностью.

На рис. 1 для примера показаны фактические и прогнозные гидрографы за 30 суток. В табл. 2 представлена оценка поверочных прогнозов в виде соотношения S/σ_{Δ} (S — среднеквадратическая погрешность, σ_{Δ} — среднеквадратическое отклонение изменения фактического значения за период заблаговременности от среднего значения этих изменений).

В табл. 2 видно, что численные значения соотношения S/σ_{Δ} на гидрологических постах № 1, 3, 4, 5, 10, 11 не превышают 0,8 для первого начального момента m_1 , что является удовлетворительным результатом для 30 поверочных прогнозов. Для второго начального момента m_2 результат несколько хуже: только для четырех водосборов соотношение S/σ_{Δ} не превышает допустимого значения 0,8. Следует отметить, что m_1 , m_2 характеризуют слой стока в миллиметрах и мм² соответственно. При этом на большинстве гидропостов различия в миллиметрах фактических слоев стока и прогнозных значений невелики (см. рис. 1): не превышают нескольких миллиметров. Однако при оценке эффективности методики по

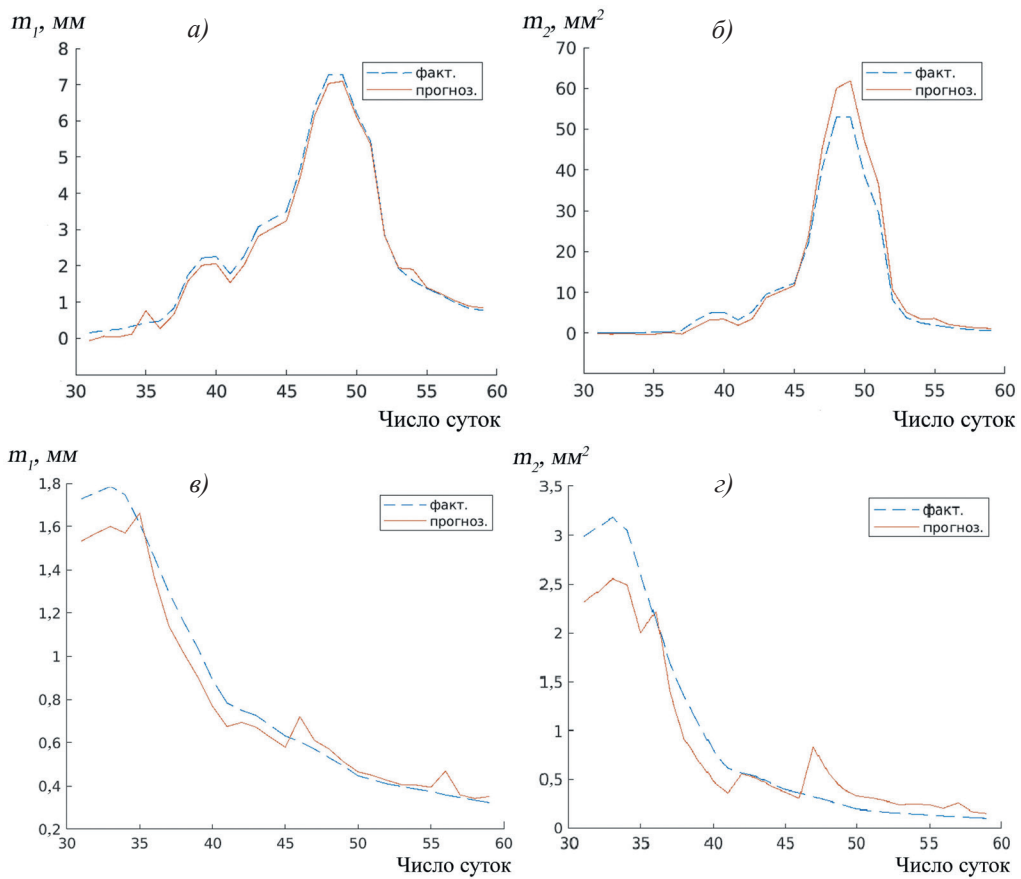


Рис. 1. Изменение фактических и прогнозных первого m_1 (а, в) и второго m_2 (б, г) начальных моментов.
а и б — р. Желкуар — с. Чайковский; в и г — р. Есиль — с. Токсан би.

Fig. 1. Charts of changes in the actual and forecasted first m_1 (а, в) and second m_2 (б, г) initial moments.

а, б — r. Zhelkuar — st. Chaikovsky; в, г — r. Yesil — st. Toxan bi.

критерию S/σ_Δ получается неудовлетворительный результат. Подобный результат можно объяснить малым значением σ_Δ , характеризующим малые односуточные изменения слоя стока.

Пример фонового вероятностного прогноза в виде карт изолиний представлен на рис. 2 (значения даны в слоях). Первых двух начальных моментов достаточно для определения статистических гидрологических характеристик (нормы, коэффициентов вариации), а значит, и для нахождения в любой точке рассматриваемой территории кривой обеспеченности для суточного слоя стока, значения которой входят в производственные функции отраслей экономики Казахстана [7].

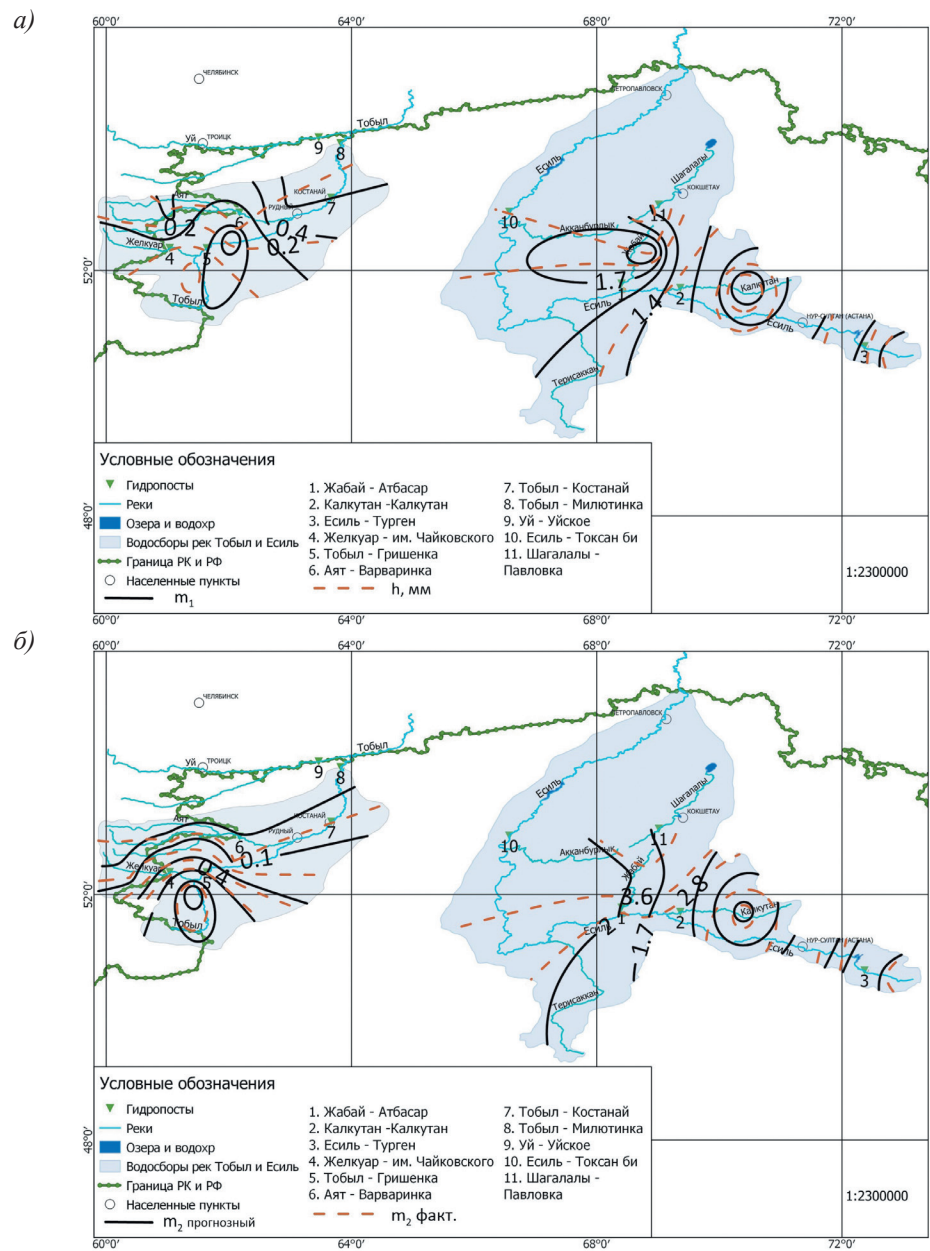


Рис. 2 (начало). Пример карт распределения фактических и прогнозных первого (а, в) и второго (б, г) статистических начальных моментов через 5 суток (а, б) и 25 суток (в, г) от даты начала прогноза (прогноз давался с суточным шагом).

Fig. 2. An example of maps of the distribution of actual and forecasted first (a, в) and second (б, г) statistical initial moments after 5 (a, б) and 25 (в, г) days from the start date of the forecast (the forecast was given in daily increments).

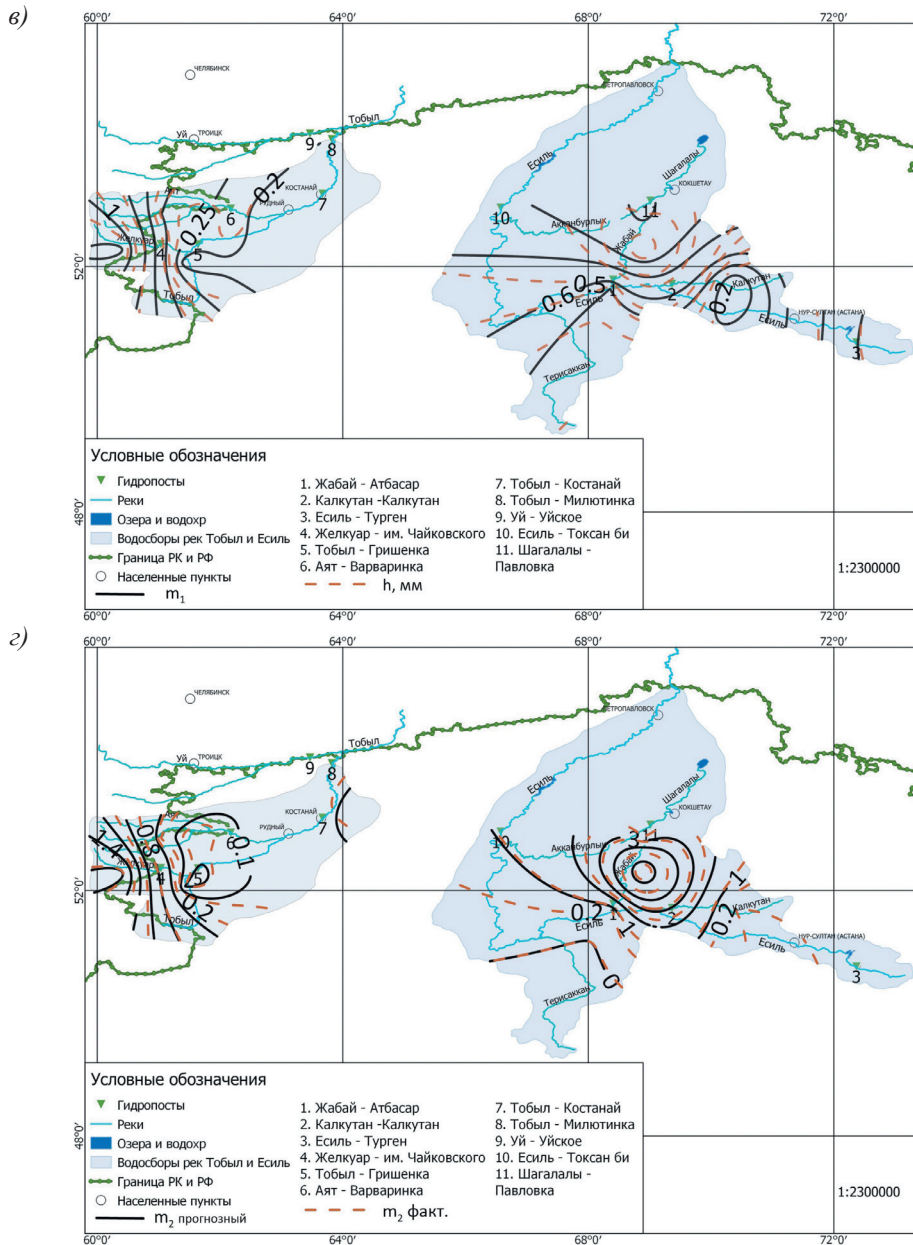


Рис. 2 (окончание). Пример карт распределения фактических и прогнозных первого (а, в) и второго (б, г) статистических начальных моментов через 5 суток (а, б) и 25 суток (в, г) от даты начала прогноза (прогноз давался с суточным шагом).

Fig. 2. An example of maps of the distribution of actual and forecasted first (a, в) and second (б, г) statistical initial moments after 5 (а, б) and 25 (в, г) days from the start date of the forecast (the forecast was given in daily increments).

Таблица 2

Численные значения критериев оценки эффективности прогнозного метода

Numerical values of the criterion
for evaluating the effectiveness of the forecast method

Номер поста	Река — пункт	S/σ_{Δ}	
		m_1	m_2
1	Жабай — с. Атбасар	0,31	0,19
2	Калкутан — с. Калкутан	1,74	0,20
3	Есиль — с. Турген	0,68	1,67
4	Желкуар — с. Чайковский	0,14	0,46
5	Тобыл — с. Гришенка	0,75	0,42
6	Аят — с. Варваринка	1,27	1,68
7	Тобыл — г. Костанай	6,03	2,05
8	Тобыл — с. Милютинка	3,06	1,43
9	Уй — с. Уйское	1,16	0,91
10	Есиль — с. Токсан би	0,47	1,26
11	Шагалалы — с. Павловка	0,83	2,15

Полученные карты распределения вероятностных характеристик оценивались по критерию β [8], который характеризует степень неустойчивости решения системы для начальных моментов. Было получено, что при прогнозе речного стока с водосборов р. Тобыл решение оказывается неустойчивым, что также подтверждается высокими показателями S/σ_{Δ} . При этом неустойчивость проявляется в основном в начальный период прогнозов. Для улучшения результатов прогноза для таких водосборов планируется использовать методологию частично инфинитной гидрологии, позволяющей получать устойчивые решения путем привлечения дополнительных фазовых переменных для математического описания и прогнозирования стока. В контексте вероятностного прогнозирования это означает переход к n -мерному распределению плотности вероятности (см., например, [9]). Для ответа на вопрос, сколько дополнительных фазовых переменных надо привлекать, используется метод фрактальной диагностики [10].

В заключение следует отметить, что в Казгидромете основными методами прогноза погоды являются статистический, физико-статистический и водно-балансовый [11]. Все эти методы были разработаны в XX веке, и на настоящий момент минусом этих методов является то, что не все составляющие могут быть непосредственно измерены или определены. Это связано, прежде всего, с ограниченностью исходной информации и с невысокой ее точностью. Отдельные параметры, такие как инфильтрация воды в почву, поверхностное задержание, суммарное испарение, оцениваются или определяются весьма приближенно. В статистическом методе, который в настоящее время наиболее широко используется для прогноза стока рек Северного Казахстана, учитывается осенняя увлажненность как один из основных параметров. Однако коэффициент осенней увлажненности не измеряется, а определяется по методике, учитывающей

осадки за длительный период. В результате в случае если в расчете осенней увлажненности происходит ошибка, это существенно влияет на качество прогноза. Рассматриваемый стохастический метод позволяет параметризовать осеннюю увлажненность и другие трудно определяемые параметры как задаваемые параметры и внешнее воздействие.

Выводы

В статье была показана возможность применения метода стохастического прогноза к речным бассейнам Казахстана. Метод основан на решении системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов. Реки Казахстана характеризуются быстрым подъемом и спадом половодья, а также значительными снегозапасами на водосборе.

Были произведены поверочные прогнозы с суточной заблаговременностью первого и второго начальных моментов, показывающих среднее значение и вариацию слоя речного стока за сутки. Получено, что первый начальный момент прогнозируется надежнее, чем второй, причем отклонения прогнозных значений от фактических достигали для некоторых водосборов всего нескольких миллиметров. Планируется оценка устойчивости решений расчетной системы при использовании в качестве внешнего воздействия прогнозных метеорологических характеристик.

Список литературы

1. Кротов В.Ф. Основы теории оптимального управления. М.: Высшая школа, 1990. 431 с.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М: Академия, 2010. 298 с.
3. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Девятков В.С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 10—20.
4. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Учебник. Изд. 2-е, испр. и доп. СПб: изд-во РГГМУ, 2006. 559 с.
5. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В.В. Коваленко. СПб: изд-во РГГМУ, 2010. 51 с.
6. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В., Громова М.Н., Шевнина Е.В., Девятков В.С. Методика фонового краткосрочного прогнозирования изменения водности // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 65—70.
7. Сатенбаев Е.Н., Ибатуллин С.Р., Балгабаев Н.Н. Водопотребление отраслей экономики Казахстана: оценка и прогноз. Алматы, 2012. 262 с.
8. Коваленко В.В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии. СПб: изд-во РГГМУ, 2011. 107 с.
9. Гайдукова Е.В., Шаночкин С.В., Москалюк М.А. Учет испарения при математическом моделировании речного стока // Ученые записки РГГМУ. № 52. 2018. С. 79—87.
10. Kovalenko V.V., Gaidukova E.V. Influence of climatological norms of the surface air temperature on the fractal dimensionality of the series of long-term river discharge // Doklady Earth Sciences. 2011. V. 439. No. 2. P. 1183—1185.
11. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. СПб: изд-во РГГМУ, 2007. С. 190—191.

References

1. Krotov V.F. *Osnovy teorii optimal'nogo upravleniya*. Fundamentals of the theory of optimal control. Moscow: Vysshaya shkola, 1990: 431 p. [In Russian].
2. Vinogradov YU.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoye modelirovaniye v gidrologii*. Mathematical modeling in hydrology. Moscow: Academy, 2010: 298 p. [In Russian].
3. Kovalenko V.V., Gaydukova Ye.V., Devyatov V.S. Background forecasting of the formation of daily probabilistic runoff characteristics. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2011, 18: 10—20. [In Russian].
4. Kovalenko V.V., Viktorova N.V., Gaidukova E.V. *Modelirovaniye gidrologicheskikh protsessov*. Modeling hydrological processes. Textbook. St. Petersburg: RSHU. 2006: 555 p. [In Russian].
5. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke obespechennykh raskhodov proyektiruyemykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy pri neustanovivshemsya klimate*. Guidelines for assessing the secured costs of designed hydraulic structures in an unsteady climate / Ed. V.V. Kovalenko. St. Petersburg: RSHU. 2010: 51 p. [In Russian].
6. Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Viktorova N.V., Gromova M.N., Shevnina E.V., Devyatov V.S. Background short-term forecasting methodology for changes in water discharge. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2012, 10: 65—70. [In Russian].
7. Satenbaev E.N., Ibatullin S.R., Balgabaev N.N. *Vodopotrebleniye otrasley ekonomiki Kazakhstana: otsenka i prognoz*. Water Consumption in Kazakhstan: Estimation and Forecast. Almaty. 2012: 262 p. [In Russian].
8. Kovalenko V.V. *Obespecheniye ustoychivosti modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka metodami chastichno infinitnoy gidrologii*. Ensuring the sustainability of modeling and forecasting river flow using partially infinite hydrology methods. St. Petersburg: RSHU. 2011: 107 p. [In Russian].
9. Gaidukova E.V., Shanochkin S.V., Moskalyuk M.A. Accounting for evaporation in the mathematical modeling of river flow. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2018. 52: 79—87. [In Russian].
10. Kovalenko V.V., Gaidukova E.V. Influence of climatological norms of the surface air temperature on the fractal dimensionality of the series of long-term river discharge. *Doklady Earth Sciences*. 2011, 439 (2): 1183—1185.
11. Georgievsky Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskiye prognozy*. Hydrological forecasts. St. Petersburg: RSHU. 2007: 190—191. [In Russian].

Статья поступила 08.05.2020

Принята к публикации 15.06.2020

Сведения об авторах

Баймаганбетов Азамат Ергалиевич, аспирант, кафедра инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, azamat.baima@gmail.com

Гайдукова Екатерина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, oderiut@mail.ru

Information about authors

Baymaganbetov Azamat Ergalievich, graduate student, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University

Gaidukova Ekaterina Vladimirovna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University

Влияние вырубок леса на сток и вынос биогенных элементов с лесных водосборов Карелии (по данным математического моделирования)

С.А. Кондратьев¹, Ю.В. Карпечко², М.В. Шмакова¹

¹ ФГБУН Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, kondratyev@limno.org.ru

² Институт леса — обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Предложена модель стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора, описывающая динамику изучаемых процессов при естественном развитии древостоя и в процессе лесовосстановления после вырубки. Показано, что при выполнении лесохозяйственных мероприятий в соответствии с лесохозяйственным регламентом существенных изменений стока и выноса биогенных элементов не фиксируется. Полученный результат объясняется тем, что объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека. Проведено имитационное моделирование последствий гипотетических вырубок 50 и 100 % площади леса на экспериментальном водосборе, которое позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов.

Ключевые слова: математическая модель, испарение, сток, вынос биогенных элементов, вырубка леса.

Influence of forest cutting down on runoff and nutrient removal from forest catchment of Karelia (according to mathematical modeling)

S.A. Kondratyev¹, Yu.V. Karpechko², M.V. Shmakova¹

¹ Institute of Limnology of RAS, Saint Petersburg, Russia

² Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia

The purpose of this study is to assess the impact of forestry activities on the runoff and nutrient removal from the forest catchments of Karelia using mathematical modeling. The catchment area of the Big Velmuksa river in Karelia with an area of about 139 km² has been chosen as a research object. It is a part of the catchment of the Vodla river - one of the largest tributaries of Lake Onega. Almost the entire catchment area of the Big Velmuksa river is forested (94%). The main direction of economic activity in the forest catchment areas in Karelia, including the Big Velmuksa catchment, is cutting down and growing new forest. In this study a simple model of runoff and nutrient removal from the forest catchment has been proposed. The purpose of this model is to describe the dynamics of the studied processes both during the natural development of the forest and in the process of reforestation after cutting down. It is shown that when forestry activities are carried out in accordance with forestry regulations rules, significant changes in runoff and nutrient removal are not recorded. The obtained result is explained by the fact that the volume of cutting down is approximately equal to the volume of growth, the level of variation in runoff and removal of chemicals depending insignificantly on human forestry activities. In addition, a simulation of the effects of hypothetical cutting down of 50 and 100% of the forest area on an experimental catchment has been carried out, allowing to assess the interval of possible extreme changes in runoff

and nutrient removal. The results show the increase in runoff from the catchment to be 48 mm / year and the decrease in nutrient removal - 14.3 tN / year and 0.35 tP / year after 100% deforestation. Subsequent reforestation and the associated increase in nitrogen and phosphorus removal will continue for about 80 years.

Keywords: mathematical model, evaporation, runoff, nutrient removal, forest cutting down.

For citation: S.A. Kondratyev, Yu.V. Karpechko, M.V. Shmakova. Influence of forest cutting down on runoff and nutrient removal from forest catchment of Karelia (according to mathematical modeling). *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 51—66. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-51-66

Введение

Около 50 % территории Европейского Севера России занято лесами. Леса представляют собой сложные природные объекты, различающиеся по многим характеристикам: породному составу, условиям произрастания древостоя, его продуктивности, возрасту и др. Роль леса в гидрофизических и гидрологических процессах еще слабо исследована, так как он относится к природным объектам, в которых очень трудно проводить экспериментальные воднобалансовые исследования. Значительную сложность представляет организация измерения испарения с леса существующими методами натурных исследований. Вместе с тем испарение относится к тем элементам водного баланса водосборов, которые в наибольшей степени зависят от антропогенного воздействия, определяющего преобразование количественных и качественных характеристик водных ресурсов территорий.

При отсутствии наблюдений часто приходится прибегать к методам математического моделирования. Динамика испарения с леса на различных этапах его развития является исходной информацией для моделирования гидрологического режима лесных водосборов, стока с них и выноса химических веществ, а также для оценки влияния антропогенной деятельности на сток малых рек и определения экологического ущерба, уже причиненного лесохозяйственной деятельностью [1—5].

Целью настоящего исследования является оценка воздействия лесохозяйственных мероприятий на сток и вынос биогенных веществ с лесных водосборов Карелии с использованием методов математического моделирования.

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран водосбор реки Бол. Велмуksы площадью 139 км², расположенный в Пудожском районе Республики Карелия и входящий в водосбор одного из крупнейших притоков Онежского озера — р. Водлы (рис. 1).

Практически весь водосбор р. Бол. Велмуksы покрыт лесом (94 %). Хвойные породы занимают 65 % покрытой лесом части водосбора, 13 % этой территории занято сосновыми лесами, 52 % — еловыми. На остальной покрытой лесом части водосбора произрастают мягколиственные породы, среди которых основное место

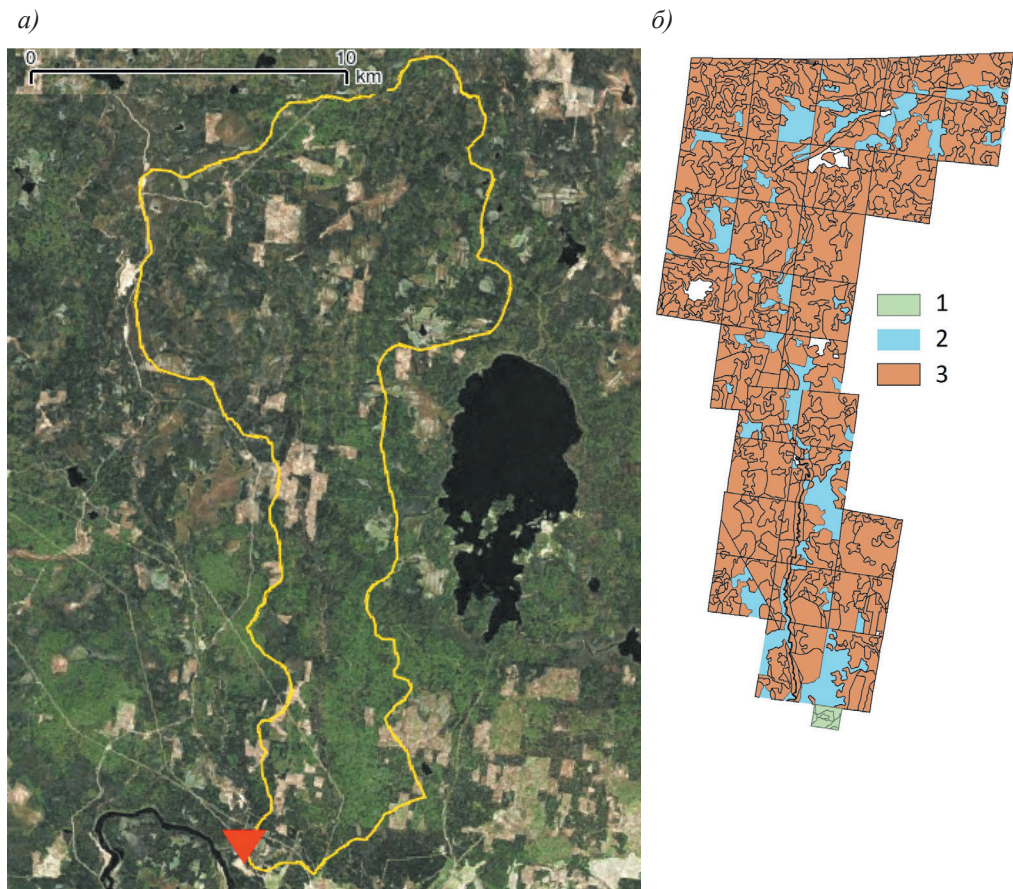


Рис. 1. Схема водосбора р. Бол. Велмуksы (а) и расположенная на нем квартальная сеть (б).

1 — зеленые зоны, 2 — леса водоохранных зон, 3 — эксплуатационные леса.

Fig. 1. Scheme of Big Velmuksa catchment (a) and its quarter network (b).

1 – green zones, 2 – forests of water protection zones, 3 – operational forests.

занимают березняки (34 %) и около 1 % приходится на осиновые леса. Средний возраст сосняков и ельников составляет 85 — 90 лет, а березняков — 50 лет. Озера занимают на водосборе менее 1% всей его площади, а заболоченность составляет чуть больше 3 %.

Основным направлением хозяйственной деятельности на лесных водосборах Карелии, и в том числе на водосборе р. Бол. Велмуksы, являются заготовка древесины и уход за растущим лесом. Спелые и перестойные леса рубят, как правило, с целью заготовки древесного сырья. Выполняемые в таких лесах рубки подразделяются на выборочные и сплошные. После сплошных рубок на лесном участке

(вырубке) начинаются динамичные процессы, аналогичные происходящим после предыдущего удаления древостоя на той же самой лесосеке. На основе материалов лесохозяйственного регламента Пудожского центрального лесничества [6], на территории которого расположен водосбор р. Бол. Велмуксы, рекомендуемая к принятию площадь расчетной лесосеки составляет 0,9 % общей площади лесных угодий, т. е. около 125 га. Соотношение площади лиственных пород и площади хвойных составляет 3/7.

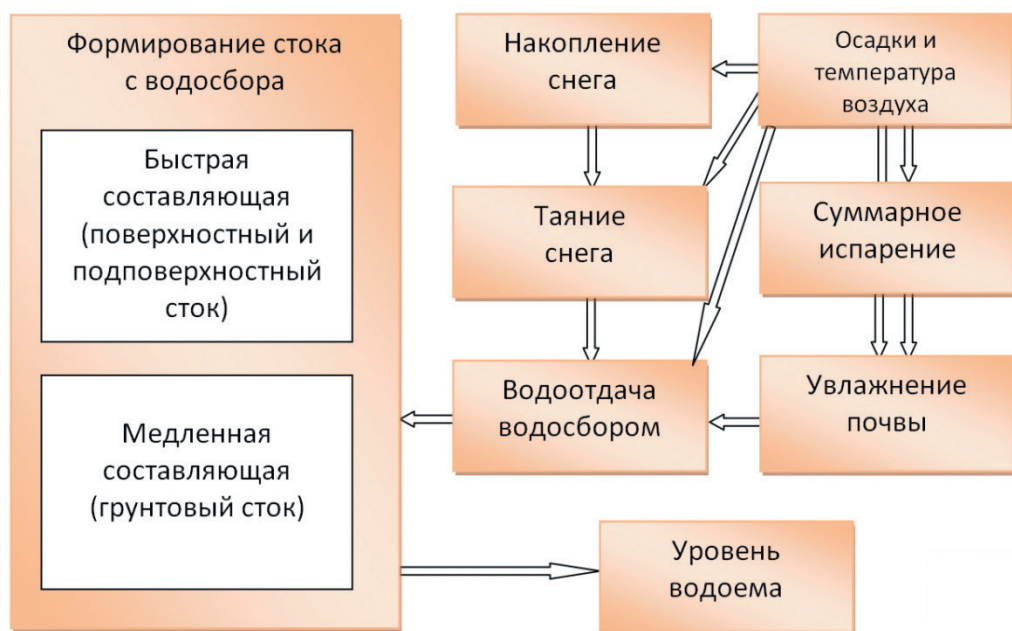
Методика исследования

В качестве основного инструмента для моделирования стока с водосбора используется гидрологическая модель формирования стока с водосбора *IL_HM* – *Institute of Limnology Hydrological Model* (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015 г.), разработанная в Институте озераведения РАН [8, 9] и предназначенная для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности, т. е. доли площади водоемов в общей площади водосбора. Схема модели представлена на рис. 2.

Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России (водосборы рек Тигода, Лижма, Сяньга, Олонка, Сунна, Шуя, Оять, Сясь, Вуокса, Свирь, Великая, Нева) [7—9] и Финляндии (водосборы рек Мустайоки и Харайоки) [10]. В настоящее время *IL_HM* успешно применяется как средство оценки воздействия климатических изменений на сток рек Северо-Запада РФ, а также в качестве основы для расчетов выноса биогенных веществ с водосборов.

Для решения задачи, связанной с количественной оценкой воздействия вырубок на сток, модель нуждается в существенной модификации блока, описывающего суммарное испарение с лесного водосбора, так как возможны изменения стока. Повышенное внимание к блоку испарения обусловлено, прежде всего, тем, что при рубках леса изменения стока происходят именно за счет уменьшения суммарного испарения с поверхности водосбора.

Институтом озераведения РАН совместно с Институтом леса Карельского научного центра РАН разработана модель для расчета испарения с лесных массивов *EVAP_FOR* (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662377) [3, 11—13]. Отличительной чертой настоящей модели является то, что в ней рассчитывается суммарное испарение не только в зависимости от

Рис. 2. Схема модели *IL_HM*.Fig. 2. Scheme of the *IL_HM* model.

осадков, температуры воздуха и дефицита влажности воздуха, как это делается в абсолютном большинстве известных моделей испарения, но и от возраста леса и его таксационных характеристик. Слои испарения с лесных массивов оцениваются как сумма транспирации древостоем, испарения с напочвенного покрова и задержанных пологом леса осадков. Учитывается разнообразие таксационных характеристик древостоя и возрастные изменения растительного покрова. В качестве интегрального показателя характеристик, влияющих на формирование испарения и физических аспектов транспирации, принимаются масса листвы и индекс листовой поверхности. Транспирация древостоем определяется как произведение массы листвы на удельную величину транспирации, рассчитанной для единицы площади на основе экспериментальных данных [13]. Испарение с напочвенного покрова рассчитывается как функция возможного в конкретных условиях испарения с безлесного участка и индекса листовой поверхности древостоя. Испарение задержанных пологом леса осадков определяется как функция массы листвы и метеорологических характеристик.

Расчетные зависимости, составляющие основу модели, представляют собой аппроксимацию кривых, описывающих динамику суммарного испарения с различных типов леса с учетом его развития с шагом по времени, равным одному месяцу, и полученных в результате обобщения многолетних экспериментальных данных, собранных в Институте леса КарНЦ РАН [13]. Поскольку экспериментальный

материал, положенный в основу расчетных зависимостей, собирался именно в условиях лесов Карелии, не возникает проблем с дополнительной калибровкой и верификацией модели на водосборе р. Бол. Велмуксы. В данной задаче модель *EVAP_FOR* обеспечивает месячными значениями слоев испарения модель формирования. Схема модели представлена на рис. 3.

На рис. 4 представлено сравнение измеренных и рассчитанных по моделям *IL_HM* и *EVAP_FOR* гидрографов слоев стока с водосбора р. Бол. Велмуксы за период 2010—2015 гг. Расчеты выполнялись для створа наблюдательной сети Росгидромета в городе Пудож. Приведенное на рис. 4 значение критерия Нэша-Сатклифа NS, равное 60 %, подтверждает удовлетворительное соответствие результатов натурных измерений и моделирования. Можно предположить, что завышение рассчитанных расходов воды в период межени связано с тем, что русло р. Бол.

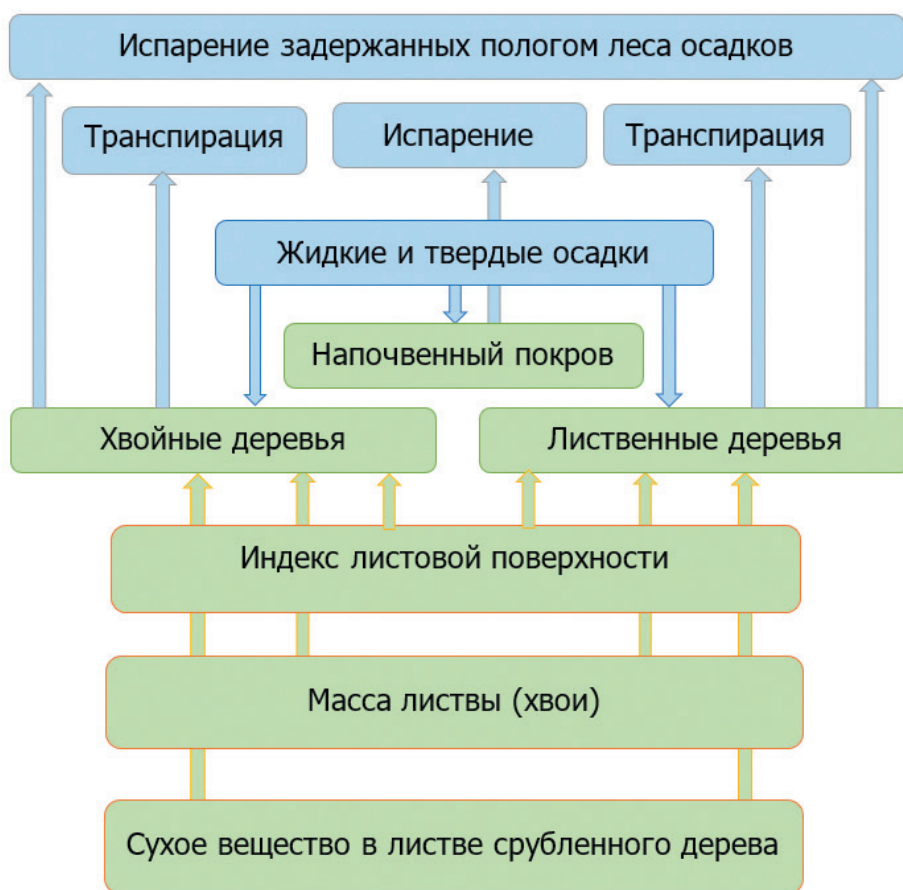


Рис. 3. Схема модели формирования испарения с леса *EVAP_FOR*.

Fig. 3. Scheme of the forest evaporation model *EVAP_FOR*.

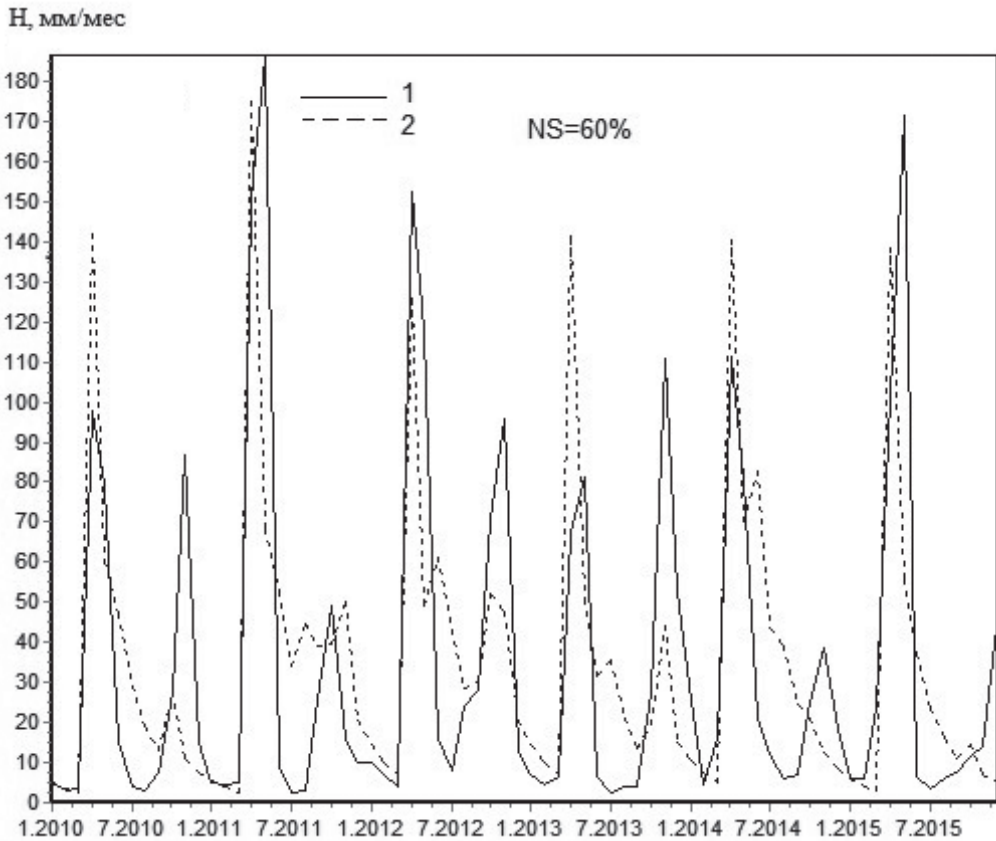


Рис. 4. Измеренные (1) и рассчитанные (2) гидрографы стока с водосбора р. Бол. Велмуksы за период 2010—2015 гг.

Fig. 4. Measured (1) and calculated (2) runoff hydrographs from the Big Velmuksa river catchment in years 2010—2015.

Велмуksы дренирует не весь сток с водосбора. Часть грунтового стока может попадать напрямую в русло р. Водлы, однако это предположение требует проведения дополнительного экспериментального исследования.

Для расчета выноса биогенных элементов с лесного водосбора, сформировавшегося в результате разложения опада растительного покрова, имеется следующая зависимость [14]:

$$W = \sum_{i=1}^n \alpha U_i F_i, \quad (1)$$

где W — объем выноса в пределах изучаемого водосбора (кг/год); n — число рассматриваемых растительных сообществ; α — коэффициент, характеризующий возможный вынос со стоком рассматриваемого биогенного элемента при разложении

растительного опада; U_i — удельное количество биогенного элемента, ежегодно поступающего на водосбор с растительным опадом i -го растительного сообщества (кг/(га·год)); F_i — площадь i -го растительного сообщества в пределах изучаемого водосбора (га).

Согласно рекомендациям работы [14], для условий Северо-Запада России значения α могут быть приняты равными 0,035 для азота и 0,008 для фосфора. Значения U_i для различных типов растительности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Удельное содержание биогенных веществ в растительном опаде [14]		
Specific nutrient content in plant litterfall [14]		
Тип растительного сообщества	Удельное содержание, кг/га	
	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$
<i>Лес хвойный</i>		
Ель	36,0	2,0
Сосна	16,0	4,3
<i>Лес лиственный</i>		
Береза	60,0	8,8
Липа	38,0	9,0
Осина	46,0	4,0
Ольха	40,0	3,0
Сады, парки	25,0	2,5
<i>Болото</i>		
Верховое	52,0	10,0
Низинное	95,0	12,0
<i>Прочие сельскохозяйственно-неосвоенные земли</i>		
Луга естественные	46,0	5,0
Территории с изреженным травяным покровом	15,0	1,5

Использование опада в качестве основного аргумента выноса биогенных элементов обусловлено его доминирующей ролью в поступлении этих элементов на водосбор. Вынос азота и фосфора с водосбора с дождевым и талым стоком в значительной степени определяет уровень биогенной нагрузки на водоем-водоприемник, а следовательно, и его трофическое состояние. В среднем поступление азота и фосфора с опадом составляет 80—90 % всей приходной части биогенного баланса спелых и перестойных ельников и сосняков на водосборе [3]. Существенная роль опада в возврате химических элементов в лесные почвы подчеркивается во многих работах [15—17]. При резком сокращении опада в результате вырубок происходят, в частности, значительное снижение содержания азота в верхних горизонтах лесной подстилки и его перенос в минеральные слои почвы [18]. Соответственно снижается и вынос биогенных веществ с водосбора.

При решении задачи оценки изменений биогенного стока с лесного водосбора после вырубок можно предположить, что для i -го участка леса количество биогенного элемента, поступающего в лесную подстилку с растительным опадом w_i (кг/год), складывается из двух составляющих: $w_i = U^* + U_p$, где U^* — удельное

количество биогенного элемента в опаде для «территории с изреженным травяным покровом» (см. табл. 1), и U_i — удельное количество биогенного элемента в опаде для i -го участка леса (см. табл. 1). После проведения вырубki значение U_i становится нулевым, а затем с течением времени увеличивается и через определенное число лет достигает прежних значений. В этом случае в расчетной схеме появляется еще один параметр $T_{i\max}$ (число лет) — время достижения возраста рубок i -го участка. Для условий Карелии могут быть приняты следующие значения $T_{i\max}$: 80 лет для ели и сосны, 60 лет для березы и 40 лет для осины. Если предположить, что возрастание U_i имеет линейный характер [3], то расчетная схема для оценки выноса со стоком рассматриваемого биогенного элемента за счет разложения растительного опада приобретает следующий вид:

$$W = \sum_1^n \alpha w_i,$$

$$w_i = \begin{cases} U^* F_i & \text{при } T_i = 0, \\ (a_i T_i + U^*) F_i & \text{при } T_i \leq T_{i\max}, \\ (a_i T_{i\max} + U^*) F_i & \text{при } T_i > T_{i\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где w_i — количество биогенного элемента в разлагающемся опаде для i -го типа лесного сообщества, доступное для выноса со стоком в течение расчетного года (кг/год); n — число лесных сообществ; T_i — возраст i -го растительного сообщества (число лет); a_i — ежегодное увеличение содержания биогенных элементов в опаде для каждого i -го растительного сообщества (кг/(га·год)); U^* — количество биогенного элемента в опаде на территориях с изреженным травяным покровом (кг/га); F_i — площадь i -го растительного сообщества в пределах изучаемого водосбора (га); $T_{i\max}$ — время достижения возраста рубок (число лет); α — коэффициент, характеризующий возможный вынос биогенного элемента при разложении растительного опада. Значения коэффициента a_i , рассчитанные с учетом приведенных выше значений $T_{i\max}$, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметра a_i в формуле (2)
The values of the parameter a_i in equation (2)

Тип растительного сообщества	a_i , кг/(га·год)	
	$N_{\text{общ}}$	$P_{\text{общ}}$
<i>Лес хвойный</i>		
Ель	0,45	0,025
Сосна	0,2	0,05375
<i>Лес лиственный</i>		
Береза	1	0,1467
Осина	1,15	0,1

Формула (2), а также значения параметров, приведенные в табл. 2, являются авторской разработкой в рамках настоящего исследования.

Представленный выше математический аппарат представляет собой основу для выполнения серии имитационных расчетов по выявлению и количественной оценке изменений стока и выноса азота и фосфора с лесного водосбора в результате вырубки и последующего восстановления леса.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования выполнялись расчеты испарения и стока с водосбора р. Бол. Велмуксы при средних многолетних значениях метеорологических параметров (количества осадков и температуры воздуха) и характеристиках лесного покрова, соответствующих уровню 2018 г. После этого проводилась имитация проведения сплошной вырубки на расчетной лесосеке площадью 125 га, составляющей 0,9 % общей площади покрытой лесом части водосбора. При этом соотношение пород деревьев сохранялось.

Результат оказался вполне ожидаемым. Изменение испарения на 0,9 % площади водосбора визуального эффекта по изменению гидрографа стока не дали. Уменьшение суммарного испарения с водосбора составило 0,03 % начального значения, соответственно сток увеличился на 0,05 %. Уменьшение листовного опада после вырубки на указанной площади также привело в незначительному сокращению выноса азота и фосфора — не более чем на 0,5 % по отношению к уровню 2018 г.

Полученный результат объясняется тем, что в ходе эксплуатации лесного фонда в соответствии с существующими рекомендациями ведения лесохозяйственной деятельности на достаточно крупном (относительно площади ежегодных рубок) водосборе объем вырубаемого древостоя и площадь создаваемых при этом новых рубок на водосборе компенсируются за счет процесса лесовосстановления. При этом для расчетной лесосеки объем вырубимой древесины примерно равен объему прироста, и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека.

Для оценки чувствительности внутригодового распределения стока с лесного водосбора к гипотетическим рубкам леса на гораздо больших площадях проведены расчеты, имитирующие последствия вырубки 50 и 100 % леса на водосборе р. Большой Велмуксы. Такие высокие значения приняты не только для улучшения визуализации результатов моделирования, но и для оценки границ максимальных возможных изменений стока и выноса биогенных веществ в результате рубок на исследуемом водосборе. Результаты расчетов, выполненных с использованием средних многолетних значений метеорологических параметров, представлены на рис. 5.

Расчеты показали, что изменение суммарного испарения после вырубки наиболее выражено в летне-осенний период. В среднем за год испарение снижается на 20 мм/год при 50 %-ной рубке и на 48 мм/год при 100 %-ной рубке.

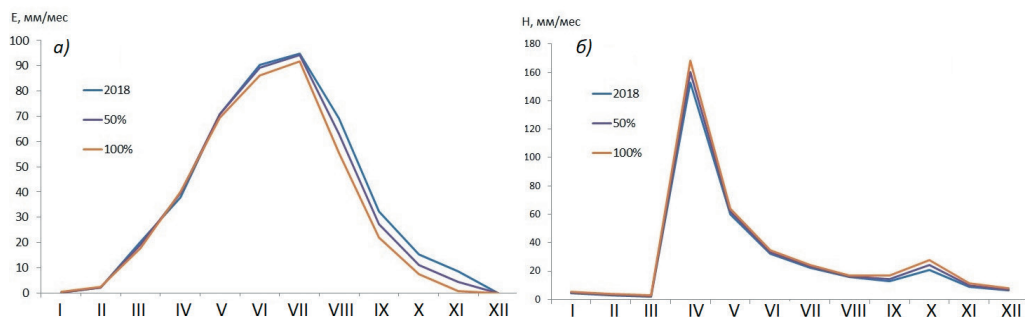


Рис. 5. Внутригодовая динамика суммарного испарения (а) и стока (б) с водосбора р. Бол. Велмуksы по состоянию на 2018 г., а также после вырубки 50 и 100 % общей площади леса.

Fig. 5. Monthly dynamics of total evaporation (a) and runoff (b) from the Big Velmuksa catchment in year 2018, as well as after cutting down 50 % and 100 % of the total forest area.

Соответственно на эти же значения увеличивается и годовой сток. Наиболее значимое возрастание стока отмечается в периоды весеннего половодья (на 9 % по отношению к средним климатическим значениям) и осенних дождевых паводков (на 25 %).

Для оценки возможных изменений годового стока и выноса биогенных элементов в результате вырубки леса и последующего лесовосстановления выполнена серия имитационных расчетов, иллюстрирующая динамику изменения слоя стока и массы вынесенных общего азота и общего фосфора за период времени от момента вырубки до полного лесовосстановления на водосборе р. Бол. Велмуksы. Значения выноса биогенных элементов, рассчитанные с использованием уравнения (2) для условий 2018 г., составили 22,3 тN/год (160,4 кгN/(км²·год)) и 0,52 тP/год (3,7 кгP/(км²·год)). Можно заметить, что полученный результат соответствует известному районированию выноса азота и фосфора на российской части водосбора Финского залива в области Балтийского кристаллического щита, представленному, например, в работе [9]. Приведенные значения выноса в условиях 2018 г. послужили начальным условием для выполнения последующих имитационных расчетов по оценке последствий вырубки.

Так же как и в случае расчетов стока, расчеты изменения листового опада на лесосеке, площадь которой составляла 0,9 % площади водосбора, визуального эффекта при моделировании выноса с водосбора биогенных элементов не дали. Результаты расчетов последствий гипотетической вырубки 50 % площади леса более ощутимы (рис. 6).

На основе представленных материалов можно сделать вывод о том, что модель описывает динамику процессов испарения и стока в период лесовосстановления адекватно существующим представлениям, основанным на результатах

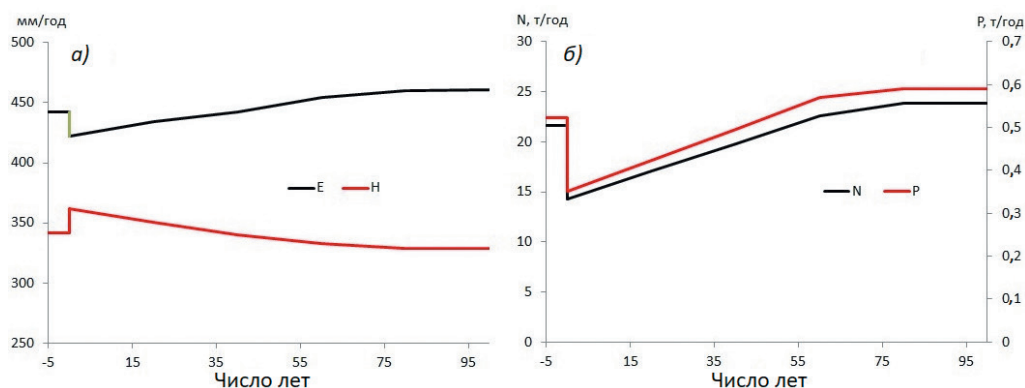


Рис. 6. Динамика среднегодовых значений испарения и стока (а), а также выноса азота и фосфора (б) в процессе лесовосстановления после вырубki 50 % площади леса на водосборе р. Бол. Велмуксы.

Fig. 6. The dynamics of the mean annual values of evaporation and runoff (a) and the removal of nitrogen and phosphorus (b) in the process of reforestation after cutting 50 % of the forest area in Big Velmuksa catchment.

многолетних натурных наблюдений. При этом продолжительность лесовосстановления для рассматриваемого объекта составляет около 80 лет.

В соответствии с результатами моделирования гипотетическая вырубka 50 % леса на водосборе р. Бол. Велмуксы может привести к резкому снижению листового опада и, соответственно, к снижению выноса биогенных элементов, образующихся в результате его разложения. Для условий проведенной имитации первоначальный вынос снизится для азота на 7,3 т/год (34 % от уровня 2018 г.) и для фосфора на 0,17 т/год (33 % от уровня 2018 г.). Далее, по мере лесовосстановления, через 55 лет значения выноса азота и фосфора восстановятся до уровня 2018 г. Затем последует небольшое увеличение как стока, так и выноса биогенных элементов, связанное с продолжением лесовосстановления хвойных пород вплоть до 80-го года после вырубki. Максимального возможного снижения показателей выноса можно ожидать в первые годы после 100 %-ной вырубki — 14,3 тN/год и 0,35 тP/год.

Полученные оценки изменений стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора в результате вырубki являются весьма приближенными, так как не учитывают ряд важных процессов, влияющих как на сток, так и на вынос азота и фосфора. Не учитываются изменения таксационных характеристик леса в процессе лесовосстановления, а также резкое возрастание эрозии и связанного с ней выноса химических веществ в первый год после вырубki за счет нарушения структуры поверхностного слоя почв. После вырубki возрастает вероятность возникновения «запирающего слоя», возникающего при промерзании поверхностного слоя почвы и переводящего талый сток в поверхностную составляющую. Отсутствие запирающего слоя в лесу приводит к снижению максимальных расходов

в период снеготаяния и увеличению меженного стока. Учет этих и других факторов, влияющих на сток и вынос биогенных элементов с водосбора, требует проведения серьезных натурных исследований, для которых необходимы соответствующие материальные затраты, а также высокая квалификация специалистов. Тем не менее представленные в настоящей статье результаты позволяют сделать предварительную оценку максимальных возможных изменений стока и выноса биогенных элементов с лесных водосборов как при реальных, так и при гипотетических масштабах вырубки леса. Принципиальных изменений результатов моделирования едва ли стоит ожидать даже при учете в расчетах перечисленных выше особенностей и закономерностей изучаемых процессов.

Сейчас трудно представить, что на таких достаточно крупных водосборных площадях будут проводиться сплошные рубки. Тем не менее, по данным работы [19], в настоящее время лесами в бассейне Онежского озера покрыто уже всего 54 % площади водосбора. Представленные в настоящей работе оценки позволяют количественно судить о возможных экстремальных изменениях стока и выноса азота и фосфора в экстремальных условиях ведения лесного хозяйства. Если же будет стоять задача оценить последствия сплошной вырубки на единичной лесосеке, то результаты гипотетических расчетов 100 %-ной вырубки приобретут вполне реальное практическое воплощение.

Заключение

- Предложенная относительно простая модель формирования стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора позволяет описывать изучаемые процессы в динамике и с достаточной степенью адекватности существующим экспериментальным данным.

- Имитационное моделирование проведения сплошной вырубки на расчетной лесосеке выбранного экспериментального водосбора р. Бол. Велмуксы, площадь которой составляет 0,9 % общей площади, не дали визуального эффекта как по изменению гидрографа стока, так и сокращению выноса азота и фосфора с водосбора. Изменения расчетных величин не превосходят доли процента от первоначальных значений. Полученный результат объясняется тем, что объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека, если она выполняется в соответствии с действующими правилами.

- Имитационное моделирование последствий гипотетической вырубки 50 и 100 % площади леса на экспериментальном водосборе позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов. Так, после 100 %-ной вырубки леса можно ожидать увеличение стока с водосбора на 48 мм/год и снижение выноса на 14,3 тN/год и 0,35 тP/год. Продолжительность последующего лесовосстановления и связанного с ним возрастания выноса азота и фосфора, обусловленного увеличением листового опада, составит около 80 лет.

• Следует отметить, что одним из наиболее перспективных направлений развития настоящего исследования является модельная оценка возможных изменений стока и выноса биогенных элементов с лесных водосборов в результате климатических изменений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета в рамках проекта FP7 ERA — Net Sumforest-POLYFORES (идентификатор проекта RFMEFI61618X0101), средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН), а также темы № 0154-2019-0001 государственного задания Института озераведения РАН «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Acknowledgments

This work was financially supported by the federal budget in the framework of the FP7 ERA project – Net Sumforest-POLYFORES (project identifier RFMEFI61618X0101), federal budget funds to fulfill the state task of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Forest Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences), and state task No. 0154-2019-0001 of the state assignment of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences “Comprehensive assessment of the dynamics of ecosystems of Lake Ladoga and its basin under the influence of natural and anthropogenic factors.”

Список литературы

1. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 118 с.
2. Федоров С.Ф. Определение транспирации еловыми насаждениями по коэффициенту транспирационной активности // Труды ГГИ. 1981. Вып. 279. С. 32—34.
3. Карпечко Ю.В., Лозовик П.А., Федорец Н.Г. Баланс химических элементов в сосняке и ельнике Карелии // Лесоведение. 2018. № 2. С. 107—118.
4. Кондратьев С.А., Карпечко Ю.В., Шмакова М.В., Расулова А.М., Родионов В.З. Опыт экспериментальных исследований и математического моделирования воздействий вырубки леса и последующего лесовосстановления на сток и вынос химических веществ с лесных водосборов // Региональная экология. 2019. № 1 (55). С. 25—53. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-1-25-53.
5. Федоров С.Ф., Марунин С.В. Гидрологическая роль леса // Обзорная информация. Сер. Гидрология суши. 1985. Вып. 2. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД. 43 с.
6. Лесохозяйственный регламент Пудожского лесничества Республики Карелия на 2012—2021 гг. Петрозаводск, 2011. 149 с.
7. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоем // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 55—65.
8. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем. СПб: Нестор-История, 2019. 246 с.
9. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор — водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб: Нестор-История, 2010. 116 с.

10. Кондратьев С.А., Арвола Л., Хакала И., Алябина Г.А., Маркова Е.Г. Оценка стока воды, выноса фосфора и органического вещества с малых водосборов Северо-Запада России и Финляндии (по данным математического моделирования) // Известия РГО. 2003. Т. 135, вып. 6. С. 29—36.
11. Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Расчет фитомассы древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 77—81.
12. Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Особенности формирования листового аппарата и транспирации хвойного древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2014. № 4 (141). С. 78—84.
13. Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Родионов В.З., Шмакова М.В. Особенности формирования испарения в различных по возрасту, условиям произрастания и продуктивности лесах // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). 2020 № 1 (58). С. 49—67.
14. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 277 с.+
15. Parzych A., Trojanowski J. Precipitation and duff fall as natural sources of nitrogen and phosphorus for forest soils in the Slowinski National Park // Baltic coastal zone. 2006. No 10. P. 47—59.
16. Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Tiina M., Nieminen T.M. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland // Boreal Environment Research. 2008. No 13. P. 67—91.
17. Ninemets Ü, Tamm Ü Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands // Tree Physiology. No 25. P. 1001—1014.
18. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2003. 240 с.
19. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Лозовик П.А., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования // Известия РГО. 2016. Т. 148, вып. 5. С. 53—63.

References

1. Krestovskij O.I. Vliyaniye vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek. Impact of deforestation and reforestation on river water availability. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986: 118 p. [In Russian].
2. Fedorov S.F. Determination of transpiration by spruce stands by the coefficient of transpiration activity. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*. Proceedings of the State Hydrological Institute. Proc. 1. 1981, 279: 32—34. [In Russian].
3. Karpechko YU.V., Lozovik P.A., Fedorec N.G. Balance of chemical elements in the pine and spruce forests of Karelia. *Lesovedenie*. Forest science. 2018, 2: 107—118. [In Russian].
4. Kondratyev S.A., Karpechko YU.V., SHmakova M.V., Rasulova A.M., Rodionov V.Z. Experience of experimental research and mathematical modeling of impacts of deforestation and subsequent reforestation on the flow and removal of chemicals from forest catchments. *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2019, 1 (55): 25—53. [In Russian].
5. Fedorov S.F., Marunich S.V. The hydrological role of the forest. Overview information. Series: hydrology of the land. Issue 2. Obninsk, 1985: 43 p. [In Russian].
6. Lesohozyajstvennyy reglament Pudozhskogo lesnichestva Respubliki Kareliya na 2012—2021 gg. Forestry regulations of the Pudozhsky forest district of the Republic of Karelia for 2012—2021. Petrozavodsk, 2011: 149 p. [In Russian].
7. Kondratyev S.A., SHmakova M.V. Deterministic-stochastic modeling of mass transfer in the catchment-reservoir system. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2018, 11 (4): 55—65. [In Russian].
8. Kondratyev S.A., SHmakova M.V. Matematicheskoe modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor — vodotok — vodoem. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment — watercourse — reservoir system. SPb: Nestor-History. 2019: 246 p. [In Russian].
9. Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.Yu. Modelirovaniye abioticheskikh processov v sisteme vodosbor — vodoem (na primere CHudsko-Pskovskogo ozera). Modeling of

- abiotic processes in the catchment-reservoir system (on the example of Lake Peipsi). SPb: Nestor-History. 2010: 116 p. [In Russian].
10. Kondratyev S.A., Arvola L., Hakala I., Alyabina G.A., Markova E.G. Estimation of water runoff, removal of phosphorus and organic matter from small catchments in the North-West of Russia and Finland (based on mathematical modeling data). *Izvestiya RGO*. News of RGS. 2003, 135 (6): 29—36. [In Russian].
 11. Karpechko YU.V., Myasnikova N.A. The calculation of the phytomass of the forest. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. Scientific notes of Petrozavodsk state University. A series of "Natural and technical Sciences". 2012, 4 (125): 77—81. [In Russian].
 12. Karpechko YU.V., Myasnikova N.A. Features of leaf formation and transpiration of coniferous stands. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. Scientific Notes of Petrozavodsk State University. A series of "Natural and technical Sciences". 2014, 4 (141): 78—84. [In Russian].
 13. Karpechko YU.V., Kondratyev S.A., Rodionov V.Z., Shmakova M.V. Features of evaporation formation in forests of different age, growth conditions and productivity. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2020, 1 (58): 49—67. [In Russian].
 14. Hrisanov N.I., Osipov G.K. *Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov*. Control of eutrophication of reservoirs. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1993: 277 p. [In Russian].
 15. Parzych A., Trojanowski J. Precipitation and duff fall as natural sources of nitrogen and phosphorus for forest soils in the Slowinski National Park. Baltic coastal zone. 2006, 10: 47—59.
 16. Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Tiina M. Nieminen T.M. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Boreal Environment Research*. 2008, 13: 67—91.
 17. Niinemets Ü., Tamm Ü. Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands. *Tree Physiology*. 25: 1001—1014.
 18. Fedorec N.G., Bahmet O.N. *Ecological features of transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils*. Ecological features of transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils. Petrozavodsk: KarSC RAS. 2003: 240 p. [In Russian].
 19. Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Markova E.G., Lozovik P.A., Bryukhanov A.YU., Chichkova E.F. Nutrient load on Lake Onega from diffuse sources according to the results of mathematical modeling. *Izvestiya RGO*. Proc. of the Russian Geographical Society. 2016. 148 (5): 53—63. [In Russian].

Статья поступила 23.04.2020
Принята к публикации 04.06.2020

Сведения об авторах

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией математических методов моделирования Института озерадения РАН, kondratyev@limno.org.ru

Карпечко Юрий Васильевич, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник Института леса Карельского научного центра РАН, kar@nwpi.krc.karelia.ru

Шмакова Марина Валентиновна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования Института озерадения РАН, m-shmakova@yandex.ru

Information about authors

Kondratyev Sergei Alekseevich, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), chief of the laboratory of mathematical modeling methods of the Institute of Limnology of RAS

Karpechko Yuriy Vasilievich, Grand PhD (Geog. Sci.), lead researcher of Institute of Forest, Karelia Research Center RAS

Shmakova Marina Valentinovna, PhD (Tech. Sci.), senior researcher of the laboratory of mathematical modeling methods of the Institute of Limnology of RAS

УДК 551.465

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-67-83

Оценка глубины зимней конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря и методы ее оценки

В.С. Травкин, Т.В. Белоненко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, btvlisab@yandex.ru

Рассчитана глубина зимней конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря по данным океанического реанализа GLORYS12V1 за период 1993—2018 гг. Для оценивания глубины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) применяются два независимых метода: Кара и Монтегута. Построены среднемесячные (декабрь — апрель) карты глубины ВКС. Показано, что максимальные значения глубины ВКС отмечаются в районе расположения Лофотенского вихря. Установлено, что в марте глубокая конвекция максимальна: глубина ВКС достигает 400—500 м (в другие месяцы 200—400 м). Наблюдается тенденция увеличения глубины ВКС к северу и северо-западу акватории. Показано, что метод Монтегута дает заниженные оценки глубины ВКС по сравнению с методом Кара.

Ключевые слова: Лофотенская котловина, зимняя конвекция, глубина верхнего квазиоднородного слоя, ВКС, Лофотенский вихрь.

Mixed layer depth in winter convection in the Lofoten Basin in the Norwegian Sea and assessment methods

V.S. Travkin, T.V. Belonenko

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

We calculate the depth of winter convection in the Lofoten Basin in the Norwegian Sea using the oceanic reanalysis GLORYS12V1 data for the period 1993 to 2018. Two independent methods are used to estimate the depth of the mixed layer depth (MLD). We call the first method as the Kara method and the second one as the Montegut method. We build the monthly average maps of the MLD for the period from December to April. The maximum values of the MLD are observed in the area of the Lofoten Vortex. The MLD is maximal in March reaching 400-500 m, and 200 to 400 m in the other months. The MLD tends to increase in the northern and northwestern parts of the study area. We show the estimates of the MLD obtained by the Montegut method to be underestimated in comparison with the estimates by the Kara method. We estimate coefficients of the linear trend for monthly averaged MLD values from December to April for the period 1993 to 2018. We demonstrate in the interannual variability that the winter convection decreases in December, January, and February at the end of the study period, but it increases in March and April. This means a shift in the periods of maximum development of winter convection to a later date. This shift may be due to the processes of global warming. There is a significant intra-monthly variability when the values of the MLD can differ by 1.5-2 times during a month. Since the methods by Kara and Montegut are based both on empirical criteria, the estimates of MLD in the Lofoten Basin differ from each other. However, the empirical approaches for MLD estimates make it impossible to determine the advantages of one method relative to another.

Keywords: Lofoten Basin, winter convection, mixed layer, mixed layer depth, MLD, Lofoten Vortex.

For citation: V.S. Travkin, T.V. Belonenko. Mixed layer depth in winter convection in the Lofoten Basin in the Norwegian Sea and assessment methods. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 67—83. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-67-83

Введение

Лофотенская котловина является топографически обособленным образованием и ограничена хребтами Мона на северо-западе, Хельгеланд на юго-западе, Скандинавским полуостровом на востоке и плато Воринг на юге (рис. 1). Особенностью Лофотенской котловины является высокая мезомасштабная активность и существование в ее наиболее глубоководной части квазипостоянного антициклонического Лофотенского вихря [1—7]. Одной из причин, влияющих на стабильность Лофотенского вихря, является глубокая зимняя конвекция, являющаяся механизмом его ежегодной регенерации.

В работе [8] автор, используя MITgcm и метод расчета глубины верхнего квазигомогенного слоя (ВКС), описанный в работе [9], показал, что глубокая конвекция в зимний период 1997—2004 гг. в районе Лофотенского вихря была способна

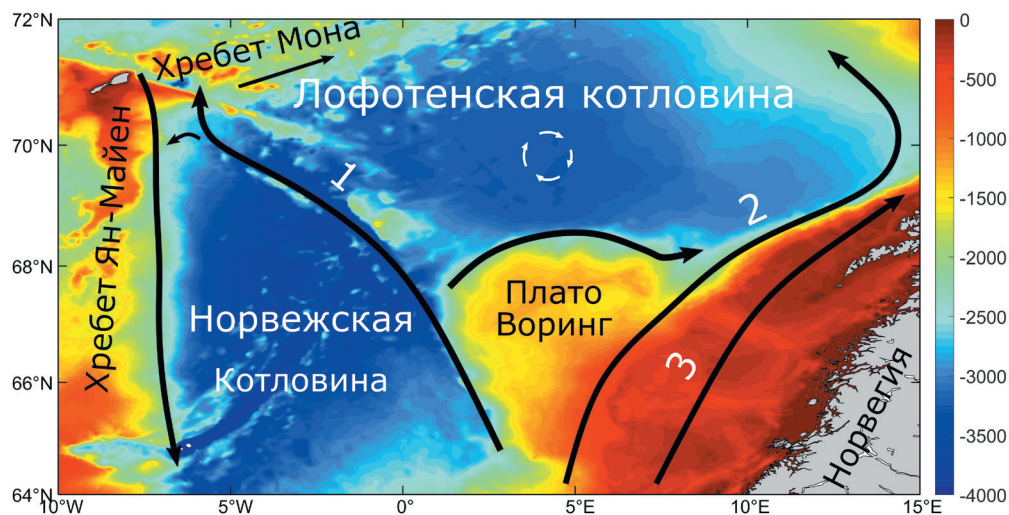


Рис. 1. Район исследования.

Цветовая шкала — донная топография (м). Стрелками обозначены основные течения: 1 — Норвежское фронтальное течение, 2 — Норвежское склоновое течение, 3 — Норвежское прибрежное течение. Белой окружностью со стрелками отмечено местоположение квазипостоянного антициклонического Лофотенского вихря.

Fig. 1. The study area.

The color indicates bottom topography (m). The arrows indicate the main currents. 1 — Norwegian Frontal Current, 2 — Norwegian Slope Current, and 3 — Norwegian Coastal Current. The white circle marks the location of the quasi-permanent anticyclonic Lofoten Vortex.

достигать глубины более 1000 м. Подобные аномальные оценки глубины конвекции в зимний период были даны в работе [10], где авторы опирались на данные натурных съемок, а также в работе [11], где расчет глубины ВКС для периода 1993—2012 гг. производился по данным MITgcm и буев ARGO при использовании метода Духовского [12].

Приток теплых и соленых вод в промежуточном слое препятствует развитию глубокой конвекции [13], что характерно для зимнего периода морей субарктической Атлантики и Северного Ледовитого океана, где в приповерхностном и промежуточном слое распространены теплые и соленые атлантические воды [10]. В районе Лофотенской котловины повсюду за исключением самой глубоководной части зимняя конвекция достигает глубины более 400—600 м, но интенсивность ее выше внутри антициклонических мезомасштабных вихрей, и особенно в районе расположения Лофотенского вихря [8, 14].

В последние десятилетия были предприняты первые попытки подсчета глубины ВКС с использованием спутниковых данных. Впервые алгоритм для определения глубины перемешанного слоя по спутниковым данным был предложен в работе [15], авторы которой использовали метод термической инерции, позволяющий определить глубину ВКС по «температурному отклику» поверхности, подверженной воздействию изменяющегося во времени потока тепловой энергии. Термическая инерция связана с высокой теплоемкостью морской воды, для которой характерен небольшой диапазон температурных измерений. Для Мирового океана формула термического отклика имеет следующий вид:

$$\delta T = \frac{2Q}{\sqrt{\omega}} TI,$$

где Q — поверхностный тепловой поток; ω — частота измерений; TI — тепловая инерция (показывающая, насколько медленно температура тела приближается к температуре окружающей среды и которая зависит от поглощающей способности этого тела, его удельной теплоемкости, теплопроводности, размеров и других факторов). К сожалению, предложенный алгоритм имел низкую точность для северных районов.

Авторы работы [16] сформулировали простую статистическую модель для прогнозирования вариаций ВКС по параметрам ветрового перемешивания с использованием скорости ветра (U), периода (T_s) и высоты (H_s) волны, в результате чего глубина ВКС (H) рассчитывается по следующей формуле:

$$H = 12,5H_s + 0,2UT_s.$$

Результаты, полученные с использованием данной формулы, сравнивались с эмпирическими оценками ВКС, полученными с использованием измерений буев Argo в Индийском океане. Рассчитанные значения коэффициента корреляции достигали 0,72 для объединенной выборки за летний период, что свидетельствует о хорошем соответствии полученных результатов натурных и спутниковых измерений. К сожалению, данный метод нельзя применять для оценки глубины ВКС в высоких широтах.

Первыми предложили использовать альтиметрические измерения для мониторинга глубокой конвекции в океане авторы работы [17]. Дальнейшее развитие этого подхода дано в работе [18], где предложен оригинальный механизм определения районов глубокой конвекции по минимальным значениям аномалий стериических колебаний уровня с использованием комбинированных данных альтиметрических и гравиметрических спутниковых измерений GRACE за 2003—2015 гг. В работах [19, 20] для определения глубокой конвекции был разработан диагностический подход на основе серии климатических индексов.

Для регионов, расположенных в высоких широтах, для определения глубины ВКС хорошо себя зарекомендовал метод Духовского [11, 12]. В этом методе нет заранее заданного критерия разности плотностей, а за глубину ВКС принимается такая глубина, на которой локальный градиент плотности $\left| \frac{d\sigma}{dz} \right|$ (где z — глубина)

больше n среднеквадратических отклонений градиента потенциальной плотности в слое ± 100 м от глубины h : $[(h - 100), (h + 100)]$. В работе [11] показано, что для метода Духовского наилучшими были результаты, полученные при $n = 2$.

По данным работ [4, 11, 21], процесс заглубления ВКС в Лофотенской котловине начинается в конце ноября — начале декабря, и уже к концу декабря достигает значений более 100 м. Максимальной глубины ВКС достигает в марте, и, согласно [11], даже в мае в отдельные годы фиксируются значительные глубины ВКС. В летний период глубина ВКС составляет всего лишь 20 м [14, 22]. Глубина ВКС в районе Лофотенской котловины увеличивается в направлении с востока на запад. Так, несмотря на то что температура вод Норвежского склонового течения довольно высокая, вблизи континентального склона Норвегии за счет вод меньшей солености (достигающей значений менее 35) глубина ВКС в зимний период не превышает 300 м [14]. Отмечается, что из-за продолжительного нахождения вод в районе плато Воринг, в данной области фиксируется наличие перемешанного слоя на глубине более 320 м [23]. В работе [24] указывается, что за период с 1949 по 2008 г. глубина зимней конвекции в центральном районе Лофотенской котловины, где расположен квазипостоянный Лофотенский вихрь, достигала 580 м, что близко к значениям, полученными в работе [25], однако превышает полученное ранее в исследовании [14] значение максимальной глубины ВКС, равное 520 м.

Заглубление ВКС в Лофотенской котловине исследуется по данным глайдеров. Установлено, что глубина ВКС начинает увеличиваться уже в середине октября, достигая максимальных значений 593 ± 51 м в период март — середина апреля [25]. В работе [26] анализируются данные для сектора Svinøy в Норвежском море, состоящего из 17 гидрологических станций вблизи побережья Норвегии, за период с 1955 по 1996 г. Авторы отмечают, что изменения температуры и солености вод в Норвежском море имеют отрицательную корреляцию с индексом Северо-Атлантического колебания (САК), численно равного разности атмосферного давления приземного слоя воздуха между исландским минимумом и азорским максимумом. Подобная взаимосвязь объясняется тем, что во время положительного индекса САК происходит приток большого объема атлантических вод в восточную ветвь Норвежского течения, представленного Норвежским склоновым

течением. Так, более теплые и соленые атлантические воды распространяются западнее, чем обычно, через 2—3 года после периода с низким индексом САК, в то время как в случае высокого индекса САК увеличивается распространение атлантических вод в восточном направлении. Стоит отметить, что интенсивность зимней конвекции, а следовательно, и глубина ВКС изменяются как на синоптических, так и на межгодовых масштабах, что указывается в статьях [14, 25].

В межгодовой изменчивости интенсивности глубокой конвекции в Норвежском море в период 1993—1995 гг. характерно ослабление конвекции, приводящее к уменьшению глубины среднего перемешанного слоя (до 200 м), в то время как в 1971, 1992 и 1997 гг. фиксировалось увеличение интенсивности зимней конвекции и проникновение среднего перемешанного слоя до глубины порядка 400 м [14]. Подобная межгодовая изменчивость объясняется не только форсингом поверхности моря за счет теплообмена и ветрового волнения, но и изменчивостью термохалинных характеристик вод Норвежского течения. Так, в период 1969—1973 гг., когда наблюдалось заглупление изохалины 35, до глубины примерно 500 м, происходило увеличение глубины перемешанного слоя в результате зимней конвекции. В результате конвекции в зимний период происходит насыщение глубинных вод кислородом [14]. В период с 2012 по 2015 г. наблюдалось повышение температуры внутри ядра Лофотенского вихря от 4,97 до 5,23 °C, а также уменьшение солёности атлантических вод от 35,3460 до 35,2960. Подобное изменение термохалинных характеристик является одной из причин более слабого по сравнению с зимним периодом 2014 г. развития глубокой конвекции в 2015 г. в области Лофотенского вихря. Кроме того, это изменение способствовало формированию в зимний период 2015 г. более теплой (+0,4 °C) и менее солёной (–0,03) верхней части ядра Лофотенского вихря [25].

В результате зимней конвекции ядро Лофотенского вихря подпитывается свежими поверхностными водами, являющимися более теплыми, чем нижележащие слои, однако при этом более плотными за счет инверсионного распределения солёности по вертикали [10]. В период с августа по сентябрь наблюдается ослабление поступления солнечной радиации на поверхность моря и увеличение интенсивности ветрового воздействия, что способствует постепенному развитию процесса конвекции и разрушению сезонного пикноклина, интенсивность которого зависит от теплообмена с атмосферой и ветрового воздействия [14]. Это воздействие способствует установлению в целом близкой к нейтральной плотностной стратификации, когда частота Вайсяля — Брента становится ничтожно мала ($1,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$). В результате возобновляется контакт ядра Лофотенского вихря с поверхностью океана, и складываются предпосылки для его будущей регенерации за счет зимней конвекции в осенне-зимний сезон [4].

Таким образом, в результате глубокой зимней конвекции теплое ядро Лофотенского вихря ежегодно обновляется свежими поверхностными водами, проникающими в годы интенсивной конвекции до глубины более 1000 м [11]. Максимально развиваясь к концу зимы, конвекция способствует увеличению горизонтальных градиентов термохалинных характеристик в центральной части Лофотенского вихря и возрастанию скорости орбитального движения [4].

Теплые и соленые атлантические водные массы,двигающиеся на север через Лофотенскую котловину, являются важным элементом Атлантической меридиональной термохалинной циркуляции (Atlantic Meridional Overturning Circulation, АМОС) — главного компонента глобальной океанической циркуляции [27].

Таким образом, в связи с важностью процессов, происходящих в Лофотенской котловине Норвежского моря, целью нашей работы является исследование глубокой конвекции в акватории. Поскольку методы оценки глубины ВКС являются эмпирическими, мы также проводим сравнение двух наиболее популярных методов, примененных для оценки глубины ВКС в этом бассейне.

Данные

Мы использовали данные GLORYS12V1, доступные на сайте CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) по ссылке <http://marine.copernicus.eu>. GLORYS12V — это глобальный океанический вихреразрешающий реанализ, основанный на модели NEMO, разработанный с использованием атмосферного реанализа ECMWF ERA-Interim. Начальные условия для температуры и солёности взяты из данных EN.4.2.0 Hadley Center для 1991 г.

Неоспоримым преимуществом реанализа GLORYS12V1 является ассимиляция спутниковых и *in situ* данных. В частности, более 5000 профилей поплавков Argo ассимилированы в продукте GLORYS12V. Ассимилируются также вдольтрековые аномалии уровня моря (SLA, Sea Level Anomalies), температура поверхности моря (SST, Sea Surface temperature), данные по льду, а также профили температуры и солёности из базы данных CMEMS CORAv4.1 начиная с 2005 г. Для ассимиляции применяется фильтр Калмана.

Данные доступны с ежесуточной и месячной дискретностью. Использовались ежесуточные данные GLORYS12V1 о температуре и солёности на 50 горизонтах с пространственным разрешением $1/12^\circ$, что составляет приблизительно 4×8 км для высоких широт. Исследуемый период 1993—2018 гг.

Методы исследования

В настоящий момент существует несколько способов расчета глубины ВКС, среди которых традиционно принято выделять два основных метода, основанных на градиентах плотности.

Метод Монтегута [28] позволяет определить глубину перемешанного слоя как значение глубины, при котором градиент плотности воды превышает значение для заданной плотности:

$$\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta z} = \left(\frac{\partial\sigma_t}{\partial z} \right)_c,$$

где $\Delta\sigma_t$ — это разница условной плотности $\sigma_t = (\rho - 1000)$ кг·м⁻³ на вертикальном расстоянии Δz , ρ — плотность воды, а $\left(\frac{\partial\sigma_t}{\partial z} \right)_c$ — заданный заранее градиент

условной плотности. Этот метод может использоваться только для профилей с высоким разрешением по вертикали.

По методу Кара [9] глубина ВКС определяется как глубина горизонта, на котором температура воды изменилась на определенное значение по сравнению с поверхностью моря. Так, эмпирический критерий плотности морской воды равен разности между плотностью воды на поверхности моря $\sigma(T_r, S_r)$, где T_r и S_r — температура и соленость на поверхности, и $\sigma(T_h, S_h)$ — плотностью воды с той же соленостью, но при температуре, которая на определенное значение меньше, чем на поверхности моря:

$$\Delta\sigma = \sigma(T_r, S_r) - \sigma(T_h, S_h),$$

где $T_h = (T_r - 0,1)$ — температура воды на исследуемом горизонте, а $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ — критерий изменения температуры.

Первый (самый верхний) горизонт, на котором разность значений плотности с выбранным горизонтом превышает $\Delta\sigma$, считается глубиной ВКС. Данный метод учитывает нелинейный эффект уравнивания состояния морской воды, так как значение критерия зависит от солености и температуры воды во время измерения [14]. Подробное описание этого метода дано в работе [9], в которой авторы на основе эмпирического исследования множества вертикальных профилей отмечают, что наиболее оптимальное значение критерия температуры воды для поиска глубины перемешанного слоя в большинстве районов Мирового океана равно $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако в работе отмечается, что необходимо тщательно подбирать критерии для определения глубины ВКС, принимая во внимание гидрологические условия в районе исследования, а также учитывая состояние среды, в которой находится перемешанный слой.

Результаты

Сезонная изменчивость

Авторами была рассчитана глубина ВКС за различные месяцы зимней конвекции за период с 1993 по 2018 г. Расчеты проводились по двум методикам: с использованием метода разности Кара [9] и с помощью градиентного метода Монтегута [14, 28]. Данные о температуре и солености воды интерполировались на сетку с шагом 10 м по вертикали и затем осреднялись со скользящим окном 20 м по вертикали.

При расчетах по первому методу (Кара) в качестве температурного критерия принималось значение, которое было на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше по сравнению с температурой на горизонте 10 м. В работе [11] для метода Кара использовался аналогичный критерий.

При использовании второго метода (Монтегута) за глубину ВКС принимался горизонт, на котором условная плотность отличалась на $0,03\text{ кг/м}^3$ от значения на горизонте 10 м (см. также [14, 25]).

Полученные двумя независимыми методами оценки ВКС осреднялись за период с 1993 по 2018 г. Проследим изменения глубины ВКС в Лофотенской котловине для зимних месяцев.

На рис. 2 *а* и *б* приведены полученные оценки глубины ВКС для декабря. Видно, что для большей части акватории глубина ВКС, рассчитанная двумя методами, не превышает 200—300 м. Максимальное значение (300 м) зафиксировано в районе расположения Лофотенского вихря. Также стоит отметить, что оценки глубины ВКС, полученные по методу Кара (см. рис. 2 *а*), в целом превышают оценки, полученные градиентным методом Монтегута (см. рис. 2 *б*).

В дальнейшем глубина ВКС увеличивается: в январе в центральной части Лофотенской котловины значения превышают 300—400 м (см. рис. 2 *в* и *г*). Максимальные значения наблюдаются в районе Лофотенского вихря, а также в северной части котловины. Оценки ВКС по методу Кара по-прежнему выше.

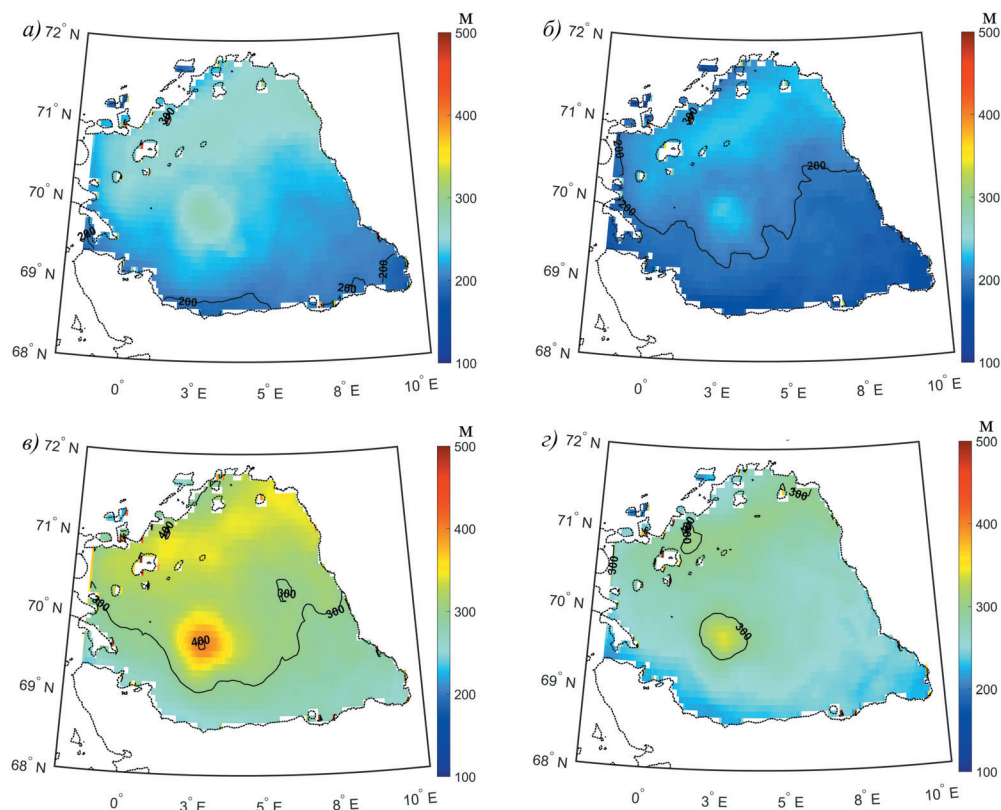


Рис. 2. Глубина ВКС (м) в Лофотенской котловине, рассчитанная с помощью методов Кара (слева) и Монтегута (справа) для декабря (*а* и *б*) и января (*в* и *г*).

Осреднение данных за период 1993—2018 гг.

Fig. 2. The Mixed Layer Depth (m) in the Lofoten Basin, calculated using the Kara (left col.) and Montegut (right col.) methods: December (*a* and *b*) and January (*v* and *z*).

Averaging data for the period 1993 to 2018.

В феврале глубина ВКС по сравнению со значениями в декабре и январе увеличивается, достигая 300—450 м в центральной части Лофотенской котловины. Кроме того, в северной и северо-западных частях котловины наблюдаются значения глубины, превышающие 400 м (рис. 3 а и б).

К марту интенсивность глубокой конвекции в Лофотенской котловине достигла максимума: глубина ВКС превысила 400—500 м в центральной части котловины в области расположения Лофотенского вихря и увеличена в северной и северо-западных частях акватории (рис. 3 в и г).

К апрелю глубина ВКС существенно уменьшается по сравнению с мартом, что свидетельствует о резком снижении интенсивности процесса глубокой конвекции. В центральной части Лофотенской котловины глубина ВКС превышает 300 м по данным расчета по методу Кара (рис. 3 д) и 200 м по данным расчета по методу Монтегута (рис. 3 е).

В мае зимняя глубокая конвекция, рассчитанная предложенными методами по данным GLORYS12V1, практически не выражена.

Заметим, что оба метода оценки глубины ВКС в Лофотенской котловине демонстрируют приблизительно одну и ту же тенденцию: зимняя конвекция усиливается с декабря по март, области с максимальными значениями ВКС расположены примерно одинаково. В марте зимняя конвекция наиболее интенсивна: глубина ВКС достигает максимальных значений, а к апрелю конвекция ослабевает.

Таким образом, сравнение показывает, что для всех зимних месяцев оценки по методу Кара превышают оценки по методу Монтегута.

Межгодовая изменчивость

С целью исследования межгодовой изменчивости глубины ВКС для рассматриваемых месяцев авторами были построены графики временного хода значений глубины ВКС, рассчитанных за каждые сутки и осредненных по площади акватории. В качестве примера на рис. 4 приведены графики для февраля и марта. В табл. 1 представлены коэффициенты линейных трендов; все представленные тренды являются значимыми.

Из рис. 4 видно, что для всех лет характерно существенное изменение глубины ВКС в течение месяца. Это означает, что существует выраженная внутримесячная изменчивость значений глубины ВКС. Выяснилось, что внутримесячная изменчивость возрастает с декабря по апрель. Это видно уже при сравнении рис. 4 а и б с рис. 4 в и г: внутримесячная изменчивость в марте больше, чем в феврале. Максимальная внутримесячная изменчивость отмечается в апреле (не показано), что, возможно, связано с наибольшими колебаниями интенсивности атмосферного форсинга и значительным изменением температуры воды и атмосферы в течение этого месяца. Разнонаправленные тренды свидетельствуют о сдвиге периода максимального развития конвекции с зимы на весну.

Из табл. 1 видно, что зимняя конвекция в декабре — феврале в течение периода 1993—2018 гг. постепенно ослабевает (см. также рис. 4 а и б), тренды глубины ВКС отрицательные. Однако начиная с марта (см. рис. 4 в и г) наблюдается положительный тренд и усиление глубокой конвекции к концу рассматриваемого периода.

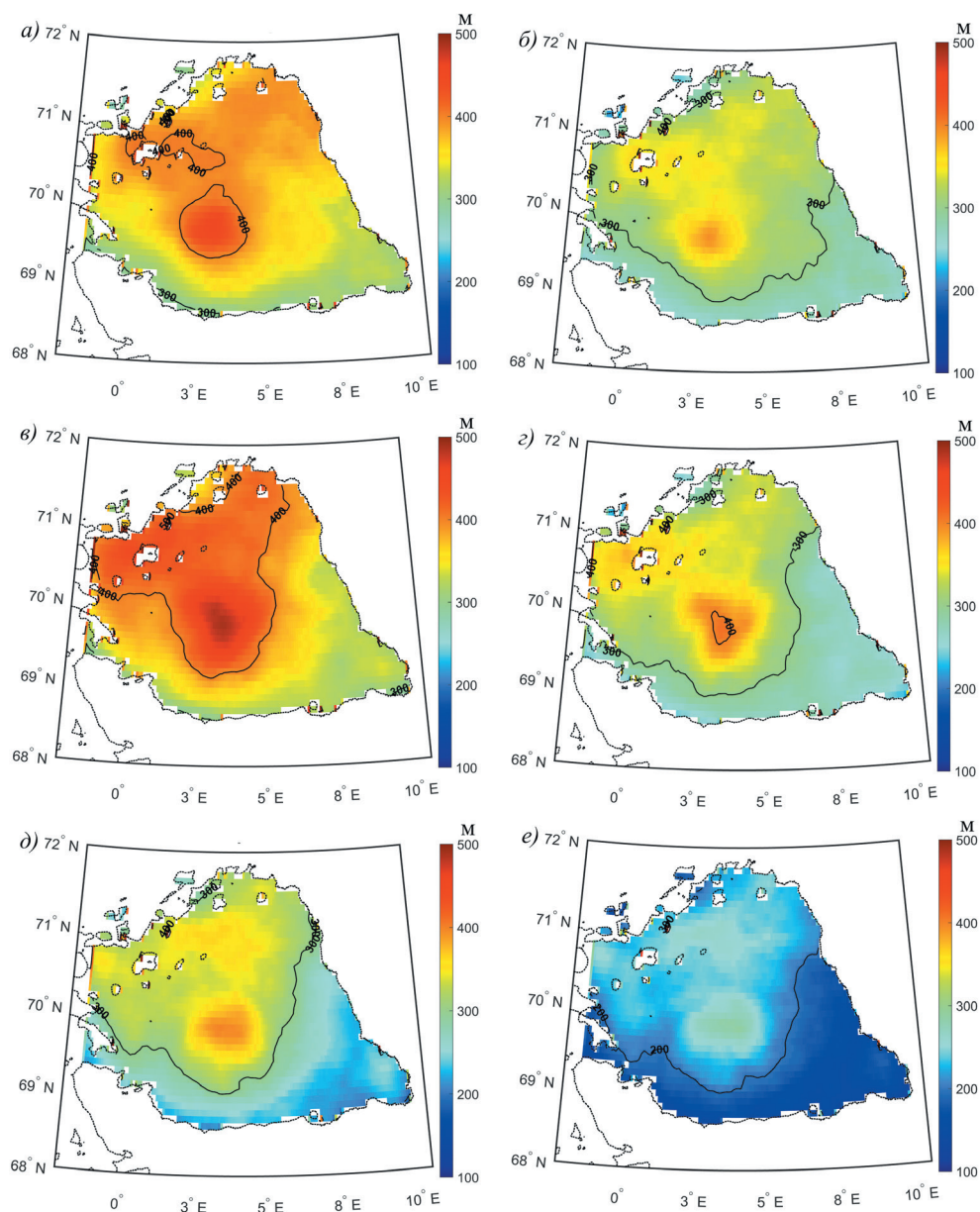


Рис. 3. Глубина ВКС (м) в Лофотенской котловине, рассчитанная с помощью методов Кара (слева) и Монтегута (справа) для февраля (*a* и *б*), марта (*в* и *з*) и апреля (*д* и *е*).

Осреднение данных за период 1993—2018 гг.

Fig. 3. The Mixed Layer Depth (m) in the Lofoten Basin, calculated using the Kara (left col.) and Montegut (right col.) methods: February (*a* and *б*), March (*в* and *з*) and April (*д* and *е*).

Averaging data for the period 1993 to 2018.

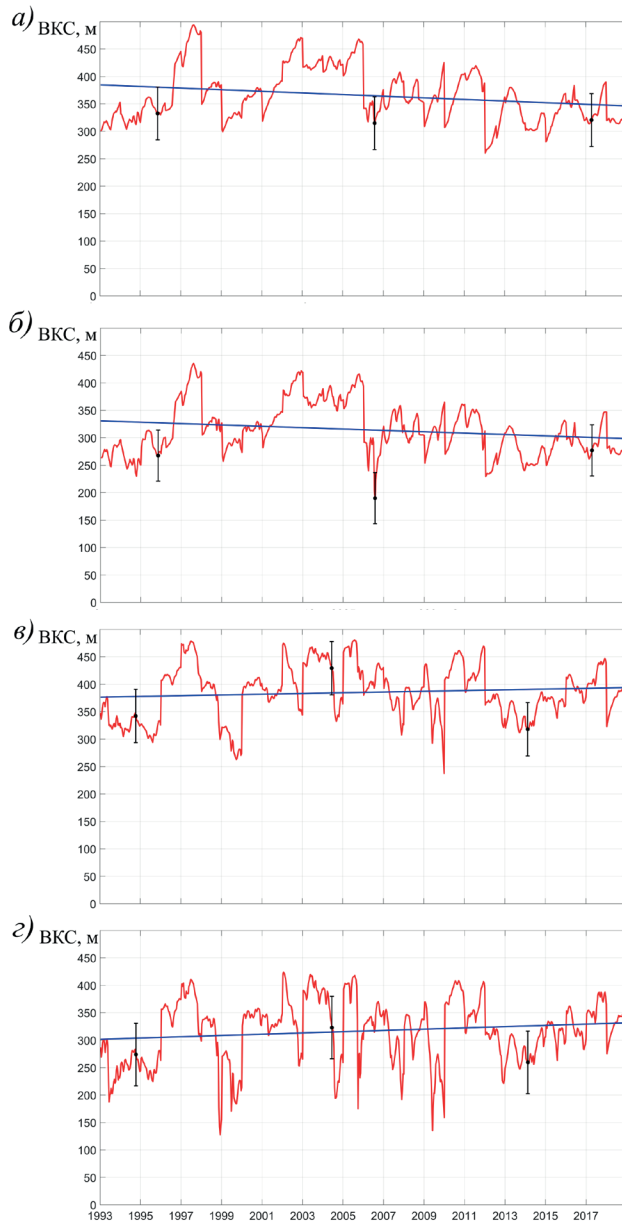


Рис. 4. Временной ход осредненной по площади Лофотенской котловины глубины ВКС (м) (красная кривая), рассчитанный с помощью методов Кара (слева) и Монтегута (справа) в феврале (а и б) и марте (в и г), а также линейный тренд (синяя прямая).

Черными отрезками показано среднеквадратическое отклонение.

Fig. 4. The time variability of the Mixed Layer Depth averaged over the area of the Lofoten Basin (m) (red line), calculated using the Kara (left col.) and Montegut (right col.) methods: February (a and б), March (в and г), and the linear trends (blue solid lines). The black bars indicate the standard deviation.

Также стоит отметить и наличие межгодовой изменчивости, когда в отдельные годы зимняя конвекция на всей акватории котловины усиливается или, наоборот, ослабевает. В табл. 2 показаны годы различной интенсивности конвекции в Лофотенской котловине.

Таблица 1

Значение линейного тренда глубины ВКС (м/год)
Coefficients of the linear trend estimated for Mixed Layer Depth (m/year)

Месяц	Метод	
	Кара	Монтегута
Декабрь	–0,85	–0,64
Январь	–0,62	–0,65
Февраль	–1,46	–1,23
Март	0,67	1,15
Апрель	0,51	0,72

Таблица 2

Интенсивность зимней конвекции в различные месяцы за период 1993—2018 гг.
The intensity of winter convection in different months for the period 1993 to 2018

Месяц	Конвекция	
	Слабая	Сильная
Декабрь	1999, 2000, 2006, 2011, 2014	1996, 1997, 2002, 2004, 2005
Январь	1998, 2000, 2012	1997, 2002—2006, 2011
Февраль	2006, 2012	1996, 1997, 2001—2005
Март	1993—1996, 1999, 2000, 2009, 2010	1997—1999, 2002—2006
Апрель	1998, 2002, 2004, 2009, 2018	1996, 2007, 2011, 2017

Обсуждение результатов

Полученные в настоящей работе оценки глубины зимней конвекции в Лофотенской котловине, рассчитанные авторами методами Кара и Монтегута по данным реанализа GLORYS12V1, в целом соответствуют оценкам, полученным в исследовании [11], где глубина ВКС оценивалась методом Духовского [12] по данным ARGO и модельным данным (использовались данные гидродинамического моделирования по модели Массачусетского технологического института MITgcm). В частности, сходство проявляется в том, что в марте глубина ВКС максимальна, а максимумы достигаются в области расположения квазипостоянного Лофотенского вихря. Также отмечается общая тенденция увеличения глубины ВКС в северной и северо-западной части акватории.

Однако в работе [11] получены более высокие значения глубины. Причина заключается не только в использовании разных методов и периодов оценивания, а также в разных исходных данных. В настоящем исследовании оценивались среднемесячные значения глубины ВКС, а авторы работы [11] фокусировались на

получении максимальных значений в течение месяца. Возможно, это объясняет отсутствие в наших результатах распределения за май: по нашим данным зимняя конвекция в мае не выражена. Зато в декабре в настоящей работе отмечены значения глубины ВКС, равные 200—300 м, в то время как в исследовании [11] в декабре зимняя конвекция не выделяется. Таким образом, настоящее исследование дополняет работу [11].

Анализ межгодовой изменчивости и сравнение трендов, рассчитанных двумя независимыми методами, показывает, что в декабре — феврале тренды отрицательные, в то время как в марте — апреле положительные (см. табл. 2 и рис. 4). Разнонаправленные тренды свидетельствуют о сдвиге периода максимального развития конвекции с февраля на более поздний период. Возможно, этот сдвиг может быть обусловлен процессами так называемого глобального потепления (если вода сама по себе теплее, то ей нужно больше времени, чтобы остыть).

Полученные оценки глубины ВКС для Лофотенской котловины неплохо соответствуют оценкам [14, 24, 25], однако рассчитанные методами Кара и Монтегута по среднемесячным данным значения глубины ВКС несколько занижены относительно оценок, полученных по другим данным и другими методами в работе [11], где оцениваются максимальные значения ВКС.

Поскольку оба метода — Кара и Монтегута — основаны на эмпирических критериях, оценки ВКС в Лофотенской котловине несколько различаются, и определить преимущества одного метода относительно другого не представляется возможным.

Выводы

В данной работе с использованием двух независимых эмпирических методов получены оценки глубины зимней конвекции в Лофотенской котловине Норвежского моря по данным океанического реанализа GLORYS12V1 за период 1993—2018 гг. По этим данным построены среднемесячные пространственные распределения глубины ВКС для периода декабрь — апрель. Показано, что максимальные значения глубины ВКС отмечаются в районе расположения Лофотенского вихря. В марте глубокая конвекция достигает максимального развития: глубина ВКС составляет 400—500 м, в другие месяцы — 200—400 м. Наблюдается тенденция увеличения глубины ВКС в северной и северо-западной частях акватории.

Проведено сравнение методов Кара и Монтегута. Установлено, что оценки глубины ВКС, полученные по методу Монтегута, существенно ниже оценок, полученных по методу Кара. Исследована межгодовая изменчивость глубины ВКС методами Кара и Монтегута. Показано, что в течение исследуемого периода (1993—2018 гг.) в январе и феврале линейные тренды отрицательны. Это означает, что к концу рассматриваемого периода глубокая конвекция несколько ослабевает в декабре, январе и феврале. Однако в марте и апреле тренды положительные, и к концу периода наблюдается усиление глубокой конвекции. Смена знака трендов свидетельствует о сдвиге периода максимального развития конвекции на более поздний период, что, возможно, является одним из проявлений глобального потепления.

Показано, что для зимней конвекции в Лофотенской котловине характерна выраженная внутримесячная изменчивость, когда значения глубины ВКС в течение одного месяца могут различаться в два-три раза (см. рис. 4).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-17-00027.

Acknowledgment

This work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 18-17-00027.

Список литературы

1. Белоненко Т.В., Волков Д.Л., Норден Ю.Е., Ожигин В.К. Циркуляция вод в Лофотенской котловине Норвежского моря // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2014. № 2. С. 108—121.
2. Белоненко Т.В., Баимачников И.Л., Колдунов А.В., Куйбин П.А. О вертикальной компоненте скорости в Лофотенском вихре Норвежского моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 53 (6). С. 728—737. doi: 10.7868/S0003351517060071.
3. Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Сентябов Е.В., Карсаков А.Л. Термохалинная структура Лофотенского вихря Норвежского моря на основе экспедиционных исследований и по данным гидродинамического моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. № 63 (4). С. 502—519. doi: 10.21638/spbu07.2018.406.
4. Блошкина Е.В., Иванов В.В. Конвективные структуры в Норвежском и Гренландском морях по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 146—168.
5. Зинченко В.А., Гордеева С.М., Собко Ю.В., Белоненко Т.В. Мезомасштабные вихри Лофотенской котловины по спутниковым данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. № 12 (3). С. 46—54. doi: 10.7868/S2073667319030067.
6. Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. No. 4. P. 738—743. doi: 10.1002/grl.50126.
7. Travkin V.S., Belonenko T.V. Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data // Russian Journal of Earth Sciences. 2019. V. 19. No. 5. ES5004. doi: 10.2205/2019ES000676.
8. Köhl A. Generation and Stability of a Quasi-Permanent Vortex in the Lofoten Basin // J. Phys. Oceanogr. 2007. V. 37. No. 11. P. 2637—2643.
9. Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E. An optimal definition for ocean mixed layer depth // J. Geophys. Res. 2000. No. 105 (C7). P. 16803—16821.
10. Алексеев В.А., Иванов В.В., Репина И.А., Лаврова О.Ю., Станичный С.В. Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Argo // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1—2. С. 90—91.
11. Федоров А.М., Баимачников И.Л., Белоненко Т.В. Зимняя конвекция в Лофотенской котловине по данным буев ARGO и гидродинамического моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. № 64(3). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>.
12. Dukhovskoy, D.S., Chassignet, E.P., Hogan P.J., Metzger E.J., Posey P., Smedstad O. M., Stefanova L.B., Wallcraft A.J. Current State and Recent Changes in the Arctic Ocean from the HYCOM-NCO-DA Global Ocean and Sea Ice Prediction System // GC23H-07, presented at 2016 Fall Meeting. AGU. San Francisco. Calif. 12-16 Dec. 2016.
13. Доронин Ю.П. Физика океана. СПб: РГГМУ, 2000. 340 с.

14. Nilsen J.E., Falck E. Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948–1999 // *Progress in Oceanography*. 2006. No. 70. P. 58—89.
15. Xiao-Hai Y., J.R. Schubel, D.W. Pritchard Oceanic upper mixed layer depth determination by the use of satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 1990. No. 32 (1). P. 55—74. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90098-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90098-7).
16. Swain J., Shukla R.K., Raghunadha Rao A., Panigrahi J.K., Venkitachalam N.R. Observations of wind and waves in the central Bay of Bengal during BOBMEX-99 and their effect on mixed layer depth variability due to forced mixing // *Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*. 2003. 112. No. 2. P. 261—263.
17. Herrmann M., Bouffard J., Béranger K. Monitoring open-ocean deep convection from space // *Geophys. Res. Lett.* 2009. No. 36. P. 606. doi: 0.1029/2008GL036422.
18. Белоненко Т.В., Федоров А.М. Стерические колебания уровня и глубокая конвекция в Лабрадорском море и море Ирмингера. // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 3. С. 56—69.
19. Башмачников И.Л., Федоров А.М., Весман А.В., Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Духовской Д.С. Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 1. Локализация областей конвекции // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 184—194. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194.
20. Башмачников И.Л., Федоров А.М., Весман А.В., Белоненко Т.В., Духовской Д.С. Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 2. Индексы интенсивности конвекции // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 191—201. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-191-201.
21. Voet G., Quadfasel D., Mork K.A., Søiland H. The mid-depth circulation of the Nordic Seas derived from profiling float observations // *Tellus A*. 2010. No. 62 (4). P. 516—529.
22. Richards C., Straneo F. Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas // *J. Phys. Oceanogr.* 2015. V. 45 (6). P. 1735—1737.
23. Poulain P.-M., Warn-Varnas A., Niiler P. Near surface circulation of the Nordic Seas as measured by lagrangian drifters // *J. Geophys. Res.* 1996. No. 101 (C8). P. 18237—18258.
24. Raj R. P., Chafik L., Even J., Nilsen O., Eldevik T., Halo I. The Lofoten Vortex of the Nordic Seas // *Deep-Sea Res. I*. 2015. No. 96. P. 1—14.
25. Yu L.S., Bosse A., Fer I., Orvik K.A., Bruvik E.M., Hessevik I., Kvalsund K. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seagliders // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2017. P. 6814—6825.
26. Mork K.A., Blindheim J. Variation in the Atlantic Inflow to the Nordic Seas, 1955—1996 // *Deep-Sea Research I*. 2000. V. 47 (6). P. 1035—1057.
27. Eldevik T., Nilsen J.E., Iovino D., Olsson K.A., Sandu A.B., Drange H. Observed sources and variability of Nordic seas overflow // *Nature Geosci.* 2009. V. 2. P. 406—410.
28. de Boyer Monte gut, C., Madec G., Fisher A.S., Lazar A., Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. C12003. Doi:10.1029/2004JC002378.

References

1. Belonenko T.V., Volkov D.L., Ozhigin V.K., Norden Yu. E. Circulation of waters in the Lofoten Basin of the Norwegian Sea. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. Proceedings of St. Petersburg University. 2014, 7: 108—121. [In Russian].
2. Belonenko T.V., Bashmachnikov I. L., Koldunov A.V., Kuibin P.A. On the Vertical Velocity Component in the Mesoscale Lofoten Vortex of the Norwegian Sea. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proceedings of the RAS. Physics of the atmosphere and the ocean. 2017, 53 (6): 641—649. <https://doi.org/10.1134/S0001433817060032>. [In Russian].
3. Belonenko T.V., Koldunov A.V., Sentyabov E.V., Karsakov A.L. Thermohaline structure of the Lofoten vortex in the Norwegian Sea based on field research and hydrodynamic modeling. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. Proceedings of St. Petersburg University. 2018, 63 (4): 502—519. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.406>. [In Russian].

4. Bloshkina E.V., Ivanov V.V. Convective structures in the Norwegian and Greenland Seas based on simulation results with high spatial resolution. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. 2016, 361: 146—168. [In Russian].
5. Zinchenko V.A., Gordeeva S.M., Sobko Yu.V., Belonenko T.V. Analysis of Mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. Fundamental and applied hydrophysics. 2019, 12 (3): 46—54. DOI: 10.7868/S2073667319030067. [In Russian].
6. Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin — a sub-Arctic hot spot of ocean variability. *Geophys. Res. Lett.* 2013, 40 (4): 738—743. doi: 10.1002/grl.50126.
7. Travkin V.S., Belonenko T.V. Seasonal variability of mesoscale eddies of the Lofoten Basin using satellite and model data. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019, 19 (5): ES5004. doi: 10.2205/2019ES000676.
8. Köhl A. Generation and Stability of a Quasi-Permanent Vortex in the Lofoten Basin. *Journal of Physical Oceanography*. 2007, 37 (11): 2637—2643.
9. Kara A.B., Rochford P.A., Hurlburt H.E. An optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research*. 2000, 105 (C7): 16803—16821.
10. Alexeev V.A., Ivanov V.V., Repina I.A., Lavrova O.Yu., Stanichny S.V. Convective structures in the Lofoten Basin according to satellite and Argo buoys. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016, 52 (9): 1064—1077. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090036>. [In Russian].
11. Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V. Winter convection in the Lofoten Basin according to ARGO buoys and hydrodynamic modeling. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. Proceedings of St. Petersburg University. 2019, 4 (3): 491—511. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.308>. [In Russian].
12. Dukhovskoy D.S., Chassignet E.P., Hogan P.J., Metzger E.J., Posey P., Smedstad O.M., Stefanova L.B., Wallcraft A.J. Current State and Recent Changes in the Arctic Ocean from the HYCOM-NCODA Global Ocean and Sea Ice Prediction System. GC23H-07, presented at 2016 Fall Meeting. AGU. San Francisco. Calif. 12—16 Dec. 2016.
13. Doronin Yu.P. *Fizika okeana*. Physics of the Ocean. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2000: 340 p. [In Russian].
14. Nilsen J.E., Falck E. Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1948—1999. *Progress in Oceanography*. 2006, 70: 58—89.
15. Xiao-Hai Y., Schubel J.R., Pritchard D.W. Oceanic upper mixed layer depth determination by the use of satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 1990, 32 (1): 55—74. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90098-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90098-7).
16. Swain J., Shukla R.K., Raghunadha Rao A., Panigrahi J.K., Venkitachalam N.R. Observations of wind and waves in the central Bay of Bengal during BOBMEX-99 and their effect on mixed layer depth variability due to forced mixing // *Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*. 2003, 112, 2: 261—263.
17. Herrmann M., Bouffard J., Béranger K. Monitoring open-ocean deep convection from space. *Geophys. Res.* 2009, 36: 606. doi: 10.1029/2008GL036422.
18. Belonenko T.V., Fedorov A.M. Steric Level Fluctuations and Deep Convection in the Labrador and Irminger Seas. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proceedings of the RAS. Physics of the atmosphere and the ocean. 2018, 54 (9): 1039—1049. DOI: 10.1134/S0001433818090086. [In Russian].
19. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Vesman A.V., Belonenko T.V., Koldunov A.V., Dukhovskoy D.S. Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 1: localization of the deep convection sites. *Sovremennyye Problemy Distanttsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2018, 15: 184—194. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-184-194. [In Russian].
20. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Vesman A.V., Belonenko T.V., Dukhovskoy D.S. Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic from satellite and in situ observations. Part 2: indices of intensity of deep convection. *Sovremennyye Problemy Distanttsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from Space. 2019, 16: 191—201. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-191-201. [In Russian].
21. Voet G., Quadfasel D., Mork K.A., Søiland H. The mid-depth circulation of the Nordic Seas derived from profiling float observations. *Tellus A*. 2010, 62 (4): 516—529.

22. Richards C., Straneo F. Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas. *Journal of Physical Oceanography*. 2015, 45 (6): 1735–1737.
23. Poulain P.-M., Warn-Varnas A., Niiler P. Near surface circulation of the Nordic Seas as measured by lagrangian drifters. *Journal of Geophysical Research*. 1996, 101 (C8): 18237–18258.
24. Raj R.P., Chafik L., Even J., Nilsen O., Eldevik T., Halo I. The Lofoten Vortex of the Nordic Seas. *Deep-Sea Res. I*. 2015, 96: 1–14.
25. Yu L.S., Bosse A., Fer I., Orvik K.A., Bruvik E.M., Hessevik I., Kvalsund K. The Lofoten Basin eddy: Three years of evolution as observed by Seaglidrs. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017, 6814–6825.
26. Mork K.A., Blindheim J. Variation in the Atlantic Inflow to the Nordic Seas, 1955–1996. *Deep-Sea Research I*. 2000, 47 (6): 1035–1057.
27. Eldevik T., Nilsen J.E., Iovino D., Olsson K.A., Sandu A.B., Drange H. Observed sources and variability of Nordic seas overflow. *Nature Geoscience*. 2009, 2: 406–410.
28. de Boyer Monte'gut C., Madec G., Fisher A.S., Lazar A., Iudicone D. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *J. Geophys. Res.* 2004, 109: C12003. doi:10.1029/2004JC002378.

Статья поступила 02.04.2020
Принята к публикации 20.05.2020

Сведения об авторах

Травкин Владимир Станиславович, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра океанологии, инженер-исследователь, vtravkin99@gmail.com

Белоненко Татьяна Васильевна, д-р геогр. наук, Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра океанологии, профессор, btvlisab@yandex.ru

Information about authors

Travkin Vladimir Stanislavovich, St. Petersburg State University, Oceanology department, Researcher
Belonenko Tatyana Vesil'evna, Grand PhD (Geogr. Sci.), St. Petersburg State University, Oceanology department, Professor

УДК 551.462:[627.212:502.05](571.6+265.54) doi 10.33933/2074-2762-2020-59-84-93

Оценка состояния подводных ландшафтов в портовой акватории бухты Находка (Японское море)

***Я.Ю. Блиновская¹, Л.И. Соколова¹, А.М. Лебедев²,
Н.Е. Казанова³, А.Б. Тарасов³***

¹ ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток,
blinovskaia.iaiu@dvfu.ru

² ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток

³ ООО Компания «Аттис Энтерпрайс», Находка

Представлены результаты мониторинга подводных ландшафтов в районе деятельности угольных терминалов. Отмечено загрязнение донных грунтов нефтепродуктами и тяжелыми металлами. Выявлено превышение предельно допустимых концентраций по таким показателям, как легко окисляющаяся органика, фенолы, нефтепродукты, взвешенные вещества в придонном горизонте. Установлено, что содержание загрязняющих компонентов в исследованных образцах соответствует технической марикультуре. Отмечается неустойчивая динамика концентрации тяжелых металлов в тканях гидробионтов. Зафиксировано изменение в структуре ландшафтных комплексов: для контрольных створов характерно высокое разнообразие бентоса, но сокращение проективного покрытия водорослями.

Ключевые слова: бухта Находка, экологический мониторинг, подводные ландшафты, угольные терминалы.

Underwater landscapes condition assessment in the Nakhodka bay (sea of Japan) port water area

***Ya. Yu. Blinovskaya¹, L. I. Sokolova¹, A. M. Lebedev²,
N. E. Kazanova³, A. B. Tarasov³***

¹ FGAOU VO «Far Eastern Federal University», Vladivostok, Russia

² FGBUN Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia

³ LLC Company «Attis Enterprise», Nakhodka, Russia

The diversity of natural resources and favorable economic and geographical location have always ensured a high degree of the coastal zone development. This is particularly pronounced in port areas, where there is not only a high concentration of production facilities, but also a high population density, leading to conflict situations and social tensions. Underwater landscapes monitoring results in the coal terminals area are presented. Contamination of bottom grounds by oil products and heavy metals has been noted. Marine bottom sediments are an active accumulator of contaminants which, when entering the marine area either independently or as a result of sorption on suspended particles of organic and mineral origin, gradually settle to the bottom. This makes them a potential source of secondary contamination of the water body. Excess of the maximum permissible concentrations for such indicators as easily oxidizing organics, phenols, petroleum products, and suspended substances in the bottom water horizon has been detected. Comparing the research results both in the bay head and at its outlet, it is necessary to note slight differences. The content of

contaminating components in the tested biota samples has been found to correspond to the technical mariculture. An important parameter of the sustainable state landscape is not only the presence and diversity of biota, but also the concentration of major pollutants in it. Unstable dynamics of heavy metal concentration in hydrobiont tissues has been observed. It should be noted that the concentration of some pollutants, such as copper, chromium and cadmium, are slightly higher in biota living at the exit from the bay, than the one at the bay head. There is a change in the structure of landscape complexes: the control points are characterized by a high variety of benthos but decrease in the projective coverage by algae. The underwater landscape result analysis has showed that port facilities operating in the area under consideration have an impact on the environment corresponding to the production and technological process.

Keywords: Nakhodka bay, ecological monitoring, underwater landscapes, coal terminals.

For citation: Ya. Yu. Blinovskaya, L.I. Sokolova, A.M. Lebedev, N.E. Kazanova, A.B. Tarasov. Underwater landscapes condition assessment in the Nakhodka bay (sea of Japan) port water area. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 84—93. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-84-93

Введение

Разнообразие природных ресурсов и благоприятное экономико-географическое положение всегда обеспечивали высокую степень освоенности береговой зоны. Это обуславливает увеличение темпов развития и масштабов антропогенной деятельности прибрежно-морских районов. Особенно ярко это проявляется в портовых районах, где отмечается не только значительная концентрация производственных объектов, но и высокая плотность населения, что приводит к возникновению конфликтных ситуаций и социального напряжения. Последствия этих воздействий приводят к ухудшению качества окружающей среды и здоровья населения, в связи с чем к производственной деятельности предъявляются повышенные требования [1, 2]. Это находит отражение не только в нормативно-правовом аспекте. В последние годы широкое распространение получила практика общественного экологического мониторинга, результаты которого могут стать причиной различных санкций для промышленных предприятий, граничащих с жилыми районами. В этой связи экологически ответственный бизнес берет на себя дополнительные обязательства по реализации дополнительных мер, способствующих снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Внедрение наилучших доступных технологий невозможно без предварительного обоснования, основанного на оценке состояния области воздействия. Такую практику с 2017 г. реализуют портовые объекты, располагающиеся в бухте Находка. Данные исследования выходят за рамки производственного экологического контроля, поскольку позволяют получить объективную информацию о состоянии окружающей среды на территории производственного объекта, в зоне его влияния и за ее границей для информационной поддержки принятия управленческих решений, касающихся природоохранной деятельности. Использование при этом ландшафтного подхода позволяет проводить оценку состояния прибрежно-морских экосистем с учетом их пространственной структуры, определять порядок и обосновывать первоочередность использования прибрежно-морских ресурсов. В соответствии с этим целью настоящей работы является оценка воздействия портовой деятельности на донные ландшафты для формирования на ее основе рекомендаций по корректировке антропогенной нагрузки в пределах порта Находка.

Fig. 1. Monitoring area (Nakhodka bay, sea of Japan).

Район исследования включает в себя область, располагающуюся в южной части бухты Находка (рис. 1). Ключевыми индикаторами подводных ландшафтов являются донные отложения, придонные воды и морская биота. Пробоотбор проводился водолазным способом с портового буксира.

Грунт отбирался в пластиковые контейнеры объемом 1 литр методом конверта с участка площадью 1 м². Придонной водой заполняли тару темного стекла непосредственно на пункте мониторинга. Биоту помещали в пластиковые контейнеры, и весь полевой материал доставляли в химико-аналитическую лабораторию для проведения дальнейших исследований.

Количественный химический анализ морской воды и донных отложений выполнен на основе методических рекомендаций, рассмотренных и утвержденных Федеральной службой по надзору в сфере природопользования.

Для ландшафтной структуры характерна сезонная изменчивость, в связи с чем исследования осуществляются по основным сезонам года, что позволяет определить совокупность воздействий с учетом природно-климатических факторов, а также разработать оптимальные стратегии корректировки технологических решений, направленных на стабилизацию экологической обстановки в районе деятельности.

Донные ландшафты в районе наблюдения представлены горизонтальной платформой, микрорельеф имеет биогенное происхождение. Грунт представлен

смесью мелкозернистого песка, раковинного детрита, многочисленными мелкими и единичными крупными камнями на фоновом пункте и серо-коричневым алевропелитом с небольшим количеством раковинного детрита и редкими полянками мелкой гальки в пунктах, располагающихся во внутренней части бухты. В целом для акватории характерны смешанные песчаные грунты и алевриты. Результаты исследования гранулометрического состава донных отложений за полуторагодичный период подтверждают однородность донных отложений бухты, что связано с географическими и гидродинамическими особенностями акватории.

Фитобентос представлен слабо, в его составе отмечены ульва, мелкие багрянки с плоскими нерасчлененными талломами, редкие кустики ветвистых бурых водорослей и десмарестии, единичная zostера. При этом в весенний период наблюдается его большее развитие [3]. В зообентосе доминируют гребешковая патирия (средняя плотность 0,46 экз./м²) и приморский гребешок (плотность поселения 0,32 экз./м²), зарывающиеся полихеты в тонких трубочках (25—30 экз./м²). Крупные полихеты с яркими венчиками щупалец встречаются сравнительно редко (не более 0,04 экз./м²). Серые морские ежи, пагурусы и амурские звезды немногочисленны (0,06 экз./м²). В центральной части бухты распространен антропогенный мусор, представленный пластиковыми бутылками, арматурой, обрывками веревок и железных банок.

Следует отметить существенную антропогенную нагрузку на донные ландшафты бухты Находка. Об этом свидетельствуют высокие показатели практически всех поллютантов. Так, например, фенолы, являясь одним из наиболее распространенных загрязнений, поступают в поверхностные воды со стоками предприятий. Они химически нестойки и подвергаются в водной среде активному распаду. В районе исследования их повышенная концентрация отмечается повсеместно, однако на фоновом пункте ее значения максимальны в течение практически всего периода исследования (рис. 2).

Анализ данных позволяет сделать предварительный вывод об источниках поступления данного загрязнителя, которые, вероятнее всего, связаны с предприятиями, располагающимися в долинах рек, впадающих в залив Находка, поскольку фоновый пункт наиболее приближен к приустьевым участкам рек Каменки и Партизанской.

В целом, сравнивая результаты исследований как в кутовой части бухты, так и у ее выхода, можно констатировать незначительные различия. Это касается и соотношения тяжелых металлов, и органических веществ. Для портовых акваторий в целом характерно достаточно высокое содержание нефтепродуктов в донных отложениях: в пункте № 1, располагающемся в вершине бухты, оно максимально (рис. 3). В центральной части, в пункте № 2, где отмечается более активная гидродинамическая картина, содержание углеводородов существенно ниже, и на выходе из бухты, в открытой ее части, характеризуемой достаточно активными придонными течениями, их концентрация ниже практически в шесть раз. Таким образом, активное накопление нефтяных углеводородов в вершине бухты является следствием многолетнего воздействия промышленной деятельности, ведущейся в порту.

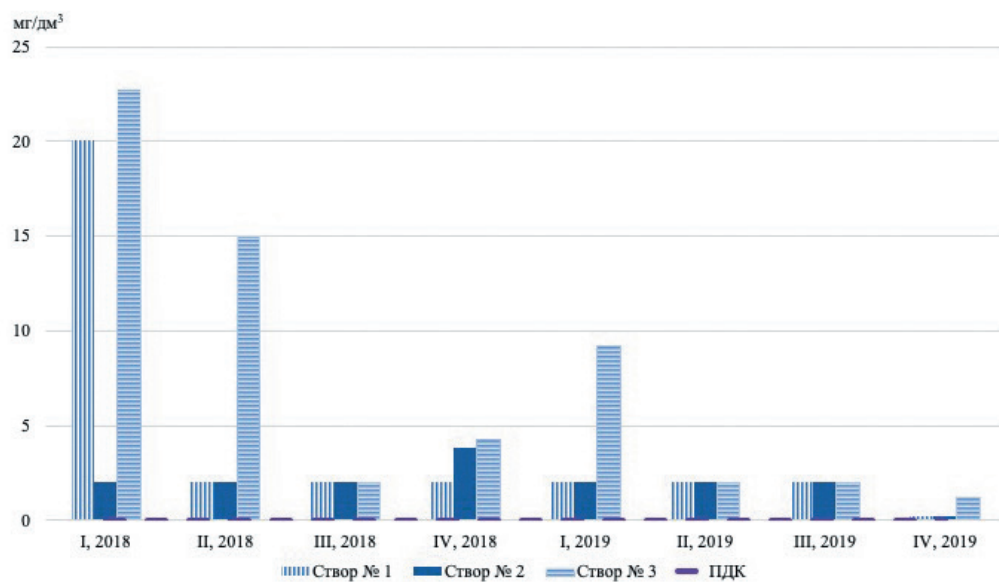


Рис. 2. Концентрация летучих фенолов в придонном горизонте (мг/дм³).

Fig. 2. Concentration of volatile phenols in the bottom horizon (mg/dm³).

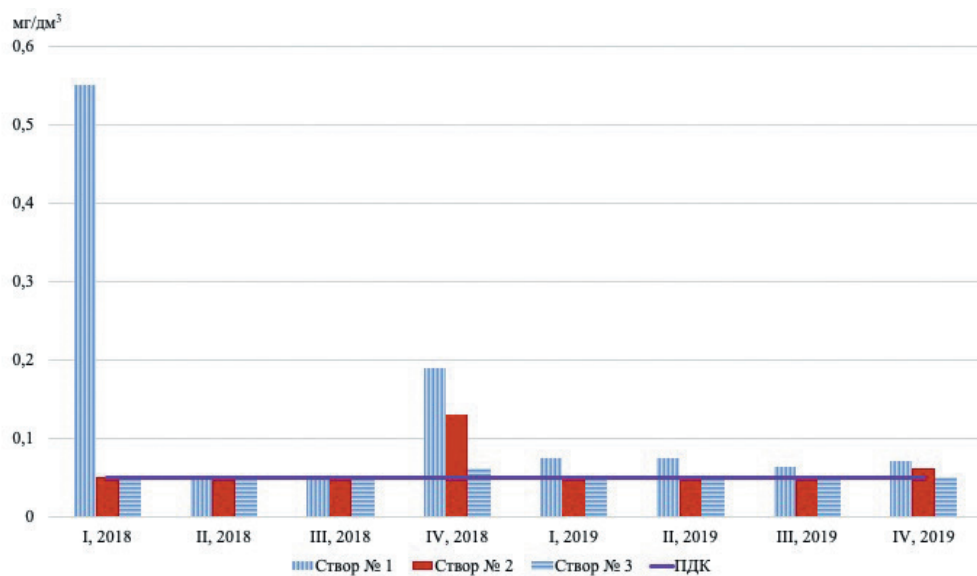


Рис. 3. Концентрация нефтепродуктов в придонном горизонте (мг/дм³).

Fig. 3. Concentration of oil products in the bottom horizon (mg/dm³).

Морские донные отложения являются активным накопителем загрязнений, которые, попадая в морскую акваторию либо самостоятельно, либо в результате сорбции на взвешенных частицах органического и минерального происхождения постепенно оседают на дно. Это делает их потенциальным источником вторичного загрязнения водоема.

Тяжелые металлы присутствуют во всех пробах, полученных в результате мониторинга. Концентрация их неустойчивая и меняется в зависимости от сезона и гидродинамических параметров среды [4]. На рис. 4—6 представлено соотношение содержания тяжелых металлов в донных отложениях в исследуемом районе в 2018 и 2019 гг. Кроме того, следует отметить незначительное различие в их концентрации между пунктами пробоотбора, что подтверждает существенное антропогенное воздействие на акваторию и наличие многочисленных источников загрязнения как в вершине бухты, так и на выходе из нее.

Важным параметром устойчивого состояния ландшафта являются не только наличие и разнообразие биоты, но и концентрация в них основных загрязнителей. Для оценки качества представителей объектов живой природы выбираются виды, имеющие относительно узкую амплитуду экологической толерантности по отношению к какому-либо фактору среды. Преимущественно это растения или малоподвижные представители донной фауны. В качестве видов-индикаторов подводных ландшафтов бухты Находка выбраны мидии, асцидии, ульва и zostера, регулярно обнаруживаемые при проведении съемки.

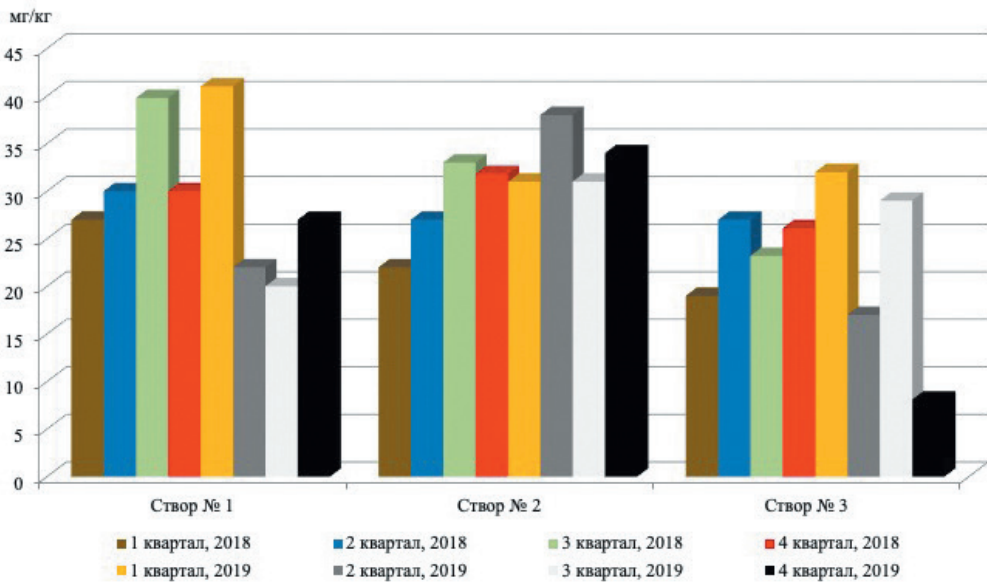


Рис. 4. Концентрация хрома в донных отложениях за исследованный период.

Fig. 4. Chromium ratio in bottom sediments over the investigated period.

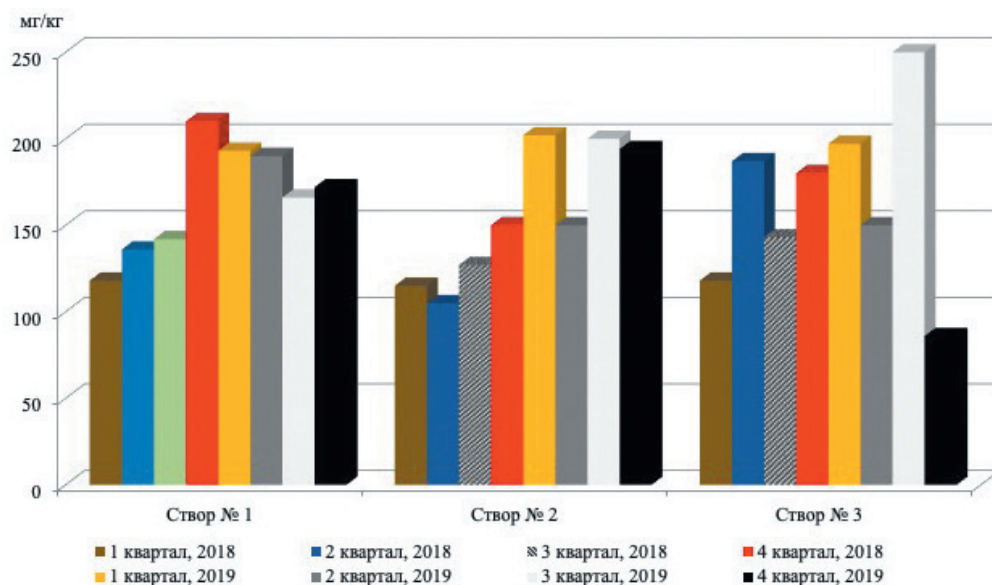


Рис. 5. Концентрация марганца в донных отложениях за исследованный период.

Fig. 5. Manganese ratio in bottom sediments over the investigated period.

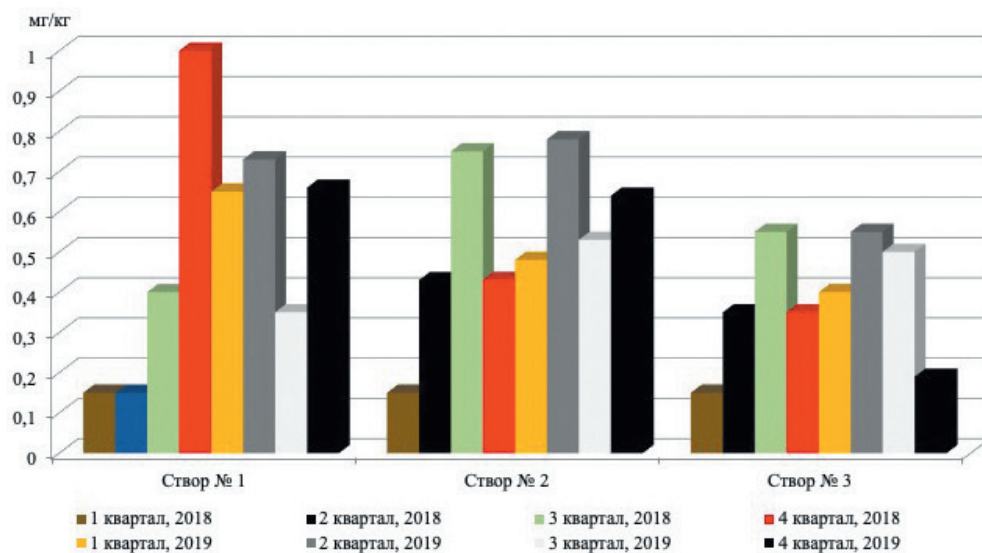


Рис. 6. Концентрация кадмия в донных отложениях за исследованный период.

Fig. 6. Cadmium ratio in bottom sediments over the investigated period.

Следует отметить, что в биоте, обитающей у выхода из бухты, концентрация некоторых загрязнителей несколько выше, чем в случае представителей, отобранных в вершине, что показывают результаты лабораторных исследований. Это касается, прежде всего, хрома, кадмия, меди (рис. 7—9).

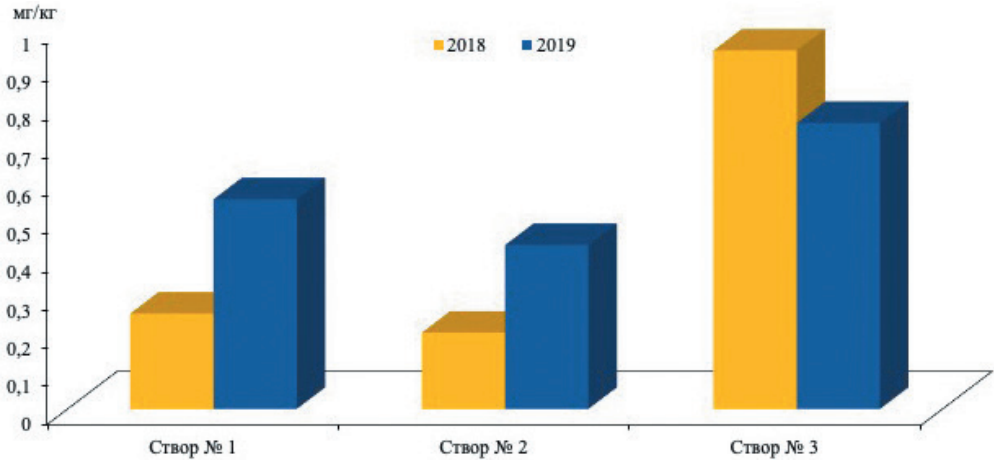


Рис. 7. Концентрация хрома в морской биоте (мг/кг).

Fig. 7. Chromium concentration in marine biota (mg/kg).

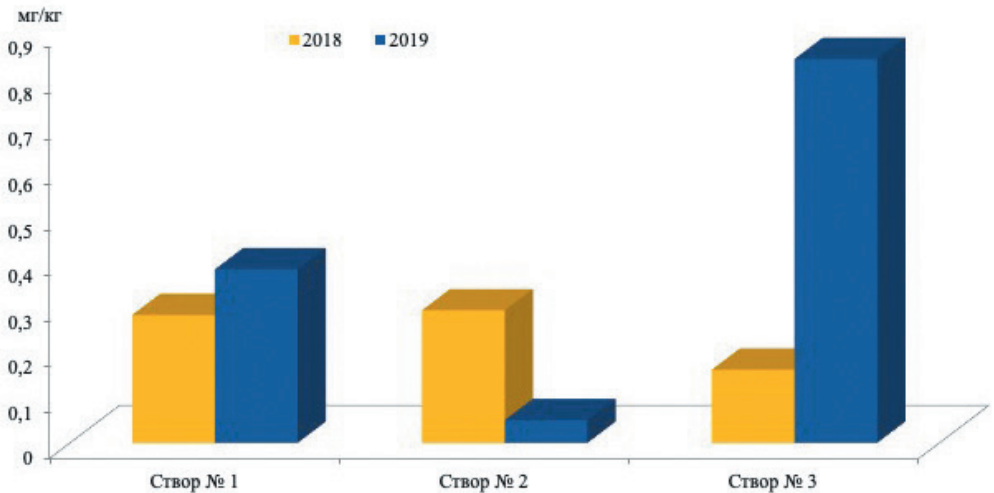


Рис. 8. Концентрация кадмия в морской биоте (мг/кг).

Fig. 8. Cadmium concentration in marine biota (mg/kg).

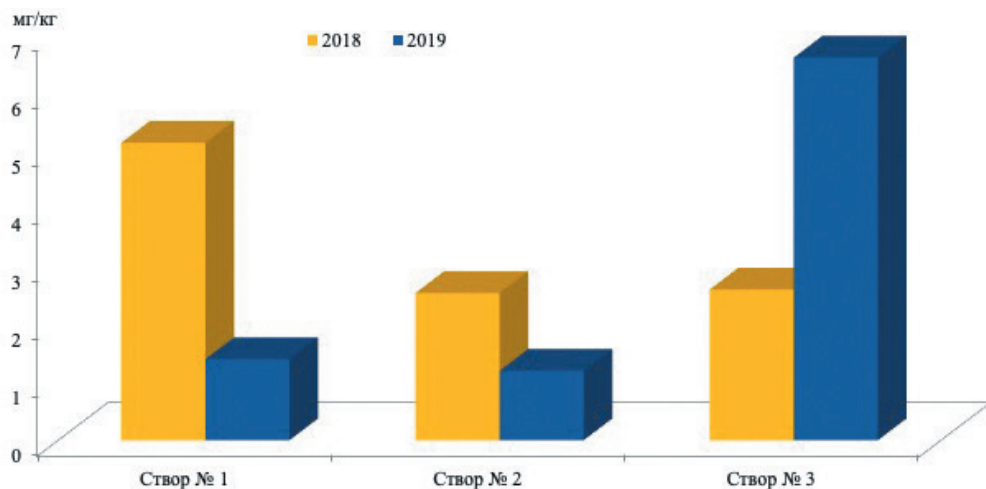


Рис. 9. Концентрация меди в морской биоте (мг/кг).

Fig. 9. Copper concentration in marine biota (mg/kg).

Выводы

Анализ результатов ландшафтного исследования показал, что портовые объекты, ведущие свою деятельность в рассматриваемом районе, оказывают воздействие на окружающую среду, соответствующее производственно-технологическому процессу. Повышенные значения таких показателей, как концентрация легко окисляющейся органики и летучих фенолов, свидетельствуют о доминирующем вкладе в загрязнение хозяйственно-бытовых и поверхностных стоков. Учитывая, что в бухте Находка располагается большое число водопользователей и иных источников загрязнения, можно предположить, что концентрация поллютантов будет сохраняться как минимум на данном уровне, если не будут предприняты усилия по очистке акватории и созданию централизованной системы очистных сооружений.

Вместе с тем отмечаются достаточно высокое биоразнообразие и присутствие основных представителей донной фауны, характерных для данной природно-климатической зоны. В связи с этим необходимо проведение ландшафтной съемки на всей акватории бухты Находка, на основании которой можно будет оценить изменение площади ландшафтных комплексов и разработать научно-обоснованные решения для формирования комплексной системы экологической безопасности.

Список литературы

1. Мамаева М.А., Жигульский В.А., Царькова Н.С., Шилин М.Б. Экологическая стратегия развития морского портового комплекса в Лужской губе // Биосфера. 2016. Т. 8, № 3. С. 397—405.
2. Панов Д.Б., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Некоторые особенности загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами акватории Керченского морского торгового порта // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зоны и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. № 26-1. С. 192—197.

3. Арзамасцев И.С., Яковлев Ю.М., Евсеев Г.А., Гульбин В.В., Клочкова Н.Г., Селин Н.Н., Ростов И.Д., Юрасов Г.И., Жук А.П., Буяновский А.И. Атлас промысловых беспозвоночных и водорослей Дальнего Востока России. Владивосток: Аванте, 2001. 192 с.
4. Христофорова Н.К., Гамаюнова О.А., Афанасьев А.П. Состояние бухт Козьмина и Врангеля (залив Петра Великого, Японское море): динамика загрязнения тяжелыми металлами // Известия ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 179—186.

References

1. Mamaeva M.A., Zhigulskiy V.A., Tsarkova N.S., Shilin M.B. The ecological strategy of the marine port complex in Luzhskaya guba development. *Biosfera*. Biosphera. 2016, 8, 3: 397–405. [In Russian].
2. Panov D.B., Panov B.N., Spiridonova E.O. Some specific of pollution by heavy metals and oil products of the marine merchant port Kerch water area. *Ecologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zony i kompleksnoye ispolzovanie resursov shelfa*. Ecological safety of coastal and shelf zone and complex shelf recourses using. 2012, 26-1: 192–197. [In Russian].
3. Arzamastsev I.S., Yakovlev Yu.M., Evseev G.A., Gulbin V.V., Klochkova N.G., Selin N.N., Rostov I.D., Yurasov G.I., Zhuk A.P., Buyanovskiy A.I. *Atlas promyslovyykh bezpozvonochnykh i vodorosley Dalnego Vostoka Rossii*. Atlas of fishing invertebrates and algae of the Far East of Russia. Vladivostok: Avante, 2001: 192. [In Russian].
4. Khristophorova N.K., Gamyunova O.A., Afanasiev A.P. Kozmina and Wrangelya bays (Peter the Great Bay, Japanese Sea) state: dynamics of heavy metals pollution. *Izvestiya TINRO*. 2015, 180: 179–186. [In Russian].

Статья поступила 11.05.2020

Принята к публикации 11.06.2020

Сведения об авторах

Блиновская Яна Юрьевна, д-р техн. наук, доцент кафедры безопасности в чрезвычайных ситуациях и защиты окружающей среды Инженерной школы ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», профессор, e-mail: blinovskaia.iaiu@dvfu.ru

Соколова Лариса Ивановна, канд. хим. наук, доцент кафедры физической и аналитической химии Школы естественных наук ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», профессор, e-mail: sokolova.li@dvfu.ru

Лебедев Андрей Майевич, канд. геогр. наук, лаборатория природопользования приморских регионов ФГБУН Тихоокеанского института географии ДВО РАН, научный сотрудник, e-mail: lebedev@tigdvo.ru

Казанова Наталья Евгеньевна, ООО Компания «Аттис Энтерпрайс», инженер-эколог, e-mail: attis-ecolog@mail.ru

Тарасов Александр Борисович, ООО Компания «Аттис Энтерпрайс», генеральный директор, e-mail: attis-ecolog@mail.ru

Information about authors

Blinovskaya Yana Yurievna, Grand PhD (Tech. Sci.), Safety in emergency situation and environmental protection department, Engineering School FGAOU VO «Far Eastern Federal University»

Sokolova Larisa Ivanovna, PhD (Chem. Sci.), associate professor, Physical and Analytical Chemistry department, Environmental School FGAOU VO «Far Eastern Federal University»

Lebedev Andrey Mayevich, PhD (Geogr. Sci.), Environmental Management of Maritime Regions Laboratory FGBUN Pacific Institute of Geography Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, research associate

Kazanova Natalia Evgenienva, LLC Company «Attis Enterprise», ecologist

Tarasov Alexander Borisovich, LLC Company «Attis Enterprise», CEO

Экологические проблемы реки Новой (Санкт-Петербург) и пути их решения

***С.А. Кондратьев¹, А.Ю. Брюханов², Н.В. Игнатьева¹,
А.Е. Лапенков¹, А.М. Расулова¹, А.В. Терехов¹, Н.С. Обломкова²***

¹ Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, kondratyev@limno.org.ru

² Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург

Выявлены источники загрязнения и разработаны рекомендации по улучшению экологической ситуации в водной системе р. Новой. Показано, что экологическая ситуация на объекте оценивается как чрезвычайная и объект признан зоной экологического бедствия. Основной причиной этого является сельскохозяйственная деятельность предприятия ЗАО «Предпортовый», расположенного в пределах верхней полевой части и осуществляющего сброс сточных вод в дренажную систему водосбора, а также вывозящего навоз на сельскохозяйственные поля, непосредственно примыкающие к руслу реки. Улучшения экологической ситуации можно достичь путем оптимизации сельскохозяйственного производства, удаления из водной системы биогенных и органических веществ, организации прибрежной защитной полосы, увеличения проточности в результате возвращения стока в прежнее русло.

Ключевые слова: гидро- и геохимические исследования, азот, фосфор, эвтрофирование, биогенное загрязнение.

Ecological problems of the river Novaya (St. Petersburg) and ways to solve them

***S.A. Kondratyev¹, A.Yu. Bruchanov², N.V. Ignatyeva¹,
A.E. Lapenkov¹, A.M. Rasulova¹, A.V. Terekhov¹, N.S. Oblomkova²***

¹ Institute of Limnology of RAS, Saint-Petersburg, Russia

² Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, Saint Petersburg, Russia

Main sources of pollution of the river Novaya, one of the most ecologically unfavorable water bodies in St. Petersburg, have been revealed on the basis of hydrological, hydrochemical and geochemical data. The river lost natural water supply and its length decreased by 4 times after the runoff from the upper part of catchment was redirected to the river Duderhofka during the construction of the Pulkovo Airport several decades ago. Currently, the river is a drainage system of agricultural territory, supplying a system of six connected ponds at urban area. The main ecological problem of the aquatic system under study has been found to be nutrient and organic pollution. Main reason of pollution is intensive agricultural activity at the catchment area. As a result, a huge amount of phosphorus, nitrogen and organic substances enters the hydrographic network. Low flow rate of the water system makes worse the development of negative processes in the ecosystem. The main polluter is a livestock enterprise located in the upper part of the catchment area. It discharges wastewater into the drainage system in the catchment area and manures agricultural fields directly adjacent to the riverbed. In accordance with the evaluation criteria of the degree of surface waters chemical pollution, approved by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, the situation is assessed as extreme in the aquatic system, and at some sites - as a zone of ecological disaster by a number of parameters. No contamination of water and bottom sediments, as well as soils in the catchment area with

priority organic pollutants previously entering from the airport territory was detected. Nutrient loading on the aquatic system of the catchment area from the agricultural enterprise has been calculated. It has been assessed that the use of the best available technologies for agricultural activity could reduce the phosphorus load by 9 % and the nitrogen load by 28 %. Currently, the calculated concentration of total phosphorus in the drainage system in the catchment area is 4 times higher than the hyper eutrophic state limit. An improvement in the ecological situation can be achieved by optimizing agricultural activity in the catchment area, periodical removal of some nutrients and organic substances by mowing macrophytes in the swampy floodplain area, establishing a coastal protective zone and increasing the flow rate as a result of the return of runoff from the upper part of the river catchment to the former course.

Keywords: hydro- and geochemical studies, nitrogen, phosphorus, eutrophication, nutrient pollution.

For citation: S.A. Kondratyev, A.Yu. Bruchanov, N.V. Ignatyeva, A.E. Lapenkov, A.M. Rasulova, A.V. Terekhov, N.S. Oblomkova. Ecological problems of the river Novaya (St. Petersburg) and ways to solve them. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 94—110. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-94-110

Введение

Состояние городских водных объектов (рек, каналов, озер, водохранилищ, прудов и карьеров) является объективным индикатором степени загрязнения окружающей среды урбанизированных территорий. Практически все водные объекты, расположенные в городской черте, в большей или меньшей степени испытывают антропогенное воздействие, в результате чего естественные процессы формирования качества воды и функционирования экосистем, как правило, нарушены. Ситуация усугубляется тем, что большинство таких водоемов имеет низкую самоочищающую способность. Неудовлетворительное качество поверхностных вод урбанизированных территорий отрицательно влияет на жизнедеятельность гидробионтов и здоровье людей и может способствовать возникновению неблагоприятной эпидемиологической обстановки [1, 2].

В течение последних лет огромное количество жалоб населения в муниципальные и природоохранные организации Санкт-Петербурга было связано с неблагоприятным экологическим состоянием так называемой реки Новой. В настоящее время она представляет собой дренажную систему сельскохозяйственных территорий, которая питает шесть последовательно связанных прудов, находящихся в пределах городской застройки. Проблема экологического неблагоприятия этих прудов не нова: на протяжении, по крайней мере, последних двух десятилетий они относятся к числу наиболее загрязненных водоемов города [2]. В 2010 г. в качестве оздоровительного мероприятия городскими властями была выполнена дноочистка прудов. Однако, как показали результаты комплексных исследований, выполненных в 2011—2013 гг. Институтом озераведения РАН (ИНОЗ РАН), эффективность этого мероприятия уже через год-два свелась практически к нулю. Дело в том, что основной источник загрязнения прудов, которым, как было установлено в ходе исследований, является сток с верхней, речной части водной системы р. Новой, так и не был устранен.

Недовольство граждан особенно возросло в последние годы. Причиной этого является, прежде всего, сильный неприятный запах, распространяющийся вокруг прудов, а также многочисленные случаи гибели водоплавающих птиц. В 2019 г.

проблема крайне неблагоприятного экологического состояния р. Новой широко освещалась в средствах массовой информации, в том числе на региональных телевизионных каналах, обсуждалась на ряде совещаний, проводимых под эгидой администрации Санкт-Петербурга с участием представителей государственных, частных и общественных организаций. До недавнего времени основным виновником сложившейся неблагоприятной экологической ситуации считался аэропорт Пулково, точнее его управляющая компания ООО «Воздушные ворота Северной столицы», поскольку содержащая органические загрязняющие вещества (ОЗВ) противообледенительная жидкость, применяемая для обработки самолетов и взлетно-посадочных полос в холодное время года, через Сбросной канал частично попадала в русло р. Новой. Аэропорт был оштрафован за причинение ущерба рыбохозяйственному объекту, которым официально является р. Новая, и летом 2019 г. все стоки с аэродромных покрытий были переключены на канализационную сеть ГУП Водоканал СПб. Однако проблема экологического неблагоприятия реки осталась.

В сложившейся ситуации насущной проблемой стало выявление основных источников современного загрязнения и разработка рекомендаций по улучшению экологической обстановки на водной системе, называемой р. Новой. Именно эта задача была поставлена перед Институтом озероведения РАН осенью 2019 г. Поскольку, как было установлено, основные источники загрязнения расположены выше прудов, главным объектом исследования стал водосбор речной части водной системы. В ходе исследования решались следующие задачи:

- анализ современной структуры водосбора р. Новой;
- проведение гидрологических, гидрохимических и геохимических исследований в гидрографической сети р. Новой;
- выявление источников загрязнения р. Новой;
- оценка соответствия характеристик р. Новой требованиям, предъявляемым к объектам рыбохозяйственного значения;
- разработка рекомендаций по улучшению экологического состояния р. Новой.

Согласно общедоступной информации, «Новая — река в Кировском районе Санкт-Петербурга. Начинается южнее Балтийской линии Октябрьской железной дороги и заканчивается в районе усадьбы Александрино. На территории жилого массива Ульянки река превращена в цепь прудов, разделенных подземными трубами-водоводами» (<https://ru.wikipedia.org/wiki>). Однако так было не всегда. Первоначально (до строительства аэропорта Пулково) река брала начало у Дудергофских высот из болотистой местности недалеко от Волхонского шоссе и длина ее до впадения в Финский залив составляла около 20 км. При строительстве аэропорта сток с верхней части водосбора р. Новой был отведен в р. Дудергофку через Нагорный канал и Дудергофский ручей, после чего название «река Новая» сохранилось для небольшой полевой части водосбора (от аэропорта до линии железной дороги) и нижерасположенной системы прудов общей протяженностью около 5 км. Современная схема гидрографической сети изучаемого района представлена на рис. 1.

После отведения стока с верховий р. Новой (площадью около 5500 га) в р. Дудергофку при строительстве аэропорта Пулково нижняя часть водной системы,

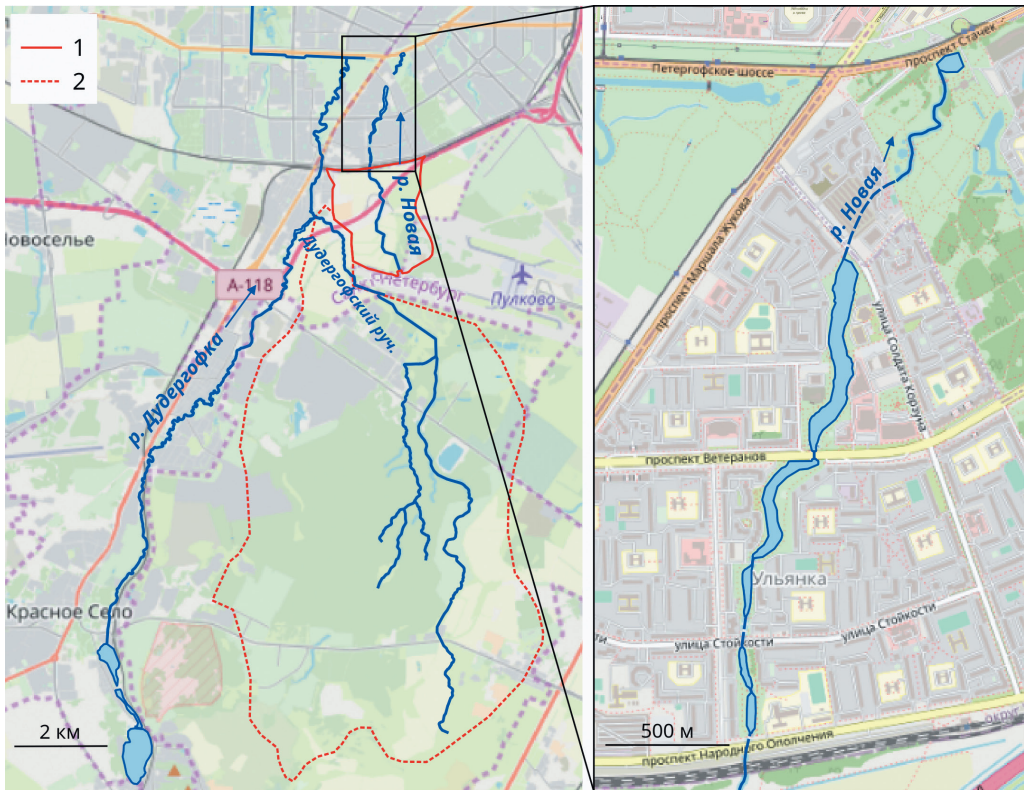


Рис. 1. Схема водосборной территории р. Новой (слева) и система прудов в пределах городской застройки (справа).

1 — полевая часть водосбора в современных условиях, 2 — отсеченная часть водосбора.

Fig. 1. The scheme of the river Novaya catchment (left part) and a system of ponds within urban areas (right part).

1 – the field part of the catchment in modern conditions, 2 – the cut off part of the catchment.

включающая дренажную систему сельскохозяйственной территории (426 га) и шесть последовательно соединенных прудов на территории городской застройки, лишилась грунтового питания. Русло выработано течением реки до переброски ее стока в р. Дудергофку. Вместо устья — трубопровод, принимающий различные стоки и соединяющий пруд усадьбы Александрино с Дудергофским каналом. В соответствии с существующими определениями «реки» перечисленные факты (отсутствие грунтового питания, истока и др.) не позволяют классифицировать рассматриваемую водную систему как реку. Таким образом, в настоящее время питание водной системы происходит за счет дренажного стока с сельскохозяйственных полей, а также ливневого и талого стока с городской территории, не попавшего в канализационную сеть ГУП Водоканал СПб.

Методика и результаты исследований экологического состояния

Для выявления характера экологических проблем, вызванных загрязнением и/или эвтрофированием, источников поступления загрязняющих и биогенных веществ, оценки степени экологического неблагополучия водной системы и определения возможных путей ее оздоровления осенью 2019 г. были выполнены натурные исследования, включавшие рекогносцировочное визуальное обследование территории (начало сентября) и четыре съемки, в ходе которых производились гидрологические измерения и отбор проб. При этом основное внимание уделялось верхней полевой части водосбора р. Новой как основного источника поступления загрязнений в пруды на территории жилой застройки.

В состав полевых работ были включены гидрологические, гидрохимические и геохимические исследования. Намеченные пункты наблюдения (19 станций) (рис. 2) располагались на всех впадающих в русло реки водотоках (дренажных канавах, нанесенных на общедоступные карты, и Сбросном канале аэропорта), в самом русле р. Новой и на Дудергофском ручье, протекающем параллельно р. Новой восточнее ее водосбора (ст. В19). Работы на Дудергофском ручье, не принадлежащем водосбору р. Новой, были включены в программу исследований, поскольку на основании изучения картографического материала и результатов рекогносцировочного обследования возникла идея, согласно которой, одним из путей улучшения экологического состояния р. Новой может быть увеличение ее проточности, что могло бы быть осуществлено за счет переброски части стока Дудергофского ручья.

Полевые работы были выполнены при различных погодных условиях, которые в значительной степени определили показатели стока, поступление химических веществ с водосбора и качество воды в р. Новой:

— в период длительного (более месяца) отсутствия дождей («сухой» период, 25 сентября 2019 г.);

— в начале периода ежедневного выпадения атмосферных осадков (15 октября 2019 г. гидрохимические исследования на четырех станциях и 18 октября 2019 г. гидрологические, гидрохимические и геохимические исследования в полном объеме);

— в условиях длительного дождливого периода (30 октября 2019 г.).

Для инструментального измерения расходов воды методом «скорость — площадь» использовался измеритель скорости потока ИСП-1М. В случае невозможности инструментального измерения скорость течения оценивалась с помощью поверхностных поплавков.

В ходе гидрохимических исследований определялись значения водородного показателя, удельной электропроводности, характер и интенсивность запаха, показатели органического вещества (ОВ) (цветность, биохимическое потребление кислорода в течение пяти суток (БПК₅), химическое потребление кислорода (ХПК)), концентрации главных ионов, растворенных газов (O₂ и CO₂), взвесей, главных биогенных элементов — фосфора и азота (валовое содержание и концентрации неорганических форм), нефтепродуктов, фенолов, приоритетных ОЗВ, поступавших ранее с территории аэропорта (этиленгликоля, этанола, изопропилового спирта, бутилового спирта, ацетона). Геохимические исследования включали анализ

элементного состава донных отложений, а также определение содержания вышеперечисленных ОЗВ в донных отложениях водной системы и почвах водосбора.

Химические анализы выполнялись в Эколого-аналитической лаборатории (ЭАЛ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ) (аттестат аккредитации № RA.RU.21АП47 выдан Федеральной службой по аккредитации 22.03.2017) и Химико-аналитическом центре «Арбитраж» Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001 510650 выдан 10.11.2015). Количественный анализ ОВЗ выполнялся хроматографическим методом на газовом

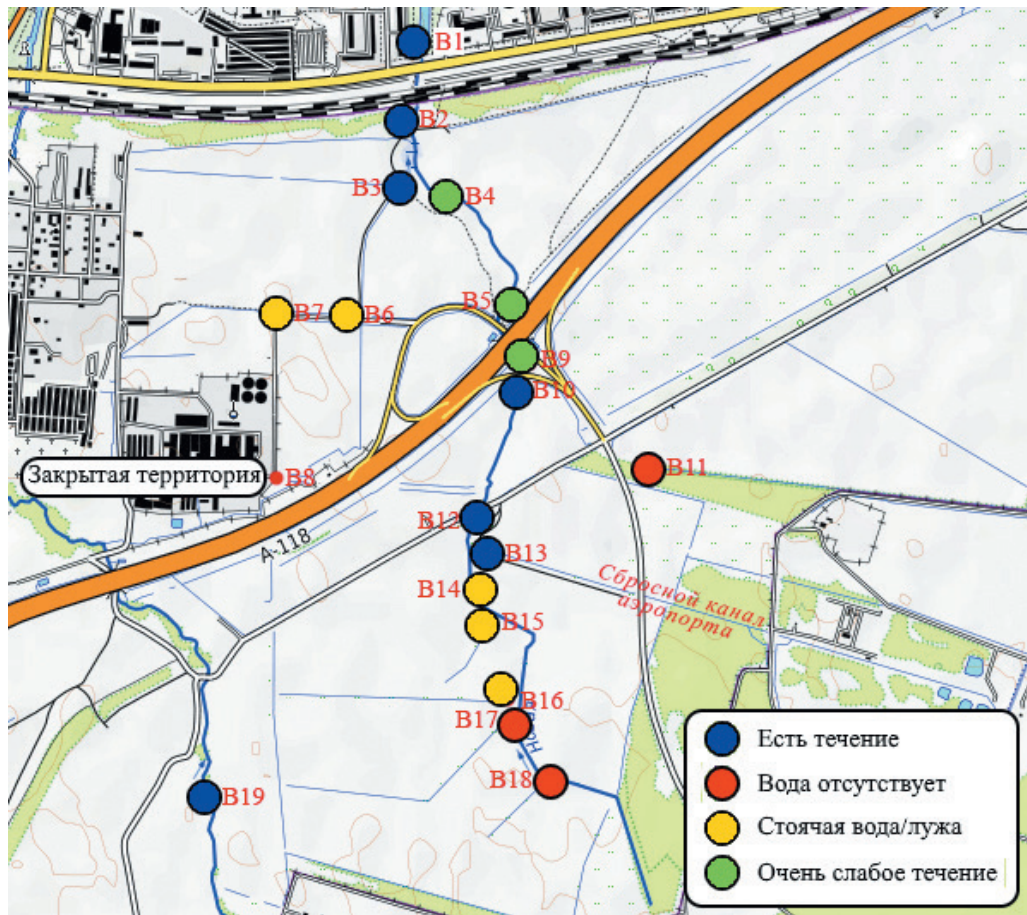


Рис. 2. Схема расположения пунктов наблюдения и качественная характеристика гидрологической ситуации в сентябре — октябре 2019 г.

Fig. 2. The location of observation points and qualitative characteristic of hydrological situation in September — October 2019.

хроматографе Master GC фирмы «DANI Instruments S.p.A.», элементный состав донных отложений и почв — методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии на рентгено-флуоресцентном энергодисперсионном спектрометре EDX-800P фирмы Shimadzu (Япония). Анализы выполнялись в соответствии с нормативными документами.

В результате гидрологических исследований было установлено, что как в относительно «сухой» период, так и при интенсивных атмосферных осадках сток в верхних частях дренажной системы (до впадения Сбросного канала аэропорта в старое речное русло) отсутствовал. Можно предположить, что дренажные каналы на этом участке водосбора, судя по наличию в них высшей водной растительности (рогоза, тростника и т. п.), периодически наполняются водой. Очевидно, это происходит весной во время снеготаяния и, возможно, в условиях дождливого лета. Основные притоки реки после выпадения осадков — это Сбросной канал аэропорта, каналы, идущие вдоль трассы А118 (КАД), и дренажная канава (ст. В3), идущая вдоль железной дороги (см. рис. 2).

Определенный вклад в речной сток оказывают стоки с животноводческого предприятия ЗАО «Предпортовый», расположенного в пределах верхней полевой части водосбора между КАД и железной дорогой в деревне Старо-Паново и примыкающего с запада к дороге между пунктами наблюдения В7 и В8, однако во время продолжительного «сухого» периода они не действовали (в канавах стояли отдельные лужи). При этом сток с отрезанных верховий водосбора р. Новой, перенаправленный через Дудергофский ручей в р. Дудергофку, происходил достаточно интенсивно. В период наблюдений здесь (ст. В19) отмечалось течение с расходом 800—1200 л/с, что существенно выше расхода воды (46—53 л/с) в современном русле р. Новой при впадении в пруд (ст. В1) на территории жилой застройки даже после выпадения интенсивных осадков.

В результате гидрохимических исследований установлено, что для водной системы р. Новой характерны очень высокие значения концентрации главных биогенных элементов — фосфора и азота. Основная причина этого заключается в сельскохозяйственной деятельности животноводческого предприятия ЗАО «Предпортовый», осуществляющего сброс сточных вод в дренажную систему на водосборе р. Новой (ст. В3, В6 и В7), а также вывозящего навоз на сельскохозяйственные поля, непосредственно примыкающие к руслу реки.

Как видно из рис. 3 а и б, в воде р. Новой наибольшие значения концентрации валового фосфора ($P_{\text{вал}}$) и валового азота ($N_{\text{вал}}$) были отмечены в верховье (ст. В14 и В15) и в нижней части речного русла (ст. В2), а также в пруду № 1 (ст. В1). При этом максимум концентрации $P_{\text{вал}}$ наблюдался в начале дождливого периода (в конце второй декады октября), а максимум концентрации $N_{\text{вал}}$ — в «сухой» период (в конце сентября). В дренажных канавах вблизи ЗАО «Предпортовый» отмечены чрезвычайно высокие концентрации $P_{\text{вал}}$ (до 11,3 мг Р/л) и $N_{\text{вал}}$ (до 64,88 мг N/л), максимум которых пришелся на «сухой» период. При разбавлении этих стоков дождевыми водами содержание биогенных элементов в них снижается, однако в канавах появляется течение и сточные воды по дренажной системе попадают в р. Новую, что крайне пагубно отражается на ее экологическом

состоянии. Согласно общепринятой шкале трофических типов водоемов [3—5], содержание общего фосфора (понятие «общий фосфор» в мировой литературе соответствует понятию «валовый фосфор» в терминологии Гидрометслужбы РФ) выше 0,1 мг Р/л соответствует гиперэвтрофному типу. Как правило, концентрация фосфора в природных водах даже в условиях эвтрофирования не превосходит 1 мг Р/л, а концентрация азота — 10 мг N/л. На отдельных участках исследуемой водной системы содержание фосфора и азота столь высоко, что следует говорить уже не об антропогенном эвтрофировании, а о биогенном загрязнении объекта.

Отмечена высокая загруженность водной системы органическим веществом (по ХПК), в том числе легко окисляемым (по БПК₅). Как видно из рис. 3 *в* и *г*, максимальные значения показателей ОВ относятся к «застойным» водам верхней

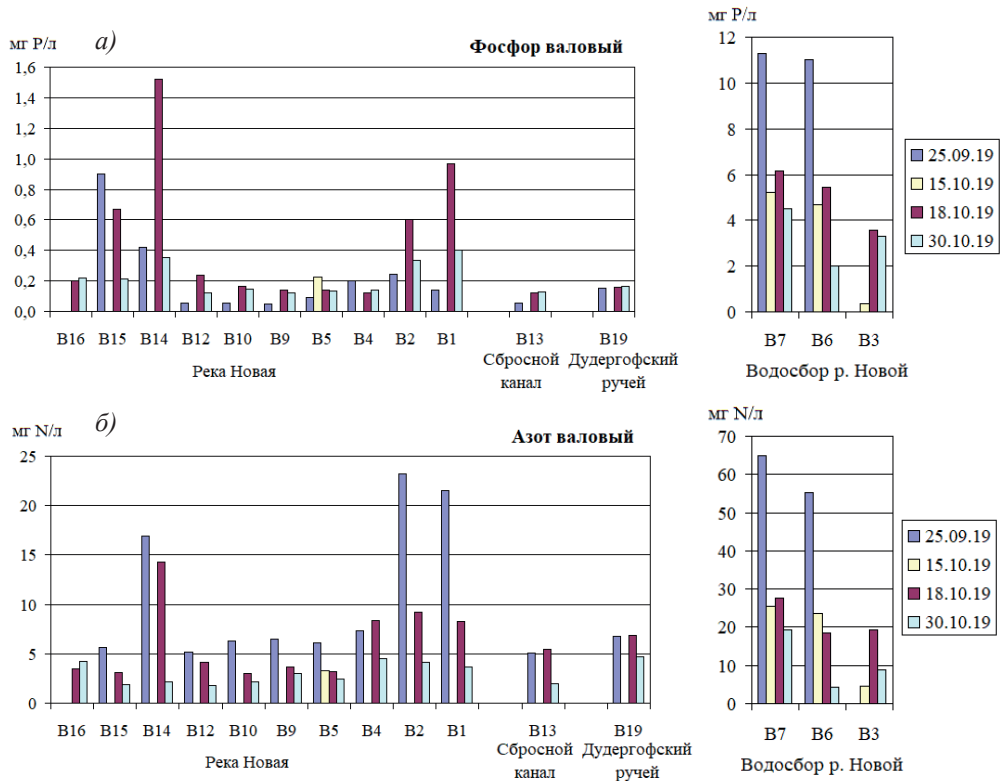


Рис. 3 (начало). Динамика содержания биогенных элементов и показателей органического вещества в поверхностных водах исследуемой территории по данным, полученным в 2019 г.

а — валовый фосфор, *б* — валовый азот.

Fig. 3. The dynamics of nutrients and of organic matter indicators in the surface waters of the study area according to data obtained in 2019.

a — total phosphorus, *b* — total nitrogen.

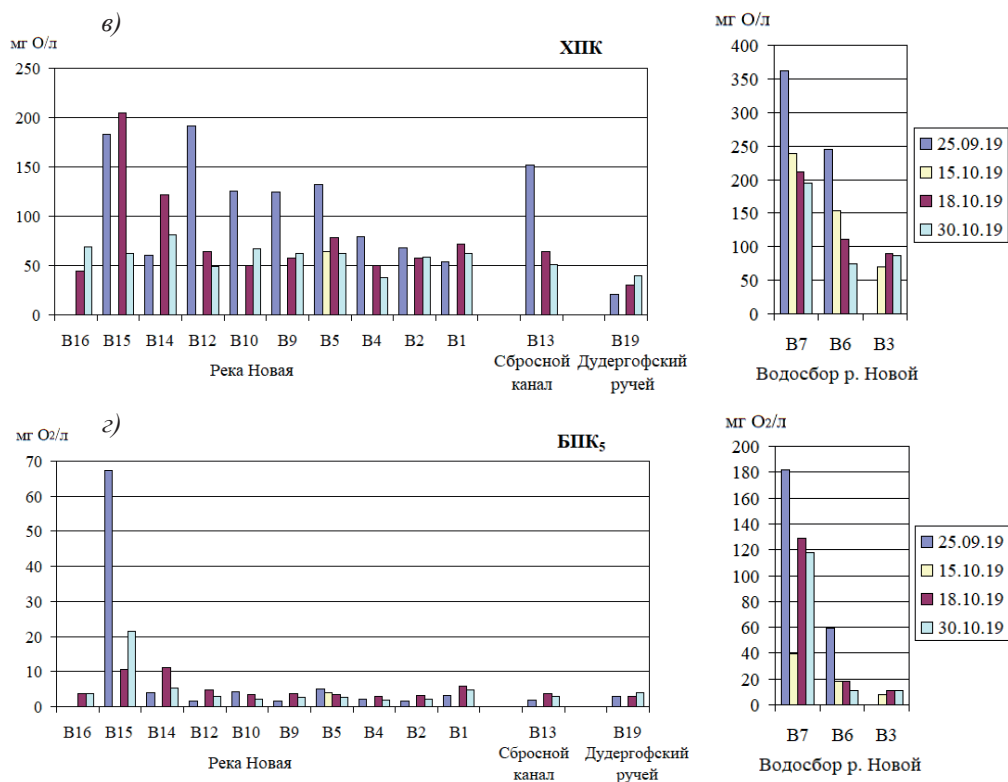


Рис. 3 (окончание). Динамика содержания биогенных элементов и показателей органического вещества в поверхностных водах исследуемой территории по данным, полученным в 2019 г.

в — ХПК, з — БПК₅.

Fig. 3. The dynamics of nutrients and of organic matter indicators in the surface waters of the study area according to data obtained in 2019.

в — COD, з — BOD₅.

части речного русла и канавам вблизи ЗАО «Предпортовый». В обоих случаях основным источником органического вещества в воде является поступающий сюда навоз. В целом пространственному распределению показателей ОВ свойственна та же закономерность, что и распределению биогенных элементов. Для большей части водной системы характерна крайне низкая степень аэрации водной массы, что существенно снижает скорость протекания деструкционных процессов. Наиболее катастрофическая ситуация сложилась в дренажных канавах вблизи животноводческого предприятия (ст. В6 и В7), где периодически отмечалось полное отсутствие кислорода.

В ходе ежедневных визуальных наблюдений, проводившихся в районе между КАД и железной дорогой, а также в районе прудов на территории жилой застройки,

на поверхности воды периодически фиксировались белесые пузырящиеся пленки. Выяснилось, что трансфер пленок связан с деятельностью ЗАО «Предпортовый» и объясняется периодической промывкой доильных залов предприятия. Отходы промывки по сточным канавам поступают в болотистую пойму р. Новой у железной дороги, а затем попадают в пруды. При этом следует заметить, что не удалось зафиксировать моменты непосредственных сбросов, которые, возможно, производятся в ночное время. Однако в данном случае молоко, смешанное с навозом, является трассером, показывающим пути распространения сбросов сточных вод от животноводческого предприятия до рассматриваемой водной системы, а также индикатором наличия таких сбросов.

Для всей водной системы характерно постоянное превышение нормативов по содержанию нефтепродуктов ($1,1\text{—}22$ ПДК_{вр}) и фенолов ($2\text{—}1070$ ПДК_{вр}), основной причиной которого является движение автотранспорта как по автомагистралям, пересекающим водосборную территорию, так и по сельхозугодиям. Очевидно, в данном случае фенолы на водосборе имеют в основном вторичное происхождение, являясь промежуточным продуктом распада нефтепродуктов [6].

По большинству гидрохимических показателей качество воды в Дудергофском ручье заметно выше, чем в р. Новой. В отличие от р. Новой в Дудергофском ручье благодаря интенсивному течению и наличию грунтового питания качество воды меньше зависит от погодных условий, в частности отсутствия или наличия атмосферных осадков.

Загрязнения воды и донных отложений изучаемой водной системы, а также почв водосбора приоритетными органическими загрязняющими веществами, в том числе этиленгликолем, этанолом, изопропиловым спиртом, бутиловым спиртом и ацетоном, поступавшими ранее в водную систему с территории аэропорта Пулково, не выявлено. Концентрация вышеперечисленных веществ практически во всех проанализированных пробах была ниже предела чувствительности аналитического определения. Таким образом, показано отсутствие накопления ОЗВ в донных отложениях и почвах, которое потенциально могло бы привести к вторичному загрязнению водной системы. В элементном составе донных отложений отмечено повышенное относительно регионального норматива содержание цинка в районе КАД [7] и меди вблизи железнодорожных путей.

По результатам натурных исследований можно заключить, что наиболее загрязненным является участок дренажной системы вблизи животноводческого предприятия ЗАО «Предпортовый». Экстремально высокие концентрации биогенных и органических веществ характерны также для вод верхней части водосбора в виде застойных луж, которые образуются в старом русле при длительном отсутствии атмосферных осадков. В соответствии с критериями оценки степени химического загрязнения поверхностных вод, изложенными в документе «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия», утвержденном Минприроды РФ 30 ноября 1992 г., экологическая ситуация на водной системе р. Новой оценена как чрезвычайная, а на некоторых ее участках по ряду параметров — как зона экологического бедствия.

Для анализа влияния сельскохозяйственной деятельности в границах водосбора исследуемой водной системы на биогенное загрязнение водных объектов был выполнен расчет среднегодового выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий ЗАО «Предпортовый», расположенных на водосборе р. Новой. Для этого использовалась методика, разработанная в Институте инженерных и агроэкологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), которая позволяет рассчитывать среднегодовой биогенной вынос с сельскохозяйственных территорий как в существующих условиях, так и после внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) ведения сельскохозяйственного производства [8—12]. НДТ представляют собой комплекс мероприятий, связанных со снижением биогенной нагрузки на сельскохозяйственные территории, и включают технологии переработки и хранения навоза и помета животноводческих комплексов и птицефабрик, технологии внесения органических и минеральных удобрений с учетом агротехнических требований. Эмиссия азота и фосфора в стекающие дождевые и талые воды рассчитывалась в зависимости от площади сельскохозяйственных угодий, на которых осуществляется хозяйственная деятельность и которые имеют привязку к водотокам [10, 11, 13]. Рассматривались два источника азота и фосфора — почва и удобрения (минеральные и органические).

В соответствии с разработанной методикой в расчетах биогенной нагрузки учитывались следующие факторы, влияющие на вынос азота и фосфора в водные объекты:

- содержание азота и фосфора в почве, вклад их выноса в общее содержание в почве;
- количество азота и фосфора в составе минеральных удобрений и коэффициент их эмиссии;
- количество азота и фосфора в составе органических удобрений и коэффициент их эмиссии;
- удаленность контура сельскохозяйственных угодий от водных объектов;
- тип почв по происхождению и по механическому составу;
- структура сельхозугодий (соотношение площадей пашни и многолетних трав, лугов, пастбищ, залежи);
- перспективы использования НДТ.

Расчеты выполнялись для среднего многолетнего стока в северо-западном регионе России, равного 300 мм/год [14]. Результаты расчетов нагрузки валовыми формами азота и фосфора на водные объекты верхней полевой части изучаемого водосбора представлены в табл. 1

Если площадь полевой части водосбора, по оценкам, составляет 426 га ($4260\,000\text{ м}^2$), а средний многолетний слой стока для этого региона равен 300 мм/год (0,3 м/год), то объем водной массы, стекающей с этой территории и поступающий в систему прудов, составляет $1278\,000\text{ м}^3$. При этом средняя концентрация фосфора в дренажных водах, стекающих с верхней части водосбора, равна 414 мг/м^3 . Это более чем в десять раз превосходит границу перехода водной экосистемы в эвтрофное состояние и в четыре раза выше границы гиперэвтрофии [3—5].

Таблица 1

Результаты расчета нагрузки валовым азотом и фосфором
на водные объекты верхней (полевой) части водосбора р. Новой

The results of calculation of load with gross nitrogen and phosphorus
on water bodies of the upper (field) part of the watershed of river Novaya

	Современное поступление при стоке 300 мм/год	Прогнозное поступление при внедрении НДТ
N _{вал}	10096,2 кг N/год	7249,3 кг N/год
P _{вал}	529,1 кг P/год	480,7 кг P/год

Поскольку в рассматриваемой водной системе отсутствуют какие-либо поступления разбавляющих природных вод, можно сказать, что наличие животно-водческого комплекса на изучаемом водосборе гарантирует экстремально низкие показатели качества дренажных вод, питающих нижележащие пруды. Естественное предположение о том, что в период выпадения интенсивных осадков происходит «промывка» системы и временное улучшение качества воды, подтверждено данными натурных наблюдений, проведенных в рамках данного исследования. Вероятно, «промывка» системы происходит также в период снеготаяния. При этом на начальном этапе «промывки» отмечается резкое увеличение содержания в воде фосфора и нефтепродуктов за счет интенсивного их поступления со склоновым стоком.

Таким образом, основная экологическая проблема водной системы р. Новой в настоящее время — это биогенное и органическое загрязнение. Основной причиной является интенсивная сельскохозяйственная деятельность на водосборе. В результате огромное количество биогенных и органических веществ поступает в гидрографическую сеть, функционирующую в условиях низкой проточности, что усугубляет развитие негативных процессов в экосистеме. По большинству гидрохимических показателей качество воды в Сбросном канале в настоящее время выше, чем в р. Новой, и схоже с таковым в Дудергофском ручье.

Ежедневные визуальные наблюдения на городской части водной системы р. Новой (см. рис.1) позволили выявить ряд несанкционированных источников загрязнения. К ним относятся стоки с территории гаражей, расположенных между железной дорогой и проспектом Народного Ополчения, а также многочисленные сбросы неизвестного происхождения на акваторию прудов, которые должны быть закрыты соответствующими муниципальными органами власти.

Как было отмечено выше, верхняя часть водосбора р. Новой представляет собой дренажную систему, расположенную на сельскохозяйственных угодьях, отводящую дождевой и талый сток с полей и не имеющую грунтового питания. В утвержденном Постановлении Правительства РФ от 28 февраля 2019 г. № 206 «Положении об отнесении водного объекта или части водного объекта к водным объектам рыбохозяйственного значения и определении категорий водных объектов рыбохозяйственного значения» дренажные системы не упоминаются, и, следовательно, они не являются водными объектами, на которые распространяется его действие. В соответствии с данным Положением пруды могут быть отнесены

к категории водных объектов рыбохозяйственного значения только по заявлению собственника при их соответствии одному из следующих критериев:

— водный объект или часть водного объекта представляет собой место обитания, размножения, зимовки, нагула, путей миграций водных биологических ресурсов (при наличии одного из показателей);

— водный объект или часть водного объекта используется для добычи (вылова) водных биологических ресурсов;

— водный объект или часть водного объекта используется для сохранения и искусственного воспроизводства водных биологических ресурсов.

Как показал анализ гидрологического режима р. Новой, если период отсутствия осадков превышает десять дней, сток в системе прекращается; при этом стоячая вода на русловых участках сохраняется только в углублениях. Естественно, что в таких условиях ни о каком нересте и нагуле рыб говорить не приходится.

Результаты исследований сезонной динамики гидрохимических показателей, выполненные ИНОЗ РАН на прудах изучаемой системы в 2011—2013 гг., показали, что даже в поверхностных слоях в период открытой воды фиксируется дефицит кислорода (ниже 10 % насыщения), а в придонных отмечается полное его отсутствие и образование токсического газа — сероводорода, что неминуемо приводит к развитию заморных явлений и гибели рыбного населения. В целом качество воды водной системы р. Новой не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к объектам рыбохозяйственного значения в соответствии с Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 12 октября 2018 г.), по ряду важнейших показателей: состоянию водной поверхности, содержанию растворенного кислорода, значению биохимического потребления кислорода и концентрации ионов аммония NH_4^+ .

Кроме того, мелководные пруды в зимний период могут промерзать до дна, как, например, это было зафиксировано ИНОЗ РАН в марте 2012 г. на пруду № 2, что также препятствует жизнедеятельности рыбного населения, а конструкция водослива из пятого пруда в подземный коллектор исключает миграцию рыб между верхними и нижними частями водной системы. Едва ли может происходить нерест и нагул рыб и в коллекторной сети, соединяющей р. Новую с Дудергофским каналом.

Основные рекомендации по улучшению экологического состояния

На основе анализа результатов, полученных в ходе выполнения настоящей работы, сформулированы следующие рекомендации по улучшению экологического состояния р. Новой.

Оптимизация сельскохозяйственного производства за счет внедрения предприятием КРС ЗАО «Предпортовый» наилучших доступных технологий ведения сельского хозяйства. Как показали расчеты в результате внедрения НДТ биогенная нагрузка на верхнюю сельскохозяйственную часть изучаемой водной системы может снизиться на 48,4 кг P/год и 2847 кг N/год.

Удаление из водной системы биогенных и загрязняющих веществ за счет осеннего выкашивания макрофитов на участке «реки» от КАД до железной дороги, где расположена болотистая пойма, заросшая камышом и другой высшей водной растительностью. Таким образом, вещества, аккумулированные в растительной массе за период вегетации, выводятся из их круговорота в водной экосистеме. Корневая система растений при этом должна быть сохранена. В настоящее время указанный метод оздоровления водных объектов используется на городских водоемах.

Организация прибрежной защитной полосы (в соответствии с Водным кодексом РФ, Статья 65 Водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы), препятствующей попаданию загрязнений с водосбора непосредственно в рассматриваемый водный объект, что особенно актуально для верховий водосбора, расположенных среди сельскохозяйственных угодий. Одним из основных источников загрязнения в этой части водосбора является большое количество навоза непосредственно на берегах так называемой реки Новой. Отсутствие прибрежной защитной полосы, обязательной для водных объектов рыбохозяйственного значения, к которым официально причислена р. Новая, способствует беспрепятственному смыву навоза в водный объект дождевыми и талыми водами.

Возвращение стока с верховий водосбора реки в прежнее русло. Выявлены места возможной организации переброски стока с естественных верховий р. Новой, который в настоящее время отведен в р. Дудергофку через Дудергофский ручей. Расстояние от русла Дудергофского ручья до ближайших дрен рассматриваемой системы составляет немногим более 200 м. В результате будет обеспечена проточность водной системы и существенное улучшение характеристик качества воды за счет поступления более чистых речных вод, имеющих природное питание. В случае реализации настоящего проекта рассматриваемый водный объект снова станет рекой. Положительный экологический эффект от реализации этого проекта будет максимальным по сравнению с предыдущими, так как увеличение проточности водоема — наилучший способ его восстановления. Однако даже в случае успешной реализации проекта по переброске стока в прежнее русло р. Новой ее рыбохозяйственное значение останется под вопросом. Это связано с возможным несоответствием показателей качества воды утвержденным для водных объектов рыбохозяйственного значения нормативам, несмотря на прогнозируемое улучшение ситуации, а также с наличием оригинальной конструкции водослива из пятого пруда, сток из которого попадает в Александринский коллектор и пруд усадьбы Александрино. Следует заметить, что инженерные методы реализации этого проекта, а также оценка экологических последствий для р. Дудергофки выходят за рамки настоящей публикации.

Благодарности

Работа выполнена при финансовом обеспечении проекта «Исследования на водосборе р. Новой с целью выявления основных источников ее загрязнения и разработки рекомендаций по улучшению ее экологического состояния», а также

за счет средств федерального бюджета в рамках темы № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Acknowledgments

This work was financially supported by the project “Research on the catchment of the river Novaya to identify the main sources of its pollution and develop recommendations for improving its ecological condition” and at the expense of the federal budget under the topic No. 0154-2019-0001 “Comprehensive assessment of the dynamics of ecosystems of Lake Ladoga and reservoirs of its basin under the influence of natural and anthropogenic factors”

Список литературы

1. Водные объекты Санкт-Петербурга / Под ред. С.А. Кондратьева и Г.Т. Фрумина. СПб: Символ, 2002. 348 с.
2. Румянцев В.А., Игнатьева Н.В. Система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на водоемах. СПб: ВВМ, 2006. 152 с.
3. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 336 с.
4. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1977. V. 22. P. 361—369.
5. Vollenweider R.A., Kerekes I. The loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication // *Progr. Wat. Technol.* 1980. V. 12. No 2. P. 5—38.
6. Каплин В.Т. Превращение органических соединений в водоемах // *Гидрохим. материалы.* Л.: Гидрометеиздат, 1967. Т. 45. С. 201—226.
7. Пишенин В.Н. Актуальные вопросы оценки загрязнения почвенного покрова вблизи автомагистралей // *Труды Всероссийского научно-практического семинара «Экологизация автомобильного транспорта».* СПб: МАНЭБ, 2003. С. 83—88.
8. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Васильев Э.В., Минакова Е.А., Терехов А.В., Обломкова Н.С. Оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки, сформированной на речных водосборах бассейна Куйбышевского водохранилища // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*, 2018. № 96. С. 175—186.
9. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем. — СПб: Нестор — История, 2019. 246 с.
10. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Ершова А.А., Обломкова Н.С. К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 51. С. 109—120.
11. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Огуздин А.С., Субботин И.А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*, 2016. № 89. С.175 — 183.
12. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Тарбаева В.М., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Воробьева Е.А., Обломкова Н.С. Научное обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России // *Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География*, 2016. Вып.4. С. 53—65.
13. Брюханов А.Ю. Методы проектирования и критерии оценки технологий утилизации навоза, помета, обеспечивающие экологическую безопасность / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2016. 39 с.
14. Соколов А.А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 287 с.

References

1. *Vodnyye ob'ekty Sankt-Peterburga*. Water bodies of St. Petersburg. St. Petersburg: Publishing House Symbol. 2002: 348 p. [In Russian].
2. *Rumyantsev V.A., Ignatieva N.V. Sistema ranney diagnostiki krizisnykh ekologicheskikh situatsiy na vodoyemakh*. System for early diagnosis of environmental crisis situations in water bodies. St. Petersburg: VVM, 2006: 152 p. [In Russian].
3. *Henderson-Sellers B.* Engineering Limnology. Boston, London, Melbourne: Pitman Advanced Publishing Program, 1984: 336 p.
4. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1977. 22: 361—369.
5. *Vollenweider R.A., Kerekes I.* The loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication. *Progress in Water Technology.* 1980, 12 (2): 5—38.
6. *Kaplin V.T.* The conversion of organic compounds in water bodies. *Gidrokhimicheskiye materialy*. Hydrochemical materials. 1967, 45: 201—226. [In Russian].
7. *Pshenin V.N.* Actual issues of assessing soil pollution near highways. *Aktual'nyye voprosy otsenki zagryazneniya pochvennogo pokrova vblizi avtomagistralei*. Transactions of the All-Russian Scientific and Practical Seminar "Ecologization of Road Transport". 2003: 83—88. [In Russian].
8. *Bryukhanov A.Yu., Kondratiev S.A., Vasiliev E.V., Minakova E.A., Terekhov A.V., Oblomkova N.S.* Assessment of agricultural nutrient load formed on river catchments of the Kuibyshev reservoir. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2018, 96: 175—186. [In Russian].
9. *Kondratiev S.A., Shmakova M.V. Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor — vodotok — vodoyem*. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment-watercourse-pond system. St. Petersburg: Nestor - History, 2019: 246 p. [In Russian].
10. *Kondratiev S.A., Shmakova M.V., Bryukhanov A.Yu., Viktorova N.V., Ershova A.A., Oblomkova N.S.* On the assessment of nutrient runoff into the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2018, 51: 109—120. [In Russian].
11. *Bryukhanov A.Yu., Kondratiev S.A., Oblomkova N.S., Oguzdin A.S., Subbotin I.A.* Methodology for determining the biogenic load of agricultural production on water bodies. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2016, 89: 175—183. [In Russian].
12. *Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A., Tarbaeva V.M., Shmakova M.V., Bryukhanov A.Yu., Vorobyova E.A., Oblomkova N.S.* The scientific rationale for the implementation of the HELCOM recommendations to reduce the nutrient load on the Gulf of Finland from Russia. *Bulletin of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography. Vestnik SPbGU. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2016, 4: 53-65. [In Russian].
13. *Bryukhanov A.Yu. Metody proyektirovaniya i kriterii otsenki tekhnologiy utilizatsii navoza, pometa, obespechivayushchiye ekologicheskuyu bezopasnost'*. Design methods and evaluation criteria for technologies for the disposal of manure, litter, ensuring environmental safety: Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg, 2016: 39 p. [In Russian].
14. *Sokolov A.A. Gidrografiya SSSR*. Hydrography of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1952: 287 p. [In Russian]

Статья поступила 27.03.2020

Принята после доработки к публикации 13.05.2020

Сведения об авторах

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, Институт озерадения РАН, заведующий лабораторией математических методов моделирования, kondratyev@limno.org.ru

Брюханов Александр Юрьевич, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, sznii@yandex.ru

Игнатьева Наталья Викторовна, канд. геогр. наук, Институт озераведения РАН, заведующий лабораторией гидрохимии, natali_ignatieva@mail.ru

Лапенков Артем Евгеньевич, Институт озераведения РАН, лаборатория географии и гидрологии, инженер, lake@limno.org.ru

Расулова Анна Мурадовна, канд. физ.-мат. наук, Институт озераведения РАН, лаборатория математических методов моделирования, младший научный сотрудник, arasulova@gmail.com

Терехов Антон Викторович, Институт озераведения РАН, лаборатория географии и гидрологии, младший научный сотрудник, terextepex@gmail.com

Обломкова Наталья Сергеевна, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, научный сотрудник, oblomkovan@gmail.com

Information about authors

Kondratiev Sergey Alekseevich, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), Institute of Limnology of RAS, Head of the Laboratory of Mathematical Methods of Modeling, kondratyev@limno.org.ru

Bryukhanov Alexander Yuryevich, Grand PhD (Tech. Sci.), Corresponding Member of RAS, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production — Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, sznii@yandex.ru

Ignatieva Natalya Viktorovna, PhD (Geogr. Sci.), Institute of Limnology of RAS, Head of the Laboratory of Hydrochemistry, natali_ignatieva@mail.ru

Lapenkov Artem Evgenievich, Institute of limnology of RAS, Laboratory of Geography and Hydrology, engineer, lake@limno.org.ru

Rasulova Anna Muradovna, PhD (Phys. and Math. Sci.), Institute of Limnology of RAS, Laboratory of Mathematical Methods of Modeling, Junior Researcher, arasulova@gmail.com

Terekhov Anton Viktorovich, Institute of Limnology of RAS, Laboratory of Geography and Hydrology, Junior Researcher, terextepex@gmail.com

Oblomkova Natalya Sergeyevna, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production — Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, Researcher, oblomkovan@gmail.com

УДК 551.508:656

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123

Структура живучей сети метеокомплексов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0»

В.В. Грызунов, А.О. Нестерова

Российский государственный гидрометеорологический университет, viv@a-tree.ru

Представлен вариант решения задачи метеорологического сопровождения транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» достоверными метеоданными за счет создания живучей структуры Сети метеокомплексов (Сети). Дано понятие гидрометеорологической сети. Приведены способы решения возникающего противоречия между требованиями предприятий, основывающихся на Индустрии 4.0, и возможностями Сети. Повысить вероятность выполнения задач, поставленных перед Сетью, предлагается за счет выбора живучей структуры Сети. Выбор осуществляется на основе критериев оптимальности: *d*-инвариантность и качество структуры, которые показывают, насколько сбалансирована структура сети. Проанализированы такие варианты структуры сети метеокомплексов, как шина, кольцо, звезда, полносвязная, решетка, тор, гиперкуб, ячеистая, циркулянты.

Ключевые слова: киберфизическая система, Индустрия 4.0, гидрометеорологическое обеспечение, прогноз погоды, цифровая метеорология, живучесть структур.

Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems “Industry 4.0”

V.V. Gryzunov, A.O. Nesterova

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

In industry, more and more money is being invested in transition to new standards - Industry 4.0. The network of weather stations (Network) required by Industry 4.0 must capture and transmit data exceeding 200 times the amount of current data and have transmission delays not exceeding 30 seconds. The main requirement of Industry 4.0 for the Network is the high efficiency of delivering reliable data to a consumer.

If a Network element fails, the consumer loses data not only of the failed element, but also of all elements transmitting their data through it. That is, the consumer does not receive reliable data, the probability of completing a task by the entire Network becoming less. The Network structure maximizing the probability of executing the tasks by the Network has been chosen in the article.

The laws of distribution describing appearance or disappearance of Network elements are unknown and impossible to be obtained, therefore, the survivability index of the Network should not depend on the laws of distribution, that is, it should be incredible. It is the *d*-invariantism, the indicator showing the uniform distribution of weights (significance) among the structural elements. If the significance of all the arcs/ nodes is the same, the *d*-invariance equals 1, that is, the structure does not care which element will be deleted.

If several structures with the same *d*-invariantism are possible on the given sets, then, to compare the structures with each other, we propose to use the indicator of structure quality, revealing the structure with the least average number of bonds per node. Using the indicators described above, the following structures have been evaluated: star, fully connected structure, tire, hypercube, lattice, torus, mesh, circulant. Having analyzed these structures, the following conclusions can be drawn: ring-containing structures are more

survivable; the most survivable structure in the sense of d-invariantism is the circulant D (16; 1,7). These indicators allow to obtain the maximum possible probability of executing the tasks by the Network.

Keywords: cyber-physical system, industry 4.0, hydrometeorological support, weather forecast, digital meteorology, structure survivability.

For citation: *V.V. Gryzunov, A.O. Nesterova. Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems "Industry 4.0".* *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University).* 2020. 59: 111—123. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123

Введение

В промышленности все больше денег инвестируется в переход на новые стандарты — «Индустрия 4.0». В рамках этих стандартов виртуальные и физические системы интегрируются между собой, образуя киберфизические системы [1]. Так, например, к 2020 г. только в одной Германии планируется инвестировать в переход на «Индустрию 4.0» до 140 млрд евро в год [2]. В «Индустрии 4.0» подразумевается автоматизация полной технологической цепочки: от добычи полезных ископаемых до доставки до потребителя конечного продукта [3]. Системы «Индустрии 4.0» проектируются как унифицированные, распределенные, многофункциональные с рекурсивным самовоспроизводящимся адаптивным замкнутым характером коммутационных отношений [2, 4, 5, https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/50451/INDUSTRIYA_4_0_NOVAYA_PROMYSHLENNAYA_POLITIKA_GERMANII.pdf].

Уже сегодня от запроса товара с заданными характеристиками до его изготовления и доставки до потребителя проходит от 30 минут (обычная пицца на дом) до нескольких недель (кроссовки Nike или мотоцикл Harley Davidson). Компании планируют доставлять товары дронами. Доставка товаров до потребителей по воздуху по версии компании Amazon — «максимально быстрый и эффективный путь из точки А в точку Б». Дроны являются крайне чувствительными к метеоусловиям на маршруте доставки. В настоящее время речь идет о расстоянии до 10 км, но в ближайшем будущем можно ожидать существенное увеличение этого расстояния. Более того, «разнообразное практическое применение недорогих, коммерчески доступных воздушных и подводных дронов — это вопрос нескольких лет» [3].

Таким образом, остро встают вопросы метеорологического сопровождения дронов, образующих полноценную транспортно-логистическую систему, чувствительную к метеорологическим данным. Метеорологическое сопровождение транспортно-логистических систем обозначено как приоритетное направление развития РФ в «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной Указом Президента РФ [<http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>]. В РФ метеоусловия контролируются посредством глобальной наблюдательной сети, обеспечивающей получение характеристик гидрометеорологических явлений и процессов, происходящих в крупном или планетарном масштабах, для глобальных потребностей [<https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293848/4293848976.pdf>].

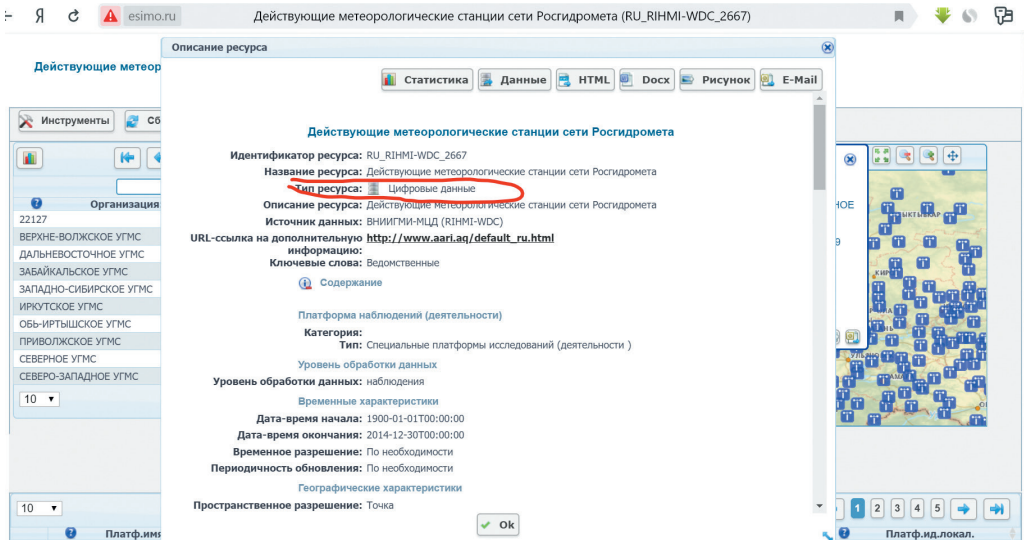


Рис. 1. Действующие метеорологические станции РФ.

Fig.1. Existing meteorological complexes Russian Federation.

Гидрометеорологической сетью называют совокупность учреждений, ведущих метеорологические и гидрологические наблюдения. В каждом субъекте РФ имеются управления Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), которые руководят работой всех гидрометеорологических станций, обсерваторий, пунктов наблюдений, находящихся на обслуживаемой территории. К числу участников деятельности гидрометеорологической службы принадлежат организации наблюдательной сети (ОНС): в системе Росгидромета они являются основным организационным звеном государственной сети.

Информация с гидрометеорологических постов поступает на станции, где она кодируется и откуда передается в территориальные управления Росгидромета. В этих управлениях составляются прогнозы погоды, которые передаются потребителям гидрометеорологической информации.

Перечень действующих метеостанций, передающих данные в цифровом режиме, приведен на портале «Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане» (рис. 1).

Государственная наблюдательная сеть (далее Сеть) включает следующие наблюдательные сети [https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293848/4293848976.pdf]:

- гидрологическая на реках и каналах;
- аэрологическая (радиозондирование);
- гидрометеорологическая на озерах и водохранилищах;
- метеорологическая радиолокационная (МРЛ);

- магнитная;
- метеорологическая;
- морская гидрометеорологическая;
- воднобалансовая;
- авиаметеорологическая;
- актинометрическая;
- агрометеорологическая;
- гелиогеофизическая;
- гляциологическая;
- ионосферная;
- гидрологическая на болотах;
- озонотрическая;
- селестоковая;
- теплбалансовая;
- снеголавинная;
- наблюдательные сети:
 - за испарением с поверхности воды, почвы, снега;
 - за атмосферным электричеством;
 - за уровнем загрязнения атмосферного воздуха;
 - за уровнем загрязнения морских вод и донных отложений;
 - за уровнем загрязнения поверхностных водных объектов по гидробиологическим показателям;
 - за уровнем загрязнения поверхностных вод суши;
 - за уровнем загрязнения почвы;
 - за уровнем радиоактивного загрязнения природной среды;
 - за уровнем загрязнения снежного покрова;
 - за фоновым состоянием окружающей среды (на специализированных фоновых станциях) и трансграничным переносом загрязняющих веществ;
 - за химическим составом осадков.

Оконечным оборудованием Сети являются метеорологические и гидрометеорологические станции. Эти станции, согласно действующим на сегодня нормативам, должны быть размещены на типичном для окружающей местности участке, к которому предъявляется ряд требований. Обслуживание и ремонт метеостанций могут занимать до 30 суток [<http://docs.cntd.ru/document/1200068361>]. Метеоданные снимает метеоролог с периодичностью от 3 до 7 часов. Стоит обратить внимание на то, что время и точность измерений могут непредсказуемо изменяться [6, 7].

В основе метеорологического сопровождения транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» лежат компьютерные модели климата и погоды [8]. Для составления надежных прогнозов необходима высокая достоверность предоставляемых метеоданных с периодичностью от нескольких минут до нескольких секунд [8]. Так, например, для моделей с горизонтальным шагом 50—100 км требуемая периодичность составляет 5—8 минут, а для моделей горизонтальным разрешением 15—20 км — не более 1—2 минут [7].

Весьма вероятным методом определения метеорологических параметров в ближайшем будущем станет использование моделей численного анализа погоды [6]. Этот метод требует предоставлять данные кинематических наблюдений в еще более жестком режиме — режиме реального времени.

Как видно из приведенных фактов, существует противоречие между требованиями потребителя в лице предприятий формата «Индустрия 4.0» к достоверности и оперативности предоставления метеорологических данных и текущими возможностями Сети. Данное противоречие может быть устранено, например, за счет интеграции Сети и частных метеокомплексов через Интернет вещей (IoT), а также специальных датчиков, сопровождающих перевозимые грузы и передающих информацию о погодных условиях на всем пути следования грузов с высокой точностью, создание сеточных массивов климатических данных [9], которые будут в основу цифровой карты Земли, отображающей погоду и климат в масштабе времени, близком к реальному.

Метеокомплекс — устройство для дистанционного измерения и передачи потребителю метеорологических данных. Старые метеокомплексы поставляли данные один раз в 3—7 часов, в то время как требования к современным — один раз в минуту. Следовательно, даже при сохранении объема измерений и числа станций объем передаваемых данных должен возрасти больше чем в 200 раз. Внедрение сеточных массивов для снятия метеоданных существенно увеличит и эту цифру. До появления Индустрии 4.0 Сеть работала с небольшим объемом данных и допускала задержки в передаче данных около суток и дольше. Сеть, необходимая Индустрии 4.0, должна снимать и передавать превышающий в 200 раз объем данных, и задержки при передаче не должны превышать 30 секунд.

Главное требование Индустрии 4.0 к Сети — высокая оперативность доставки достоверных данных до потребителя. Оперативность получения данных состоит из частоты получения данных и скорости передачи данных потребителю через Сеть. Если снятые данные не доставлены в срок, их актуальность утрачивается и данные могут считаться недостоверными. Будем считать, что достоверные данные — это данные, снятые в соответствии с существующими требованиями и доставленные в центр обработки данных или другому потребителю в заданный срок без искажений.

Качество и периодичность съема данных зависят только от окончного оборудования Сети, а на своевременную доставку данных до потребителя, обработку и хранение влияют другие элементы Сети и способ их связи между собой. Очевидно, если элемент Сети выходит из строя, то потребитель теряет данные не только отказавшего элемента, но и всех элементов, которые транслируют свои данные через него. Таким образом, потребитель не получает достоверных данных, и вероятность выполнения задачи всей Сетью становится меньше.

Таким образом, цель настоящего исследования — выбрать структуру Сети, максимизирующую вероятность выполнения задач Сетью, — является актуальной. Для достижения обозначенной цели используются методы теории вероятностей и теории графов.

Методы

Введем вероятность выполнения задачи, поставленной перед Сетью, как показатель, оценивающий качество Сети. Этот показатель оценивает пригодность Сети для решения поставленных задач по предоставлению требуемого количества и качества метеоданных в заданный срок:

$$P = \frac{\Omega}{\Omega^*},$$

где P — вероятность выполнения задачи, поставленной перед Сетью; Ω — количество предоставленных Сетью измерений с требуемым качеством (качество задается потребителем метеорологических данных); Ω^* — требуемое количество измерений требуемого качества.

Качество — свойство или совокупность свойств объекта, обуславливающих его соответствие назначению [10].

Эффективность — это комплексное операционное свойство (качество) целенаправленного процесса функционирования системы, характеризующее его приспособленность к достижению цели операции (к выполнению задачи системы).

Из приведенной формулы следует, что $P \rightarrow 1 \Leftrightarrow \Omega \rightarrow \Omega^*$. Поскольку Ω^* задается потребителем услуг Сети и зависит от требуемой точности прогноза [7], то считаем эту величину константой. Следовательно, достичь требуемой вероятности выполнения задачи возможно, только увеличивая величину Ω , которая зависит от многих факторов, в том числе от работоспособности Сети.

Принимая во внимание приведенное выше противоречие между требованиями к предоставляемым данным и реальностью, можно утверждать, что для некоторых сегментов Сети $\Omega \ll \Omega^* \Rightarrow P \rightarrow 0$. По этой же причине довольно сложно получить даже приблизительную оценку вероятности выполнения задачи, поставленной перед Сетью.

Повысить вероятность выполнения задачи, то есть увеличить Ω , возможно путем внесения в Сеть функциональной и/или структурной избыточности. Функциональная избыточность подразумевает расширение функционала приборов, а значит, требует доработать существующие метеоконплексы или создать новые. Это длительный и дорогой путь. Внесение структурной избыточности позволяет достичь требуемой вероятности (увеличить Ω), объединяя существующие государственные и частные метеоконплексы в Сеть. В настоящей работе исследованы пути внесения структурной избыточности.

Как частные, так и государственные метеоконплексы, образующие структуру Сети и являющиеся ее элементами, могут добавляться в Сеть или исчезать из нее случайным образом в силу разных причин. Чтобы сохранить способность решать поставленные задачи, Сеть должна быть живучей.

Живучесть автоматизированной системы (АС) — свойство АС, характеризующее способностью выполнять установленный объем функций в условиях воздействий внешней среды и отказов компонентов системы в заданных пределах. Автоматизированная система (АС) — система, состоящая из персонала и комплекса

средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций. Поскольку в Сети присутствует обслуживающий персонал, а метеокомплексы автоматизируют деятельность по получению метеорологических данных, то можем считать Сеть автоматизированной системой.

Законы распределения появления или исчезновения элементов Сети неизвестны, получить их не представляется возможным, поэтому показатель живучести Сети не должен зависеть от законов распределения, то есть не должен быть вероятностным. На момент написания статьи известен один такой показатель — d -инвариантность. Сравнение d -инвариантности с другими возможными показателями и ее преимущества рассмотрены в [11].

D -инвариантность

Если применить предложенное выше определение живучести к структуре сети метеокомплексов, то можно сказать, что структурная живучесть характеризует способности структуры сети противостоять дестабилизирующим факторам. Дестабилизирующими факторами для сети метеокомплексов являются: естественный отказ, действия вандалов или злоумышленников, выход из строя в силу природных причин и т. д. На графе, моделирующем структуру сети, дестабилизирующие факторы отображаются посредством:

- 1) изменения степени вершин — числа связей, которые может образовать вершина;
- 2) удаления ребер;
- 3) удаления вершин.

Определение d -инвариантности

Пусть $G(V, E)$ — граф, где $V = \{v_i\}$, $i = \overline{1, N}$ — множество вершин и N — число вершин, а $E = \{e_i\}$, $i = \overline{1, L}$ — множество ребер и L — число ребер; $W = (w_i)$, $w_i \in [0; 1]$, $i = \overline{1, N + L}$ — множество весов элементов графа, w_{v_i} — вес v_i -й вершины, w_{e_i} — вес e_i -го ребра, $w_v^* = \max_{1 \leq i \leq N} \{w_{v_i}\}$ — максимальный вес вершины в графе, $w_e^* = \max_{1 \leq i \leq L} \{w_{e_i}\}$ — максимальный вес ребра в графе. Тогда **дестабилиинвариантностью** (далее d -инвариантностью) по вершинам называется величина

$$D_v = \prod_{i=1}^N \frac{w_{v_i}}{w_v^*},$$

а d -инвариантность по ребрам рассчитывается по формуле

$$D_e = \prod_{i=1}^L \frac{w_{e_i}}{w_e^*},$$

и D -инвариантность структуры есть

$$D_{ev} = D_e D_v.$$

Значимость элемента модели (вес вершины или дуги графа) может быть как субъективной, так и объективной. Субъективные веса назначаются экспертами: например, специальная метеостанция или метеостанция в особом месте более важна, чем обычная метеостанция. Объективными весами могут быть, например, степени вершин, число путей, проходящих через вершину или ребро. Один из возможных методов расчета значимости каждого элемента структуры с учетом большого числа показателей значимости приведен в работе [11].

Достоинства d -инвариантности заключаются в следующем:

- она пригодна для синтеза структуры живучей сети метеокомплексов, состоящей из разнородных элементов;
- возможен расчет без проведения статистических испытаний;
- может применяться при синтезе структуры живучей сети метеокомплексов в реальном масштабе времени, например в процессе самоорганизации. Так, структура может «собираться» из кусочков, устремляя к единице данный показатель каждый раз, как появляется новая информация о доступных или утраченных метеостанциях.

К недостаткам d -инвариантности относится необходимость значительных вычислительных мощностей для точного расчета d -инвариантности графов с большим числом вершин и дуг.

Свойства d -инвариантности

d -инвариантность имеет следующие свойства:

- показывает равномерность распределения весов (значимости) по элементам структуры. Если значимость всех ребер/вершин одинакова, то d -инвариантность равна единице, то есть структуре безразлично, какой элемент будет удален;
- область значений $[0; 1]$.

Следовательно, d -инвариантность показывает, насколько структура сбалансирована (симметрична) относительно воздействия дестабилизирующих факторов.

Качество структур

Живучесть структур предлагается оценивать d -инвариантностью. Если на заданных множествах V, E возможны несколько структур с одинаковой d -инвариантностью, то для сравнения структур между собой предлагается использовать показатель качества структуры, выявляющий структуру с наименьшим средним числом связей на одну вершину. Показатель качества рассчитывается следующим образом.

Пусть x_i — степень вершины v_i , а x_{cp} — средняя степень вершин:

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}.$$

Тогда качество структуры ищется в виде отношения d -инвариантности структуры к средней степени вершин:

$$J = \frac{D_{ev}}{x_{cp}}.$$

Если граф вырожден, то есть состоит из одной вершины, считается, что ее степень и d -инвариантность равны единице, а значит, $x_{cp} \geq 1$, $D_{ev} \in [0;1]$, и, следовательно, $J \in [0;1]$.

Результаты

Подробно d -инвариантность и качество наиболее распространенных структур, таких как полносвязная структура, звезда, гиперкуб, кольцо, решетка, шина, тор, а также перспективные структуры-циркулянты, рассмотрены в [11].

Таблица 1

Полносвязная структура и звезда
Fully connected structure and star

N	Звезда				Полносвязная структура			
	4	5	6	16	4	5	6	16
D_v	0,1250	0,0256	0,0041	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
D_e	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
D_{ev}	0,1250	0,0256	0,0041	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
x_{cp}	1,5000	1,6000	1,6667	1,8750	4,0000	5,0000	6,0000	16,0000
J	0,0833	0,0160	0,0025	0,0000	0,2500	0,2000	0,1667	0,0625

Нет противоречия опытным данным о том, что самая живучая структура — полносвязная. Поскольку в данной структуре все элементы соединены друг с другом попарно, то все возможные связи уже образованы, а значит, она содержит максимально возможное число колец. Однако с увеличением числа вершин возрастает число избыточных связей, поэтому уменьшается качество структуры. Приведенные выкладки относятся к любой сети, структура которой описывается графами.

Из табл. 1 понятно, что в смысле d -инвариантности более живучи звезды с меньшим числом лучей. Это подтверждается опытом *практической эксплуатации* компьютерных и телекоммуникационных сетей.

Из табл. 2 видна зависимость: чем больше элементов в шине, тем меньше ее живучесть. Это соответствует *практическому опыту эксплуатации* сетей, построенных на базе шины. Используя данные этой таблицы, можно сказать, что структуры, содержащие кольца, более живучи.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует неожиданный вывод. Ячейка имеет вершины с наибольшей степенью, но обладает самой маленькой живучестью, то есть качество такой структуры минимально.

Таблица 2

Общая шина (линейка) и кольцо
Bus (rule box) and ring

N	Кольцо				Шина			
	4	5	6	16	4	5	6	16
D_v	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3600	0,1914	0,1483	0,0007
D_e	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,5625	0,4444	0,2439	0,0014
D_{ev}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2025	0,0851	0,0362	0,0000
x_{cp}	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,5000	1,6000	1,6667	1,8750
J	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,1350	0,0532	0,0217	0,0000

Таблица 3

Решетка, тор, гиперкуб и циркулянт (см. рис. 2 и 3)
Mesh, torus, hypercube and circulant (see fig. 2 and 3)

$N = 16$

N	Гиперкуб	Решетка	Тор	Ячейка
D_v	1,0000	0,0667	0,2978	0,0504
D_e	1,0000	0,0079	0,1428	0,0000
D_{ev}	1,0000	0,0005	0,0425	0,0000
x_{cp}	4,0000	3,0000	3,5000	4,1250
J	0,2500	0,0002	0,0122	0,0000

Для всех циркулянтов $D_v = 1$, $D(16;1,6)$ является менее живучей, чем $D(16;1,7)$, в смысле d -инвариантности.

Необходимо отметить, что поскольку d -инвариантность не является вероятностным показателем, то перечень оптимальных в смысле d -инвариантности структур не изменится, если изменять законы распределения дестабилизирующих факторов, воздействующих на сеть метеостанций.

Для синтеза конкретной структуры живучей сети метеостанций можно воспользоваться методом, предложенным в [12], либо методами управления роом.

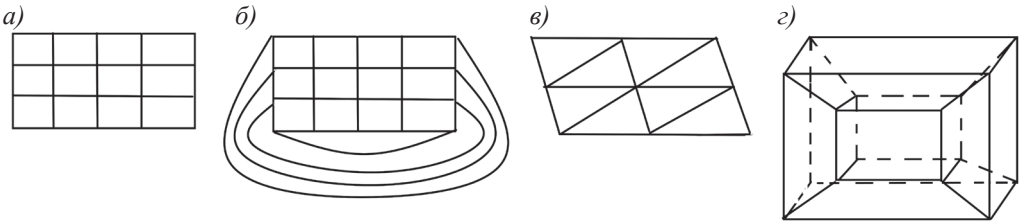


Рис. 2. Типовые структуры информационно-вычислительных систем.

a — решетка, b — тор, v — ячейка, z — гиперкуб.

Fig.2. Structural models of information computation system.

a — grid, b — torus, v — mesh, z — hypercube.

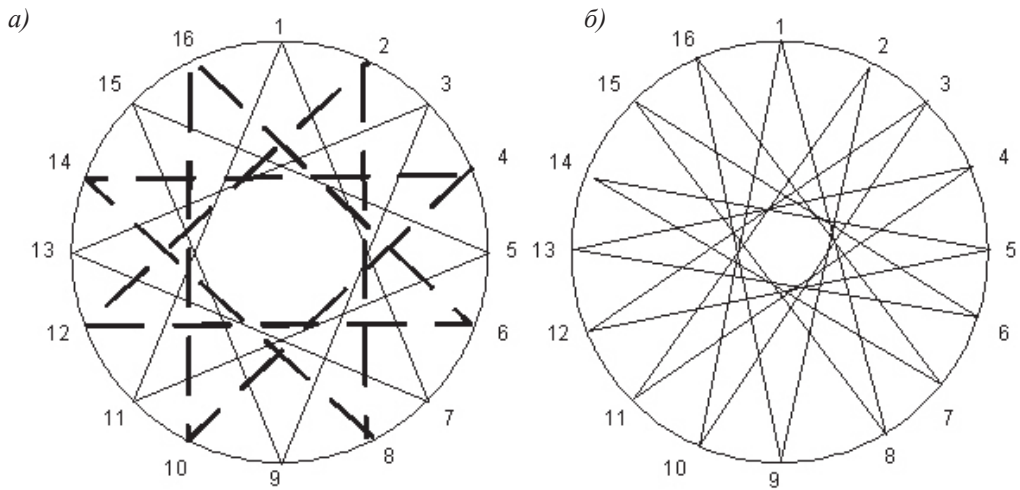


Рис. 3. Циркулянты.

a — циркулянт (16; 1, 6), *б* — циркулянт (16; 1, 7).

Fig. 3. Circulants.

a — circulant (16; 1, 6), *б* — circulant (16; 1, 7).

Выводы

Таким образом, цель, поставленная в исследовании, достигнута, и задача метеорологического сопровождения транспортно-логистических систем, обозначенная в [<http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>] как стратегическая для РФ, может быть решена посредством внесения структурной избыточности. Наиболее оправдано создание сети метеокомплексов, имеющей живучую структуру, — циркулянт. Однако в силу того, что метеостанции размещаются в специальных местах, выбор конкретной структуры живучей сети метеокомплексов зависит от возможностей разместить метеокомплексы на местности, в воздушном или водном пространстве и организовать связи между ними. Применение *d*-инвариантности и качества структуры позволит выбрать максимально живучую структуру из всех допустимых вариантов, а значит, обеспечить максимально возможные значения Ω и P .

Список литературы

1. Cyber-Physical Systems – Are Computing Foundations Adequate? Edward A. Lee Department of EECS, UC Berkeley Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, October 16–17, 2006, Austin, TX https://ptolemy.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPPositionPaper/Lee_CPS_PositionPaper.pdf. [Электронный ресурс]. Дата обращения 11.12.2019.
2. Кара-Сал А., Левченко М. Концепция цифровой цепочки поставок // Электронный научно-практический журнал «Молодежный научный вестник». 2018. [Электронный ресурс]. http://www.mnvnauka.ru/2018/06/06_2018.pdf#page=69. Дата обращения 11.12.2019.

3. Шваб К. Четвертая промышленная революция World Economic Forum. 2016. АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка», 2016.
4. Иванов Д.А., Иванова М.А., Соколов Б.В. Анализ тенденций изменения принципов управления предприятиями в условиях развития технологий Индустрии 4.0. DOI 10.15622/sp.60.4 SPIIRAS Proceedings. 2018. Issue 5(60). <http://proceedings.spiiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3796/2233>
5. Свистунова И.Г., Боговиз А.В., Попкова Е.Г. Инновационная модель агропромышленного воспроизводства в условиях индустрии 4.0: особенности и перспективы // АПК: экономика, управление. 2018. № 5. С. 4—10.
6. Антонович К.М., Фролова Е.К. Обзор современных методов получения метеорологической информации для использования в ГИСС технологиях // ГЕО-СИБИРЬ. 2006. № 2. С. 70—74.
7. Вербицкая Е.М. Современные методы и технологии прогнозирования метеорологических параметров. Хабаровск, 2018. 87 с.
8. Kristine C. Harper. Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. MIT Press, 2008. 320 p.
9. Гасников О.А., Гусева В.И., Костенич А.В., Мاستрюков С.И., Соболева М.Н., Ставров К.Г. К вопросу о создании системы статических баз показателей фоновых условий природной среды для информационной поддержки морских радиоэлектронных средств // Навигация и гидрография. 2018. № 51. С. 63—70.
10. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. М.: МО СССР, 1989.
11. Грызунов В.В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28—35.
12. Грызунов В.В. Метод динамического формирования пулов в информационно-вычислительных системах военного назначения // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 13—20. doi:10.15217

References

1. Cyber-Physical Systems — Are Computing Foundations Adequate? Edward A. Lee Department of EECS, UC Berkeley Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap October 16—17, 2006 Austin, TX https://ptolemy.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPPositionPaper/Lee_CPS_PositionPaper.pdf. [Electronic resource]. Accessed 11.12.2019.
2. Kara-Sal A., Levchenko M. Concept of digital supply chain. *Elektronnyj nauchno-prakticheskij zhurnal «Molodezhnyj nauchnyj vestnik»*. Electronic Scientific and Practical magazine «Youth scientific vestnik». 2018, June. http://www.mvnvnauka.ru/2018/06/06_2018.pdf#page=69. [Electronic resource]. Accessed 11.12.2019. [In Russian].
3. Shvab K. The fourth industrial revolution World Economic Forum® 2016. АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка». АНО ДПО «Corporate University for Sberbank Russia», 2016. [In Russian].
4. Ivanov D.A., Ivanova M.A., Sokolov B.V. Analysis of transformation trends in enterprise management principles in the era of Industry 4.0 technology. DOI 10.15622/sp.60.4. *Trudy SPIIRAN*. SPIIRAS Proceedings. 2018, 5(60). <http://proceedings.spiiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3796/2233> [In Russian]
5. Svistunova I.G., Bogoviz A.V., Popkova E.G. Innovative model of agro-industrial reproduction in the conditions of the industry 4.0: features and prospects. *APK: ekonomika, upravlenie*. APK: economy, management. 2018, 5: 4—10. [In Russian].
6. Antonovich K.M., Frolova E.K. Review of current methods of obtaining meteorological information for use in GISS technologies. *GEO-SIBIR'.* GEO-SIBERIA. 2006, 2: 70—74. [In Russian].
7. Verbitskaya E.M. *Sovremennye metody i tekhnologii prognozirovaniya meteorologicheskikh parametrov. Metodicheskoe posobie po ispol'zovaniyu produktsii chislennykh prognozov pogody*. Modern meteorological forecasting methods and technologies. Methodological manual on the use of numerical weather forecast products. Khabarovsk, 2018: 87 p. [In Russian].
8. Kristine C. Harper. Weather by the Numbers: The Genesis of Modern Meteorology. MIT Press, 2008: 320 p.
9. Gasnikov O.A., Guseva V.I., Kostenich A.V., Mastryukov S.I., Soboleva M.N., Stavrov K.G. On the issue of creating a system of static databases of background environmental conditions for information

- support of marine radio-electronic means. *Navigaciya i gidrografiya*. Navigation and hydrography. 2018, 51: 63–70. [In Russian].
10. Petuhov G.B. *Osnovy teorii effektivnosti celenapravlennyh processov*. Fundamentals of the theory of the effectiveness. M.: MO USSR, 1989. [In Russian].
 11. Gryzunov V.V. The estimation of the survivability of heterogeneous structure. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikacij i informatiki (SibGUTI)*. Vestnik SibGUTI. 2011, 1: 28–35. [In Russian].
 12. Gryzunov V.V. Dynamic Aggregation of Pools in Military Computing Systems. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy*. Management information systems. 2015, 1: 13–20. doi:10.15217 [In Russian].

Статья поступила 17.04.2019

Принята после повторной доработки к публикации 16.03.2020

Сведения об авторах

Грызунوف Виталий Владимирович, канд. техн. наук, кафедра информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета, e-mail: viv@a-tree.ru

Нестерова Ангелина Олеговна, студент, кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета, e-mail: lina01nesterova@mail.ru

Information about authors

Gryzunov Vitaliy Vladimirovich, PhD (Eng. Sci.), associate professor, Department of Information Technology and Security Systems, Russian State Hydrometeorological University

Nesterova Angelina Olegovna, Student, Department of Meteorology, Climatology and Atmosphere Protection, Russian State Hydrometeorological University

О роли данных в цифровой экономике

М.О. Колбанёв¹, И.И. Палкин², Т.М. Татарникова²

¹ Санкт-Петербургский экономический университет, Санкт-Петербург

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, tm-tatarn@yandex.ru

Обсуждается проблема толкования вновь возникающих терминов цифровой экономики, которые по-разному понимаются экономистами и специалистами в области информационных технологий. Предлагается подойти к раскрытию сути понятия цифровой экономики с точки зрения функционального и структурного описания. На функциональном описании выделены ключевые атрибуты, раскрывающие сущность цифровой экономики: цифровые данные, цифровая инфраструктура, модели деятельности людей. На структурном описании предложена архитектурная модель цифровой экономики.

Ключевые слова: цифровая экономика, терминология, цифровые данные, киберпространство, цифровая инфраструктура, цифровая технология, трансформация деятельности, архитектура цифровой экономики.

Date

M.O. Kolbanev¹, I.I. Palkin², T.M. Tatarnikova²

¹ Saint-Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia

² Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

The problem of interpreting the emerging terms of the digital economy is discussed. Examples demonstrating different understanding of the term “digital economy” by economists and information technology experts are given. We consider the basis of the digital economy - the cyberspace, as an environment of people’s activity in which any interactions are carried out due to digital data. The complexity of organizing cyberspace requires approaching the definition of the concept of the digital economy in terms of functional and structural descriptions. The functional approach has made it possible to identify three key attributes that reveal the essence of the digital economy: digital data, digital infrastructure, models of people’s activities. The activity is carried out through human interaction with natural objects through the “intermediary” - digital data. Changes in activities caused by the work with digital data, have come to be called transformation, its modern examples being medicine and transport. The examples show that the models of the digital economy involve a partial or complete rejection of human labor. The official government documents of the Russian Federation follow the functional approach to describing the concept of the digital economy: the program “Digital Economy of the Russian Federation”, decree of the President of the Russian Federation “On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017-2030”. The structural description has made it possible to single out three echelons of managing the digital economy: the technological environment, the social environment, markets and industries. Each echelon has the right to make decisions within its competencies. The purpose of the technological echelon is the technical support of the digital economy, including information systems and information technology. At the level of the social environment of the digital economy, the following ones are formed: the legal regime for the development and use of digital technologies, the education and training system of the digital economy, the infrastructure of the digital economy, information security technologies for digital processes, and many others. At the level of markets and industries, spheres of activity of the digital economy are implemented. The structural approach has allowed us to propose an architectural model of the digital economy. The model is a stratified description, characterized by vertical decomposition, the sequence of digital data processing

operations on each stratum, and the interconnection of performance indicators of all strata for a comprehensive assessment of the activity process as a whole.

Keywords: digital economy, terminology, digital data, cyberspace, digital infrastructure, digital technology, business transformation, digital economy architecture.

For citation: *M.O. Kolbanev, I.I. Palkin, T.M. Tatarnikova. Date. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 124—136. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-124-136*

Введение

Среди множества проблем, возникающих при переходе к цифровой экономике, в стороне остается проблема толкования вновь возникающих терминов, которые призваны отразить специфику новой методологии деятельности [1]. Во второй половине XX века в рамках кибернетики аналогичная проблема была решена приписыванием новых смыслов «старым» словам. Так появились теперь всеми понимаемые одинаково термины: информация, связь, сообщение, программирование, управление и многие другие [2]. Успешная реализация такого подхода при становлении кибернетики была обусловлена еще и тем, что потребителем новых понятий являлся сравнительно узкий круг специалистов, способных быстро найти общий язык.

По схожему пути пошла и современная наука. Цифровая экономика, цифровое бытие, цифровая трансформация, цифровая платформа, экосистема, цифровой двойник, интернет вещей, облачные вычисления, искусственный интеллект, сквозные технологии, хранилище данных и т. п. — все это метафоры давно сложившихся понятий, это «старые» слова, в комбинацию которых стали вкладывать совершенно иные смыслы. При этом самым заметным отличием нашего времени от кибернетической эпохи является вовлеченность в процессы цифровизации огромного количества людей. Это ведет к тому, что не только миллиарды рядовых пользователей компьютера, но и специалисты компьютерной индустрии зачастую по-разному понимают приведенные выше наименования новоявленных объектов цифрового бытия.

Так, например, для экономистов и специалистов в области информационных технологий термин «цифровая экономика» обозначает во многом разные объекты. Судя по библиографии EconLit [3], в 80 % публикаций экономистов цифровая экономика — это способ хозяйствования, который отличается от давно сложившихся увеличением числа коммерческих площадок и кастоминизированностью, уменьшением размера компаний, числа посредников и издержек, другими преимуществами, но не ведет к кардинальному изменению общественных отношений хозяйственной деятельности [4]. Сами цифровые технологии при этом не оцениваются количественно и рассматриваются как виртуальная среда, которая позволяет повысить эффективность экономической деятельности самим фактом своего существования. Показательна в этом отношении подборка часто цитируемых определений цифровой экономики, собранная в работе [5]. В технической литературе цифровая экономика — это глобальный технологический проект, использующий

революционные достижения в инженерных областях знания, таких как электроника, фотоника, радиотехника и в перспективе квантовые вычисления, для создания цифровой инфраструктуры и сквозных технологий [6]. Все эти технологические новации образуют основу для трансформации моделей деятельности во всех предметных областях, а не только в экономике [7].

Аналогичные процессы можно наблюдать и в геоинформатике. С одной стороны, специалисты видят в цифровых технологиях более эффективные способы сбора, доставки и обработки пространственных данных. При этом по умолчанию предполагается, что переход от аналоговых технологий на цифровые информационные существенным образом не влияет на саму методологию решения профессиональных задач [8]. С другой стороны, разработчики технологий цифровой экономики исходят из того, что повышение эффективности деятельности связано с конвергенцией физических, биологических и информационных технологий. Так, например, измерение и анализ характеристик физического состояния атмосферы, как и регистрацию атмосферных явлений, наряду со многими тысячами гидрометеорологических станций, как сегодня, могут осуществлять гаджеты десятков и сотен миллионов пользователей, случайным образом распределенных по поверхности Земли.

Еще одним примером служит термин «искусственный интеллект», под которым понимают, как алгоритмические методы решения задач, которые ранее могли быть решены только человеком, так и создание машин, обладающих чуть ли не человеческим сознанием [9].

Несогласованности существуют даже среди терминов, которые вводятся стандартами различных международных организаций. Масла в огонь терминологических противоречий добавляют и неудачные переводы профессиональных терминов с одного языка на другой. В целом неоднозначное толкование новых понятий усложняет профессиональную коммуникацию специалистов, мешает формированию междисциплинарных групп для проведения исследований на стыке разных наук и в конечном итоге выходу исследователей на новый уровень познания.

Центральное место среди понятий, требующих однозначной интерпретации пользователями и специалистами во многих областях знаний, занимает понятие «данные». Можно сказать, что семасиология слова «данные» является ключом к формированию значений всего комплекса терминов цифровой экономики. Упомянутые выше «цифровые» термины так или иначе содержат в своем определении «данные». При этом вновь появившиеся термины зачастую даже не указывают на то, что по сути речь идет о «цифровых данных».

Как бы то ни было, цифровые данные стали ключевым понятием цифровой экономики. Их роль настолько велика, что появляются маркетинговые понятия типа «наука о данных», «большие данные», «решения, основанные на данных» и т. п.

Цель статьи заключается в выявлении сущности данных как элемента цифровой экономики. Объектом исследования выступают цифровые данные, а предметом — модели цифровых данных в инженерных и прикладных исследованиях.

Киберпространство как основа цифровой экономики

В XXI веке в результате создания и массового внедрения цифровых информационных и коммуникационных технологий наряду с сушей, морем, воздухом и космосом образовалось еще одна пятая среда деятельности людей — киберпространство. Главная его особенность в том, что любые взаимодействия осуществляются благодаря цифровым данным. Такой способ взаимодействия оказался настолько эффективным, что принес человечеству новые возможности, связанные с гиперсвязуемостью в реальном масштабе времени организаций, людей, технических устройств и других объектов, распределенных в пространстве всего земного шара. Это же породило и новые угрозы от глобальных агрессивных процессов конкуренции, противоборства и проведения специальных «цифровых» операций, нацеленных на достижение политических и социально-экономических преимуществ [10].

Отметим, что киберпространство представляет собой глобальную рукотворную среду, которая кардинально отличается по своим свойствам от природных сред и функционирует в соответствии с целями, предусмотренными его разработчиками, а не по естественным законам природы.

Становится все более очевидно, что использование свойств киберпространства позволяет значительно изменить содержание человеческой деятельности и в естественных, и в социальных областях. Примером могут служить такие недавно возникшие дисциплины, как геоинформатика и геополитика. Основываясь на охвате киберпространством географических объектов, они получают принципиально новые результаты при исследовании природных явлений и межгосударственных отношений соответственно.

Использование возможностей киберпространства в тех или иных областях ведет к необходимости изучения и прогнозирования влияния этих возможностей на изменение общественных отношений. Изменения могут быть настолько существенными, что целый ряд исследователей ставят под сомнение саму целесообразность этого инструмента познания, подобно тому, как ряд физиков пытались уберечь человечество от разрушительной силы ядерного оружия.

В то же время попытки осмыслить потенциал и узкие места цифровой экономики невозможно без детального изучения этого сложного объекта исследования, где в едином киберпространстве взаимодействуют пользователи, устройства, предприятия, реализуются производства, услуги и еще много всего.

Функциональный подход к определению понятия «цифровая экономика»

Следуя принципам системного подхода, к определению понятия «цифровая экономика» следует подойти сначала с функциональной, а затем со структурной точки зрения. При функциональном подходе надо определить общие свойства цифровой экономики в контексте ее взаимодействия с внешней средой. Будем считать, что внешнюю среду образуют все области деятельности людей, включая культуру, науку, экономику, образование, безопасность, государственное управление и все, что угодно. Самый главный признак внешней среды цифровой экономики — это непрерывность реализуемых там процессов.

В подавляющем числе публикаций цифровая экономика рассматривается на функциональном уровне своих общих свойств. Обобщая имеющиеся мнения, можно выделить три ключевых атрибута, раскрывающих сущность цифровой экономики.

Первый — это цифровые данные, которые фиксируют сведения о состоянии физических процессов в дискретные моменты времени в определенных точках пространства. Технологический процесс получения цифровых данных называется аналого-цифровым преобразованием (АЦП).

Второй — это цифровая инфраструктура, которая является средой существования цифровых данных — центры обработки, сети связи, хранилища [11]. Содержательный смысл цифровых данных становится доступным человеку только после цифро-аналоговых преобразований (ЦАП).

Цифровые данные и цифровая инфраструктура не способны существовать друг без друга. Это две стороны одной медали — неотъемлемые стороны не только цифровой экономики, но и киберпространства в целом [12]. Когда мы говорим: «Цифровая инфраструктура», то имеем в виду данные, для которых она создана, и когда говорим: «Цифровые данные», то имеем в виду инфраструктуру как среду их существования.

Третий — это модели деятельности людей, основанные на работе с данными. В цифровой экономике деятельность осуществляется не путем прямого взаимодействия человека с природными объектами, а путем взаимодействия с этими объектами через «посредника» — цифровые данные (рис. 1). Можно сказать, что модели деятельности на базе цифровых данных задают функцию цифровой экономики.

Глубина изменений, вызванных работой с цифровыми данными, настолько велика, что применительно к процессам деятельности используют термин «трансформация». Примерами такой трансформации могут служить медицина и транспорт.

В медицине непрерывный мониторинг состояния здоровья при помощи разнообразных датчиков, расположенных на теле человека, ведет к формированию огромного массива цифровых данных, комплексный анализ которых позволяет не только выявить болезни в настоящем, но и предсказать их возникновение в будущем [13]. Появляется потенциал для радикального изменения всей модели деятельности медицинских служб, включая роли не только лечебных учреждений, но и медицинских работников, пока что являющихся главными субъектами процесса постановки диагноза, выбора и реализации способа лечения.

Беспилотные транспортные средства используются в автомобильном, железнодорожном, воздушном, морском и любых других видах транспорта. В основе

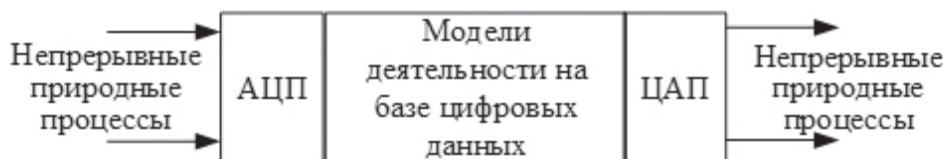


Рис. 1. Функциональная модель цифровой экономики.

этих новаций лежит способность технологий в режиме онлайн формировать и анализировать большой объем цифровых данных, необходимых для планирования процесса движения.

Например, алгоритм, который заменяет человека-водителя в автомобиле, должен получать сведения из массива динамически изменяющихся цифровых данных, в том числе многочисленных датчиков, видеокамер, радаров, ультразвуковых локаторов, спутниковых систем, лидаров и других аналого-цифровых преобразователей, характеризующих «ближний круг» автомобиля; цифровых карт, позволяющих построить и скорректировать полный маршрут от точки старта к точке назначения и характеризующих дорожную обстановку в комплексе; других транспортных средств, находящихся на дорогах и делящихся своим «опытом» движения по общей дорожной инфраструктуре, что позволяет объединить вычислительный потенциал многих беспилотных гаджетов.

Располагая возможностями беспилотного транспортного средства, бессмысленно строить работу транспорта по лекалам, сложившимся в прошлом веке. В частности, трансформация деятельности городского автомобильного транспорта предполагает такие изменения, как отказ от услуг миллионов водителей, каршеринг, кардинальную перестройку дорожной инфраструктуры, создание альтернативных сетей парковок, заправок, автомоек, станций технического обслуживания и многое другое.

Уже этих примеров достаточно для того, чтобы выделить некоторые общие отличия моделей деятельности цифровой экономики во многих предметных областях. Самым главным из них представляется отказ частично или полностью от человеческого труда. К такому отказу ведет сама суть цифровой деятельности, которая недоступна человеку из-за его аналоговой природы. Каждый раз, когда человек привлекается к работе с цифровыми данными, возникает необходимость ЦАП, поскольку принципиально не существует другой возможности для восприятия цифровых данных, характеризующих достигнутые результаты деятельности, при помощи органов чувств людей. Многократный переход от цифрового к аналоговому представлению информации и обратно требует дополнительных временных и энергетических ресурсов и должен использоваться только в тех случаях, когда достижение целей деятельности невозможно без привлечения человеческих знаний, интеллекта, сознания, только там, где цифровая технология не может заменить человека. Таких областей деятельности становится все меньше.

Функциональному подходу к описанию понятия «цифровая экономика», обозначенному на рис. 1, следуют и официальные государственные документы Российской Федерации.

В программе «Цифровая экономика РФ» [14] мы находим следующую формулировку: «Цифровая экономика — экономический уклад, характеризующийся переходом на качественно новый уровень использования информационно-телекоммуникационных технологий во всех сферах социально-экономической деятельности». Здесь понятие «цифровая экономика» трактуется расширенно, включает и медицину, и образование, и безопасность, и другие общественные институты.

В государственной программе также подчеркивается значение цифровых данных как одного из факторов производства. Именно поэтому одна из целей программы имеет такую формулировку: «... создать экосистему цифровой экономики Российской Федерации, в которой данные в цифровом виде будут являться ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности».

В Указе Президента РФ «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017—2030 годы» [15] дается такая формулировка: «цифровая экономика — хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг».

Основными понятиями, объясняющим смысл цифровой экономики, в этом определении являются: цифровые данные, большие объемы цифровых данных, методы анализа больших объемов цифровых данных в реальном времени и, наконец, повышение эффективности деятельности, основанной на больших объемах данных. В Указе, в частности, подчеркивается, что «... увеличение объема данных ... от промышленных и социальных объектов, различных электронных устройств приводит к формированию новых технологий ...» и что «Конкурентным преимуществом обладают государства, отрасли экономики которых основываются на технологиях анализа больших объемов данных».

В целом, цифровая экономика по своей сути предполагает работу с данными, это «... основа, которая позволяет создавать качественно новые модели бизнеса, торговли, логистики, производства, изменяет формат образования, здравоохранения, госуправления, коммуникаций между людьми, а следовательно, задает новую парадигму развития государства, экономики и всего общества» [14].

Проведенный анализ однозначно показывает, что имеющийся широкий спектр взглядов на функциональные особенности цифровой экономики ученых, бизнесменов и политиков так или иначе содержит обозначенные выше признаки: цифровые данные, цифровая инфраструктура, новые модели деятельности.

Компьютеры и инфокоммуникационные сети, образующие цифровую инфраструктуру, способную работать с большими объемами цифровых данных, с одной стороны, и трансформированные модели деятельности, с другой, — вот основа тех идей, которые меняют взаимодействия в процессе хозяйственной деятельности и делают экономику цифровой.

Структурный подход к определению понятия «цифровая экономика»

Более полное представление о цифровой экономике можно получить, используя не функциональный, а структурный подход к описанию ее свойств. С этих позиций необходимо разделить цифровую экономику как целостный объект на отдельные составляющие и установить связи между этими частями.

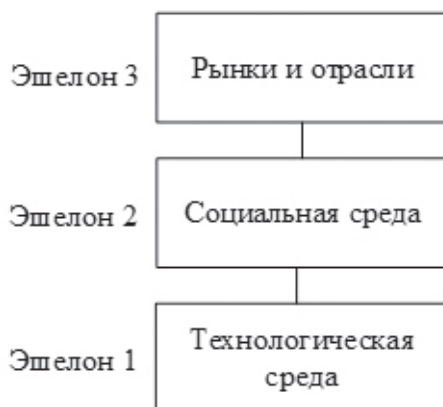


Рис. 2. Эшелоны управления цифровой экономикой.

В зависимости от целей, которые преследуются при построении структуры цифровой экономики, можно выделить управленческий, кибернетический и архитектурный подходы.

В государственной программе «Цифровая экономика Российской Федерации», которая является инструментом политического управления социально-экономическими процессами в стране, выделяются три независимые подсистемы, соответствующие трем эшелонам управления. Каждый эшелон (рис. 2) имеет право принятия решений в рамках своих компетенций. Иерархические связи эшелонов друг с другом указывают на влияние вышестоящих на нижестоящие, притом что на каждом уровне имеется значительная самостоятельность в выборе целей и способов их достижения.

Главная цель технологического (нижнего) эшелона заключается в техническом обеспечении цифровой экономики — это информационные системы и информационные технологии. В первую очередь к их числу следует отнести сети 5G и 6G, облачные системы, интернет вещей, системы хранения данных, социальные сети, робототехнику, системы безопасности, цифровые платформы, геоинформационные системы и др. Информационные технологии цифровой экономики получили название «сквозные технологии» [16, 17], поскольку они применяются при построении всех или значительной части систем цифровой экономики.

Объектом управления на втором уровне является среда цифровой экономики. На этом уровне государство должно ответить на те вызовы, которые технологические изменения оказывают на общественные отношения, в том числе:

- создать правовой режим для возникновения, развития и использования цифровых технологий;
- модернизировать систему образования и обеспечить подготовку кадров и функционирование рынка труда;
- построить инфраструктуру, объединяющую все доступные технологии и системы;
- обеспечить информационную безопасность цифровых процессов и др.

В настоящее время уже приняты и реализуются федеральные проекты с общим объемом финансирования более 1,5 трлн рублей, нацеленные на разработку конкретных решений в части нормативного регулирования цифровой среды, подготовки кадров для цифровой экономики, информационной безопасности, цифрового государственного управления и др.

На третьем уровне находятся сферы деятельности цифровой экономики, включая рынки и отрасли экономики. Предполагается, что на этом уровне влияние государства должно быть минимальным. Взаимодействия конкретных субъектов деятельности должны появиться в инициативном порядке благодаря опоре на создаваемую государством новую цифровую среду [18].

Как показывает накопленный опыт, архитектурный подход при разработке сложных систем дает очевидный положительный эффект: снижает стоимость разработки, сокращает время, необходимое для внедрения систем и выхода на рынок, уменьшает стоимость модернизации, эволюции и эксплуатации, повышает качество работы и др.

Этого эффекта удается достигнуть за счет:

- использования универсального языка взаимодействия разработчиков;
- оценки альтернативных технических решений и связанных с ними рисков на ранних стадиях разработки;
- упрощения повторного использования уже апробированных решений;
- использования механизмов управления эволюцией технологий;
- классификации изменений, поддающихся предвидению, и др.

Архитектурная модель цифровой экономики должна представлять собой стратифицированное описание, которое характеризуется вертикальной декомпозицией, последовательностью реализации операций обработки цифровых данных на каждой страте и взаимосвязью показателей функционирования всех страт для комплексной оценки процесса деятельности в целом.

Разработанная архитектурная модель цифровой экономики представлена на рис. 3. На страте 1 расположены технологии, обеспечивающие аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования. Главные технические устройства здесь — это сенсоры и актуаторы, реализующие связь цифровой экономики с аналоговым окружением.

Страта 2 соответствует этапу доступа цифровых данных к глобальным ресурсам киберпространства. Как правило, здесь используются системы интернета вещей и сквозные технологии беспроводной связи.

Страта 3 объединяет технологии распространения цифровых данных между централизованными ресурсами хранения и обработки и местами их возникновения и использования. Здесь создается иерархия данных и вычислительных процессов, включающая уровни облака, тумана и росы.

Совместно технологии трех нижних страт образуют инфраструктурную основу цифровой экономики, мало зависящую от конкретных особенностей предметной области.

На страте 4 располагаются технологии формирования таких структур цифровых данных, которые повышают степень их организации и позволяют строить эффективные алгоритмы выявления контента.



Рис. 3. Архитектура цифровой экономики.

Страта 5 объединяет технологии создания цифровых платформ, которые являются основными строительными блоками для цифровой экономики. Они объединяют технологические возможности инфокоммуникаций с моделями деятельности, использующими эти возможности. Главное для платформенных технологий — это организация связей с внешним окружением, а не внутреннее устройство. Цифровые платформы являются распределенными информационными системами, управление которыми может быть централизованным или децентрализованным.

Технологии страты 6 призваны создать экосистему (партнерство), обеспечивающее взаимодействие цифровых платформ на базе цифрового кодекса, научно-технологических стандартов и гарантий безопасности.

На страте 7 располагаются технологии построения моделей деятельности, основанных на цифровых данных.

Как и в архитектурных моделях других цифровых систем, отношения соседних страт цифровой экономики характеризуются иерархической подчиненностью.

Выводы

Цифровая среда кардинальным образом меняет тип общественных отношений, методологию деятельности во всех предметных областях, трансформирует вековые традиции, позволяет людям заниматься исключительно смысловой творческой деятельностью.

Цифровая среда в своей основе является сложной системой, раскрыть суть которой помогают функциональный и структурный подходы. Функциональный подход позволяет выявить ключевые объекты цифровой экономики, модели взаимодействия между которыми приводят к трансформации деятельности людей в эпоху цифровой экономики. Структурный подход позволяет выделить этапы управления цифровой экономикой, такие как технологическая среда, социальная среда, рынки и отрасли. Технологическая среда образует техническую поддержку цифровой экономики, социальная среда способствует формированию правового режима, системы образования, инфраструктуры, информационной безопасности цифровой экономики и др. Рынки и отрасли реализуют сферы деятельности цифровой экономики.

Список литературы

1. Чернякова Н.С. Значение научных терминов как предмет методологической рефлексии // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. 2017. № 6, ч. 1. С. 193—196.
2. Кун Т. Структура научных революций / Пер. с англ. под ред. С. Р. Микилинского и Л. А. Марковой. М.: Прогресс, 1975. 288 с.
3. Лычагин М.В., Лычагин А.М., Таратута В.П. Цифровой аспект в мировой экономической литературе / В сб.: Инновационные кластеры в цифровой экономике: теория и практика. Труды научно-практической конференции с международным участием, 17—22 мая 2017 г. Санкт-Петербургский политехнический университет. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2017. С. 155—168.
4. Юдина Т.Н. Осмысление цифровой экономики // Теоретическая экономика. 2016. № 3. С. 12—16.
5. Абдрахманова Г.И., Вишневский К.О., Гохберг Л.М. и др. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение: докл. к XX Апрель. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. М., 9—12 апреля 2019 г. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. 82 с.
6. Соколов И.А., Шнепс-Шнеппе М.А., Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Селезнев С.П. Телекоммуникации как решающее звено цифровой экономики. Опыт России // Intern. J. Open Inform. Technol. ISSN: 2307-8162. 2017. V. 5, No. 6. С. 76—93.
7. Кефели И.Ф., Колбанёв М.О., Шамин А.А. Архитектурный подход к управлению государственной программой «Цифровая экономика России» // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. 2018. № 2 (24). С. 88—97.
8. Вязилов Е.Д. Росгидромет как цифровое предприятие // XVII Международная конференция DAMDID/RCDL'2016 «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных».
9. Kellmèreit D. The Silent Intelligence: The Internet of Things // Publisher: DND Ventures LLC, 2013. 454 p.
10. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Татарникова Т.М. Аспекты безопасности информационно-экономической деятельности / В сб.: Технологии информационно-экономической безопасности. Санкт-Петербург, 2016. С. 52—56.
11. Henfridsson O., Bygstad B. The generative mechanisms of digital infrastructure evolution // Management Information Systems Quarterly. 2013. V. 37. No. 3. P. 896—931.

12. Aferdita B.S., Mihane B.N. Information Technology and the Digital Economy // Mediterranean J. Social Sci. 2015. V. 6. No. 6. P. 78—83.
13. Татарникова Т.М. Анализ данных. СПб: ГЭУ, 2018. 82 с.
14. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р.
15. Указ Президента Российской Федерации № 203 «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017—2030 годы» от 09 мая 2017 г.
16. Колбанёв М.О., Палкин И.И., Татарникова Т.М. Вызовы цифровой экономики // Гидрометеорология и экология. Ученые записки РГГМУ. 2019. № 58. С. 156—166.
17. Бакаров А.А., Девяткин Д.А., Еришова Т.В., Тихомиров И.А., Хохлов Ю.Е. Научные заделы России по сквозным технологиям цифровой экономики // Информационное общество. 2018. № 4—5. С. 54—64.
18. Graef I. Market definition and market power in data: The case of online platforms // World Competition: Law and Economics Review. 2015. V. 38, No. 4. P. 473—506.

References

1. Chernyakova N.S. The value of scientific terms as a subject of methodological reflection. *Istoricheskiye, filosofskkiye, politicheskkiye i yuridicheskkiye nauki, kul'turologiya i iskusstvovedeniye. Voprosy teorii i praktiki*. Historical, philosophical, political and legal sciences, cultural studies and art history. Questions of theory and practice. 2017. 6:193-196. [In Russian].
2. Kun T. *Struktura nauchnykh revolyutsiy*. The structure of scientific revolutions. M.: Progress, 1975: 288 p. [In Russian].
3. Lychagin M.V., Lychagin A.M., Taratuta V.P. The digital aspect in the world economic literature. *Innovatsionnyye klasteri v tsifrovoy ekonomike: teoriya i praktika*. Innovation clusters in the digital economy: theory and practice. Proceedings of the scientific-practical conference with international participation. 2017:155-168. [In Russian].
4. Yudin T.N. Understanding the Digital Economy. *Teoreticheskaya ekonomika*. Theoretical Economics. 2016. 3:12-16. [In Russian].
5. Abdrakhmanova G.I., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M. et al. *Chto takoye tsifrovaya ekonomika? Trendy, kompetentsii, izmereniye*. What is the digital economy? Trends, competencies, measurement: dokl. to Apr 20 Int. scientific conf. on the problems of economic and social development. Moscow, April 9—12. 2019 Nat. researched University “Higher School of Economics”. M.: Publishing. House of the Higher School of Economics, 2019: 282 p. [In Russian].
6. Sokolov I.A., Shneps-Shneppe M.A., Kupriyanovsky V.P., Namiot D.E., Seleznev S.P. Telecommunications as a crucial link in the digital economy. Russian Experience. International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162. 2017. 5(6): 76-93. [In Russian].
7. Kefeli I.F., Kolbanev M.O., Shamin A.A. The architectural approach to managing the state program “Digital Economy of Russia”. *Yevraziyskaya integratsiya: ekonomika, pravo, politika*. Eurasian integration: economics, law, politics. 2018. 2(24): 88-97. [In Russian].
8. Yyazilov E.D. Roshydromet as a digital enterprise. *XVII Mezhdunarodnaya konferentsiya DAMDID/RCDL'2016 «Analitika i upravleniye dannymi v oblastyakh s intensivnym ispol'zovaniyem dannykh»*. XVII International Conference DAMDID / RCDL'2016 “Analytics and data management in areas with heavy data usage”. [In Russian].
9. Kellmerit D. The Silent Intelligence: The Internet of Things. Publisher: DND Ventures LLC, 2013. 454 p.
10. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. Security aspects of information and economic activity. *V sbornike: Tekhnologii informatsionno-ekonomicheskoy bezopasnosti*. In the collection: Information and Economic Security Technologies St. Petersburg, 2016: 52-56. [In Russian].
11. Henfridsson O., Bygstad B. The generative mechanisms of digital infrastructure evolution. *Management Information Systems Quarterly*. 2013, 37 (3): 896-931.
12. Aferdita B.S., Mihane B.N. Information Technology and the Digital Economy. *Mediterranean Journal of Social Sciences*. 2015 (6): 78-83.

13. *Tatarnikova T.M. Analiz dannykh*. Data analysis. St. Petersburg: State University, 2018: 82 p. [In Russian].
14. The program “Digital Economy of the Russian Federation”. Order of the Government of the Russian Federation of July 28, 2017. No. 1632-r. [In Russian].
15. Decree of the President of the Russian Federation No. 203 “On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017—2030” of September 5, 2017. [In Russian].
16. *Kolbanev M.O., Palkin I.I., Tatarnikova T.M.* Challenges of the digital economy. *Gidrometeorologiya i ekologiya. Uchenyye zapiski RGGMU*. Hydrometeorology and ecology. Scientific notes of the RSMU. 2019, 58: 156-166. [In Russian].
17. *Bakarov A.A., Devyatkin D.A., Ershova T.V., Tikhomirov I.A., Khokhlov Yu.E.* Scientific groundwork of Russia on end-to-end technologies of the digital economy. *Informatsionnoye obshchestvo*. Information Society. 2018, (4-5): 54-64.
18. *Graef I.* Market definition and market power in data: The case of online platforms. *World Competition: Law and Economics Review*. 2015, 38 (4): 473-506.

Статья поступила 05.05.2020

Принята к публикации 15.06.2020

Сведения об авторах

Колбанёв Михаил Олегович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного экономического университета, mokolbanev@mail.ru

Палкин Иван Иванович, канд. воен. наук, доцент, первый проректор Российского государственного гидрометеорологического университета, ivanpalkin@mail.ru

Татарникова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, доцент, директор Института информационных систем и геотехнологий Российского государственного гидрометеорологического университета, tm-tatarn@yandex.ru

Information about authors

Kolbanev Mikhail Olegovich, Grand PhD (Tech. Sci.), Professor, Professor of Department of Information Systems and Technologies, Saint-Petersburg State University of Economics

Palkin Ivan Ivanovich, PhD (Military Sci.), docent, First Vice-Rector, Associate Professor, Russian State Hydrometeorological University

Tatarnikova Tatiana Mikhailovna, Grand PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Director of the Institute of Information Systems and Geotechnologies, Russian State Hydrometeorological University

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК [551.5:528.8](092)

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-137-149

Вклад академика К.Я. Кондратьева в развитие метеорологии и экологии (к 100-летию со дня рождения)

В.И. Биненко

ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, vibinenko@mail.ru

В связи со столетним юбилеем академика СССР и РАН К.Я. Кондратьева в статье рассмотрен научный путь выдающегося геофизика, человека, который будучи студентом физфака ЛГУ стал рядовым участником Великой отечественной войны и после тяжелых ранений, закончил учёбу и прошёл путь от ассистента до ректора университета, став учёным, труды которого были высоко оценены в мировом научном сообществе и востребованы в настоящее время. К.Я. Кондратьев был одним из первых, кто использовал дистанционные методы зондирования Земли и атмосферы с пилотируемых космических кораблей, велик его вклад в реализацию как национальных, так и международных научно-исследовательских комплексных экспериментов; в рассмотрении проблем современного изменения климата, глобальной экологии и развитии стратегии глобальной экодинамики. К.Я. Кондратьев был из поколения победителей в самом широком смысле и может служить ярким примером для современной молодежи, работающих в науке.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиация, климат, аэрозоль, парниковые газы, экология

Contribution of Academician K.Ya. Kondratyev in the development of meteorology and ecology (to the 100th anniversary)

V.I. Binenko

Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, St. Petersburg, Russia

In connection with the centenary of K.Ya. Kondratyev, the academician of the USSR and RAS, the article examines the scientific path of the outstanding geophysicist, the man who, being a student of the Physics Department of LSU, became an ordinary participant in the second world war and after severe injuries, finished his studies, worked his way from the assistant to the University rector, becoming a scientist whose works were highly appreciated in the world scientific community and are still in demand today. K.Ya. Kondratyev was one of the first to use remote sensing methods of the Earth and atmosphere from manned spaceships, his contribution to the implementation of both national and international research complex experiments, to the consideration of the problems of modern climate change, global ecology and the development of the strategy of global EcoDynamics being great. K.Ya Kondratyev was awarded the State prize of the USSR, was a co-author of scientific discovery "the Phenomenon of vertically-ray structures of day radiation of the upper atmosphere of the Earth", listed in the State register of discoveries of the USSR under No. 106 with priority from May 19, 1971, was a winner of the Honorary award and was awarded the Grand gold medal of the World Meteorological Organization. He was awarded the Simons Gold medal of the Royal meteorological society of Great Britain. K.Ya Kondratyev was elected an Honorary member

of the American Meteorological Society (USA), Royal Meteorological Society (UK), Academy of Natural Sciences "Leopoldina" (Germany), foreign member of the American Academy of Arts and Sciences (USA), member of the International Academy of Astronautics, an honorary doctor of the universities of Lille (France), Budapest (Hungary), Athens (Greece). For many years he was an editor of the "Earth Research from Space" journal, a member of the editorial boards of "Optics of atmosphere and ocean" and "Izvestiya of the Russian geographical society" journals, a member of the editorial boards of foreign journals of "Meteorology and Atmospheric Physics" (Austria), "Idojaras" (Hungary), "Il Nuovo Cimento C", "Italy", "Atmosfera" (Mexico), "Energy and Environment" (UK). His scientific and literary heritage consists of 120 monographs and more than 1,500 scientific articles published in the leading scientific journals in Russia and abroad.

Keywords: remote sensing, radiation, climate, aerosol, greenhouse gases, ecology.

For citation: *V.I. Binenko. Contribution of Academician K.Ya. Kondratiev in the development of meteorology and ecology (to the 100th anniversary). Gidrometeorologiya i Ekologiya. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 137—149. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-137-149*

Введение

К.Я. Кондратьев родился в г. Рыбинске. Начальное и среднее образование он получил в Ленинграде. Школьный учитель физики Ф.С. Емельянов привил Кириллу любовь к естествознанию, и в 1938 г. он поступил на физический факультет Ленинградского государственного университета.

В 1941 г. К.Я. Кондратьев с четвертого курса ЛГУ ушел на фронт, где воевал солдатом в рядах 1-й гвардейской воздушно-десантной дивизии. После третьего тяжелого ранения он был демобилизован и в 1944 г., вернувшись в Ленинград, продолжил учебу в университете. В 1946 г. он окончил с отличием ЛГУ по специальности «геофизика» и был оставлен в качестве



Кирилл Яковлевич Кондратьев
(1920 — 2006)

на кафедре физики атмосферы, на которой сформировался как ученый и преподаватель, пройдя путь от ассистента до профессора и заведующего кафедрой. Будучи прекрасным организатором как в науке, так и в общественной работе, с 1964 по 1970 г., являясь последовательно секретарем комсомольской и партийной организации, членом ленинградского обкома КПСС, совмещал с общественной работой работу в должности заместителя декана физического факультета, проректора по научной работе и ректора университета.

Дипломную работу К.Я. Кондратьев выполнил под руководством известного ученого в области динамической метеорологии профессора М.И. Юдина. Однако его в первую очередь интересовала проблематика в области переноса коротковолновой и длинноволновой радиации в системе Солнце — атмосфера — Земля, роль

парникового эффекта в атмосфере. Первая научная публикация К.Я. Кондратьева «О поглощении и длинноволновой радиации» была опубликована в 1947 г. в журнале «Метеорология и гидрология». В 1950 г. была издана его первая монография «Перенос длинноволнового излучения в атмосфере» [1], а в 1956 г. — монография «Лучистый теплообмен в атмосфере». В 1950 г. К.Я. Кондратьев защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а в 1957 г. стал доктором физико-математических наук.

Для Кирилла Яковлевича в течение всей его жизни было характерно запредельное трудолюбие, четкость, собранность и организованность во всем: в науке, в научно-организационной и общественной работе. Великая Отечественная война, память о погибших сверстниках наложили свой отпечаток на научно-преподавательскую деятельность К.Я. Кондратьева — отсюда его особая ответственность, способность работать и за себя, и за тех сверстников и сокурсников, кто не вернулся с фронта.

Запуск первого искусственного спутника Земли в 1957 г. подвиг К.Я. Кондратьева и коллектив сотрудников кафедры заняться не только наземными исследованиями рассеянной и суммарной радиации, спектрального альбедо земных покровов и теорией теплового режима верхних слоев атмосферы [2—4], тепловым излучением в полосах поглощения водяного пара, углекислого газа и озона в атмосфере [5, 6], но и аэростатными, а также дистанционными исследованиями с использованием первых метеорологических спутников «Тайрос-1», «Метео-144», «Космос-156» [7, 8]. Аэростатные измерения, выполненные в начале 1960-х годов с помощью солнечных спектрометров и пиранометров до высоты 30—33 км, при одновременном измерении концентрации аэрозолей позволили получить данные о вертикальных профилях спектральной прозрачности, потоках нисходящей и восходящей радиации, сделать оценки внеатмосферной солнечной постоянной [6—8]. В 1966 г. К.Я. Кондратьев высказал идею о необходимости построить обсерваторию на Луне, обеспечив тем самым возможность мониторинга спектра Солнца при отсутствии помех, создаваемых земной атмосферой [9].

Практическое применение данных метеоспутников, монографии и другие публикации К.Я. Кондратьева [10—14], в том числе о метеорологических спутниках, переведенные на английский язык, способствовали укреплению авторитета страны. В рамках резолюции ВМО 1721(XVI) и соответствующих резолюций Ассамблеи ООН К. Я. Кондратьев был включен в группу 12 видных ученых, которые обеспечивали консультирование и кооперацию в области международного сотрудничества в целях мирного использования космического пространства, в исследовании атмосферы. За плодотворную работу в рамках Консультативного комитета К.Я. Кондратьев в 1968 г. был награжден золотой медалью ВМО.

Личные контакты К.Я. Кондратьева с ведущими учеными в области геофизики как в СССР, так и во всем мире, обмен публикациями, планами проектов, реализуемых в США и других странах, позволили ему получить глубокие знания в перспективных областях исследований Земли и других планет. Диапазон его научных интересов был удивительно широк и разнообразен. Для их реализации он

активно привлекал молодых сотрудников кафедры физики атмосферы ЛГУ, а также отдела радиационных исследований (ОРИ) Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО), где он работал сначала по совместительству, а с 1970 по 1982 г. в качестве заведующего ОРИ.

Огромное значение для развития дистанционных методов имела передача Гидрометеослужбой в ГГО самолета Ил-18, который был оборудован разнообразным оборудованием для подспутниковых и комплексных исследований в системе Земля — атмосфера. С 1970 г. самолет-лаборатория Ил-18 ГГО принимал участие в реализации многих натурных экспериментов под руководством К.Я. Кондратьева, в числе которых:

- Комплексный энергетический эксперимент КЭНЭКС в 1971 г. [21];
- Советско-американский микроволновый эксперимент «Беринг» в 1973 г. [22];
- Атлантический тропический эксперимент (АТЭП) в 1974 г., в котором участвовали 72 государства, 40 судов, 13 самолетов лабораторий, три спутника;
- Полярный эксперимент ПОЛЭКС-76 в 1976 г.;
- Глобальный аэрозольно-радиационный эксперимент ГАРЭКС;
- Первый глобальный эксперимент (1978—1979 гг.), а также другие национальные и международные программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) [23—36].

Дополнительно с помощью этого самолета были выполнены комплексные эксперименты по изучению облаков над морем, сушей и городом, в Арктике над СП-22, а также эксперименты над городами Запорожье, Рустави, Алма-Ата и мониторинг иссушения Аральского моря.

Выполненные под руководством К.Я. Кондратьева комплексные наземные и аэростатные измерения в рамках советско-американского проекта в 1975/76 г. вблизи г. Рыльска (Россия) и г. Ларами (США) с целью изучения стратосферы с помощью фотоэлектрических счетчиков от 0,4 мкм, импакторов, фильтровых ловушек аэрозолей, определения аэрологических параметров, нисходящих и восходящих потоков длинноволновой радиации, заборы проб озона и других газов позволили изучить особенности слоя Юнге, определить изменчивость не только концентрации стратосферного аэрозоля, его микроструктуры и фазового состояния, но и содержания озона, а также установить корреляционные связи между концентрацией стратосферного аэрозоля и скоростью изменения радиационной температуры в атмосфере [24—38].

Умение выделить приоритетные, наиболее значимые цели научных исследований, организовать сотрудников, коллег по работе, аспирантов, а также заинтересовать в кооперации другие научные организации не только в нашей стране, но и за рубежом позволили К.Я. Кондратьеву осуществлять как обширные экспериментальные исследования в свободной атмосфере, так и теоретические работы в рамках аналитических и численных методов моделирования, связанного в первую очередь с переносом коротковолновой и длинноволновой радиации в системе Солнце — атмосфера — Земля [15—20].

Комплексные дистанционные исследования Земли

Комплексность исследований в свободной атмосфере в зависимости от целей проводимых экспериментов предполагает, как правило, одновременные подспутниковые, наземные, самолетные, ракетные, аэростатные и аэрологические измерения спектральной и интегральной радиации, а также аэрозольные, микроструктурные и микрофизические измерения в облаках, измерение аэрозольной оптической толщины атмосферы, оптической плотности облаков. На основе физического многоуровневого эксперимента в свободной атмосфере с использованием широкого спектра приборов и их носителей могут быть установлены функциональные зависимости между измеряемыми параметрами.

К.Я. Кондратьев вместе с А.А. Бузниковым на одном из совещаний по использованию пилотируемых космических кораблей, которое вел Сергей Павлович Королёв, предложили перейти от визуальных наблюдений к дистанционным количественным спектральным научным исследованиям атмосферы и Земли. В результате при кафедре физики атмосферы ЛГУ было организовано ОКБ аэрокосмической аппаратуры «Интеграл», где были разработаны первые спектральные приборы РСС-1, -2 и КСС-2, с которыми на кораблях «Союз-4, -5, -7, -9» и «Салют» работали летчики-космонавты В.Н.Волков, Е.В. Хрунов, В.И. Севастьянов, Г.Т. Береговой, П.И. Климук, В.П. Савиных и др. Результаты этих природо-ресурсных исследований были доложены на конференциях и опубликованы в многочисленных статьях и монографиях [15—19].

Работая в Институте озераведения АН СССР (1982—1992 гг.), К.Я. Кондратьев в 1980-е годы организовал проведение комплексных экспериментов с использованием дистанционных аэрокосмических методов по изучению озер Ладога, Онега, Севан, сравнению лимнологии Великих озер Америки и больших озер России Байкала, Ладоги, Онеги, а также по программе «Интеркосмос — внутренние водоемы» [38]. В этот же период была осуществлена программа «Разрезы» в Северной Атлантике под руководством президента Академии наук СССР академика Г.И. Марчука в сотрудничестве с академиками К.Я. Кондратьевым и А.С. Саркисяном по сравнению данных судовых и спутниковых измерений и результатов расчетов по гидродинамике океана [40—45].

В ходе выполнения этих уникальных экспериментов изучалась роль радиационных факторов, основных составляющих уравнения теплового баланса, влияющих на изменение климата; апробировались методы дистанционного зондирования температуры и влажности воздуха, скорости приводного ветра, водозапаса облаков и атмосферы, интенсивности осадков, сплоченности льда и других параметров на основе измерений собственного теплового излучения атмосферы и подстилающей поверхности в СВЧ диапазоне на основе многоканальных спектрально-поляризационных измерений [43—46].

На основе спектральных измерений потоков КВ радиации удалось отделить аэрозольное поглощение от молекулярного; оценить соотношение между составляющими теплового баланса в аэрозольно-замутненной атмосфере; установить, что облака поглощают не только в области молекулярного поглощения, но и в видимой области; выполнить сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов.

Современные изменения климата и экодинамика

В начале семидесятых годов, выступая на ученом совете ГГО, К.Я. Кондратьев сказал, что если исключить опасность возникновения третьей мировой войны, то наибольшую опасность для человечества представляют экологические катастрофы и вопросы экологической безопасности должны быть приоритетными. Не отрицая современного изменения климата, К.Я. Кондратьев в своих публикациях указывал на важность учета цикличности колебаний климатических характеристик разного временного масштаба, ссылаясь на работы М. Миланковича по математической климатологии и астрономической теории колебаний климата, на палеоклиматологические исследования кернов льда в Антарктиде. Он отмечал, что увеличение концентрации CO_2 и повышение температуры наблюдаются не только в наш индустриальный век, но были и в прошлом, причем максимумы температуры и концентрации CO_2 не совпадали по времени. К.Я. Кондратьев был против ратификации Россией Киотского протокола и приветствовал аргументацию многих российских и американских ученых, политиков в этом вопросе [41, 43, 46].

Большой объем данных о парниковых газах, собранных разными учеными, совместно с результатами многочисленных экспериментов и численного моделирования общей циркуляции и климата легли в основу монографий К. Я. Кондратьева «Глобальный климат» и «Экология России» [46, 47]. В них большое внимание уделено тщательному анализу факторов, вызывающих изменения климата, математическим моделям, оценкам неопределенности результатов моделирования климата, соотношению вклада природных и антропогенных факторов и их влияния на температуру земной поверхности и приземного воздуха, на возможный подъем уровня моря, влиянию климатических процессов на экологию, проблеме исчезновения уникальных сред обитания и некоторых живых организмов, воздействию климата на здоровье человека, урожайность сельскохозяйственных культур и качество воды.

В своих работах К.Я. Кондратьев подчеркивал, что основное влияние изменений климата на экосистему проявляется в изменении водных ресурсов и качества воздуха, особенно в мегаполисах, в опустынивании, деградации почв, сокращении биоразнообразия и площади лесов, в нарушении ландшафтов наземных экосистем нашей планеты, что подтверждается результатами комплексных исследований системы Земля — атмосфера на основе как аэрометодов, так и спутникового дистанционного зондирования [47, 48].

В 1992 г. К.Я. Кондратьев и Ола М. Йоханнессен (директор Нансен-центра из норвежского города Бергена) организовали Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена в Санкт-Петербурге, учредителями которого стали научно-исследовательский центр экологической безопасности НИЦЭБ РАН, в котором в это время работал К.Я. Кондратьев, Нансен-центр (Берген), Общество Макса Планка (Германия) и Институт исследований окружающей среды (Анн-Арбора, США). Работа Нансен-центра нацелена на поддержку способной научной молодежи, и благодаря поддержке К.Я. Кондратьева и других специалистов стала весомой в научном сообществе. Так, «Нансен-центр»

в составе международного коллектива с проектом СЕСА «Изменения климата и окружающей среды в Арктике» получил за свою многолетнюю работу премию Декарта за 2005 г.

К.Я. Кондратьев — основоположник глобальной экологии и разработчик стратегий глобальной экодинамики [49—59]. В ряде его работ с соавторами были рассмотрены перспективы развития цивилизации на основе многомерного анализа; экологические катастрофы, как антропогенные, так и природные; проблемные вопросы эволюции глобальной экодинамики и человеческого общества; изменчивость климата и глобального цикла углерода; взаимосвязь экодинамики и геополитики.

Студенты, преподаватели и сотрудники тех организаций, в которых работал К.Я. Кондратьев, благодаря его усилиям получили возможность слушать лекции приглашенных им выдающихся западных ученых: известных спектроскопистов, специалистов в области дистанционного зондирования, численного моделирования погоды и климата. Это было чрезвычайно важно, поскольку большинство зарубежных журналов в советское время приходили в библиотеки с более чем годичным опозданием, «железный занавес», который существовал в те времена, во многом препятствовал общению ученых, искусственно отделял нас от мировой науки.

В 1970 г. благодаря дружеским связям К.Я. Кондратьева с американскими учеными в ЛНЦ РАН был продемонстрирован фильм о реализации лунного проекта США «Аполлон» с показом первых шагов Л. Армстронга по поверхности Луны. По-видимому, такая активность К.Я. Кондратьева не «пришлась по душе» компетентным органам, и негативное отношение к нему со стороны этих структур привело к тому, что начиная с 1977 г. и вплоть до 1991 г. Кирилл Яковлевич был «невъездным».

К.Я. Кондратьев был лауреатом Государственной премии СССР, соавтором научного открытия «Явление вертикально-лучевой структуры дневного излучения верхней атмосферы Земли», занесенного в Государственный реестр открытий СССР под № 106 с приоритетом от 19 мая 1971 г., лауреатом Почетной премии. Он был награжден Большой золотой медалью Всемирной метеорологической организации, Золотой медалью Саймонса Королевского метеорологического общества Великобритании. Избран Почетным членом Американского метеорологического общества (США), Королевского метеорологического общества (Великобритания), Академии естественных наук «Леопольдина» (Германия), иностранным членом Американской академии искусств и наук (США), членом Международной академии астронавтики, почетным доктором университетов Лилля (Франция), Будапешта (Венгрия), Афин (Греция). Многие годы он был главным редактором журнала «Исследование Земли из космоса», членом редколлегий журналов «Оптика атмосферы и океана», «Известия Русского географического общества», членом редколлегий иностранных журналов «Meteorology and Atmospheric Physics» (Австрия), «Idojaras» (Венгрия), «Il Nuovo Cimento C» (Италия), «Atmosfera» (Мексика), «Energy and Environment» (Великобритания). Научно-литературное наследие К.Я. Кондратьева составляет 120 монографий и более 1500 научных статей, опубликованных в ведущих научных журналах в России и за рубежом.

Кирилл Яковлевич, несмотря на свой возраст, смог плодотворно трудиться и в новых экономических условиях, а его энергия, оптимизм, отношение к работе были примером для его коллег. Хотя Кирилла Яковлевича уже давно нет среди нас, его научные издания, подготовленные им ранее, еще и переиздаются в настоящее время [60].

К.Я. Кондратьев был мыслителем с энциклопедической широтой знаний. Как яркого ученого и харизматичного человека его знали во всем мире. При этом он являлся настоящим патриотом своей страны. Свойственные ему простота в общении, отзывчивость и человечность привлекали к нему не только коллег, но и многих других людей из разных сфер жизни [61]. Громадная заслуга Кирилла Яковлевича состоит в том, что в течение нескольких десятилетий наша страна сохраняла ведущие позиции в мире по целому ряду направлений метеорологии и экологии.

Список литературы

1. Кондратьев К.Я. Перенос длинноволнового излучения в атмосфере. М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. 287 с.
2. Кондратьев К.Я., Филипович О.П. Тепловой режим верхних слоев атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 356 с. (переведена на китайский и английский языки).
3. Kondratyev K.Ya. Soviet investigations in the field of actinometry and atmospheric optics // Weather. 1961. V. 16, No. 6.
4. Кондратьев К.Я., Бургова М.П., Гришечкин В.С., Михайлов В.В., Петелин Г.М. Исследования спектрального состава коротковолновой радиации // Проблемы физ. атм. 1962. Вып. 2.
5. Кондратьев К.Я. Метеорологические исследования с помощью ракет и спутников. Гидрометеоздат, 1962. 252 с. (переведена на английский язык).
6. Kondratyev K.Ya., Badinov I.Ya., Gaevskaya G.N., Nikolsky G.A., Fedorova M.P. Balloon investigations of radiative fluxes in the free atmosphere // Pure and Appl. Geophysics. 1964. V. 58.
7. Kondratyev K.Ya., Budyko M.I. The heat balance of the Earth // Research in Geophysics, 1964. V 2, chapt. 20.
8. Kondratyev K.Ya., Andreev S.D., Badinov I.Ya., Grishechkin V.S., Popova L.V. Atmospheric optics investigations on Mt. Elbrus // Applied Optics, 1965. V. 4, No. 9.
9. Kondratyev K.Ya., Gaevsky V.L., Konashenok V.N., Reshetnikov A.I. Lunar meteorological observatory for observations of the Earth / Proc. First LIL Symp. Springer Verlag, Wien — New York, 1966.
10. Кондратьев К.Я. Метеорологические исследования на пилотируемых космических кораблях // Изв. АН СССР. Сер. физика атм. и океана. 1966. Т. 2, № 7.
11. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. О применении приближенных методов учета неоднородности атмосферы при вычислении функций пропускания вращательной полосы водяного пара. // Изв. АН СССР. Сер. физика атм. и океана. 1967. Т. 3, № 2.
12. Кондратьев К.Я. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. Гидрометеоздат, 1969. 564 с. (переведена на английский язык).
13. Kondratyev K.Ya. Radiation in the Atmosphere. Academic Press, 1969. 912 p.
14. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. О возможностях определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радиоизлучению. // Доклады АН СССР. 1970. Т. 194, № 6.
15. Кондратьев К.Я. Бузников А.А., Виноградов Б.В., Волков В.Н., Горбатко В.В., Смоктий О.И., Орлов В.М. Некоторые результаты спектрофотометрирования Земли с пилотируемого космического корабля «Союз-7» // Доклады АН СССР. 1970. Т. 195, № 5.
16. Kondratyev K.Ya., Orlenko L.R., Rabinovich Ya.I. Complex energetics experiment // WMO Bulletin. 1970. V. XIX, No. 4.

17. Kondratyev K.Ya. and et al. Spectrophotometry of the Earth from manned spacecraft (from the data of Soyuz-7 and Soyuz-9) / Astronautical Research Proc. of the XXI IAF Congress. 1971. North Holland Publ. Co. 1971. P. 1001—1008.
18. Kondratyev K.Ya. Spectrophotometry of environments from space // *Naturwissensch.*, 1971. Bd. 58, No. 11. S. 529—541.
19. Kondratyev K.Ya. Radiation Processes in the Atmosphere // WMO Monograph. 1971. No. 309. 214 p.
20. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I., Chernenko A.N. Detection of small fires and mapping large forest fires by infra-red imagery / Proc. 8-th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2—6 Oct. 1972. Michigan, USA, 1972. V. 2. P. 1290—1311.
21. Kondratyev K.Ya. Abridged report to the JOC on the October 1970 — March 1972. Complex Atmospheric Energetics Experiment (CAENEX) results. JOC-VII. Doc. 6.3. WMO, Geneva, 17 April 1972. 28 p.
22. Кондратьев К.Я. Эксперимент «Беринг». Отчет о выполнении советской стороной программы совместного советско-американского эксперимента по исследованию ледового покрова, состояния морской поверхности и зон осадков в районе Берингова моря. Л.: Ротапринт ГГО, 1973. 186 с.
23. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Результаты полного радиационного эксперимента в облачной атмосфере // Труды ГГО. 1973. Вып. 317. С. 3—16.
24. Kondratyev K.Ya., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S. Vertical profiles of the spectral radiative characteristics of the free atmosphere over the desert // *Remote Sensing of Earth Resources*. 1973. V. 2. P. 417—434.
25. Кондратьев К.Я., Берлянд М.Е., Будыко М.И. Климат города и проблема изменения глобального климата // *Метеорология и гидрология*. 1973. № 1. С. 3—14.
26. Kondratyev K.Ya., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S., Ivlev L.S. Ивлев Л.С. Spectral radiative flux divergence and its variability in the troposphere in the 0.4-2.4 nm region. // *Appl. Opt.*, 1974. V. 13, No. 3. P. 478—486.
27. Кондратьев К.Я. Атлантический тропический эксперимент ПИГАП и радиационные факторы погоды и климата // *Метеорология и гидрология*. 1974. № 4. С. 97—106.
28. Kondratyev K.Ya. Binenko V.I., Vasiliev O.B., Grishechkin V. S. Spectral optical properties of stratus clouds from aircraft observations // *Rem. Sens. Earth Resources*. 1975. V.3. P. 177—202.
29. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Спектральная и пространственная структура поля теплового излучения в условиях замутненной атмосферы Марса // Докл. АН СССР. 1975. Т. 224, № 2. С. 316—319.
30. Кондратьев К. Я. Климат и аэрозоль // Труды ГГО. 1976. Вып. 381. С. 3—66.
31. Kondratyev K. Ya., Buznikov A.A., Klimuk P.I., Orlov V.M. Spectrophotometric measurements of the Earth's atmosphere from manned space vehicles // *COSPAR Space Res*. 1976. V. 16. P. 37—42.
32. Кондратьев К.Я., Рабинович Ю.И., Шульгина Е.М. Определение влажности и запасов продуктивной влаги в почве по микроволновому излучению // Труды ГГО. 1976. Вып. 371.
33. Kondratyev K.Ya., Welch R.M., Vasilyev O.B., Zhvaley V. F., Ivlev L.S., Radionov V.F. Comparison between the measured and calculated spectral characteristics of shortwave radiation in the free atmosphere over the desert // *Colorado State Univ. Atmos. Sci. Pap*. 1976. No. 261. 79 p.
34. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S., Shultz E.O. Basic results of spectral radiation studies on the basis of CAENEX and GATE // *Proc. IAMAP Assembly*, Seattle. 1977.
35. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I. Optical properties of dirty clouds // *Boundary layers Meteorol*. 1987. V. 41, No. 4. 24 p.
36. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Дьяченко Л. Н., Корзов В.И. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 232 с.
37. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Полярный аэрозоль, протяженная облачность и радиация. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 150 с.
38. Kondratyev K.Ya., Filatov N.N. Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach. Springer/PRAXIS, Chichester, UK, 1999. 395 p.
39. Kondratyev K.Ya. The greenhouse effect of minor constituents in the atmosphere // *Weather*. 1980. V. 35, No. 9. P. 252—256.
40. Kondratyev K.Ya., Hunt G. Weather and Climate on Planets. Pergamon Press, 1982. 755 p.

41. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
42. Kondratyev K.Ya. Changes in global climate. Rotterdam: Balkema, 1986. 280 p.
43. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Перистые облака, радиация и климат // Итоги науки и техники. Атмосфера — океан — космос. Программа «Разрезы». 1988. Т.18. 138 с.
44. Кондратьев К.Я. Марчук Г.И., Козодеров В.В. Энергоактивные зоны: концептуальные основы. Часть I // Итоги науки и техники. Атмосфера — океан, космос. Программа «Разрезы». 1989. Т. 10. 368 с.
45. Kondratyev K.Ya., Buznikov A.F., Pokrovsky O.M. Global Change and Remote Sensing. Wiley/PRAIX, Publishing Ltd. Chichester, UK, 1996. 370 p.
46. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб: Наука, 1992. 358 с.
47. Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Горшков В.Г., Котляков В.М. Экология России. М. изд-во ВИНТИ, 1992. 321 с.
48. Kondratyev K.Ya. Arsky Yu.M., Danilov-Danilyan V.I., Zalikhanov M.Ch., Kotlyakov V.M., Losev K.S. Ecological Problems: What is Going on, Who is Responsible and What to Do? Moscow, 1997. 331 p.
49. Kondratyev K.Ya. Bukata R.P., Jerome J.H., Pozdnyakov D.V. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton: CRC Press. 1995. 362 p.
50. Kondratyev K.Ya. Johannessen O.M., Melentyev V.V. High Latitude Climate and Its Remote Sensing Monitoring. Praxis Publ. Ltd., Chichester, UK, 1995. 395 p.
51. Kondratyev K.Ya. Multidimensional Global Change. London: Wiley/PRAIX, 1998. 729 p.
52. Кондратьев К.Я. Экодинамика и геополитика. Глобальные проблемы. СПб: изд-во ИЦ РАН. 1999. Т. 1. 1040 с.
53. Kondratyev K.Ya., Grigoryev A.A., Varotsos C.A. Environmental Disasters: Anthropogenic and Natural. Chichester: Springer/Praxis, 2002. 484 p.
54. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. Global Environmental Dynamics. Springer/Praxis, 2002. 578 p.
55. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ. М.: Логос, 2003. 573 с.
56. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., Varotsos C.A. Global Ecodynamics and Human Society. Springer/Praxis, Chichester, UK, 2004. 687 p.
57. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. Springer/Praxis, Chichester, UK, 2003. 344 p.
58. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric Aerosol Properties, Formation, Processes, and Impacts: From Nano- to Global Scales. Springer/PRAIX, Chichester, UK, 2005. 572 p.
59. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Natural Disasters as Components of Ecodynamics. Springer/PRAIX, Chichester, UK, 2006. 625 p.
60. Kondratyev K.Ya., Bukata R.P., Jerome J. H., Pozdnyakov D.V. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. CRC Press, 2018. 362 p.
61. Академик Кирилл Яковлевич Кондратьев. Из поколения победителей. Сборник статей. СПб: изд-во ВВМ, 2010. 406 с.

References

1. Kondratyev K.Ya. *Perenos dlinnovolnovogo izlucheniya v atmosphere*. Transfer of long-wave radiation in the atmosphere. Moscow, Leningrad: State publishing house of technical and theoretical literature, 1950: 287 p. [In Russian].
2. Kondratyev K.Ya., Filipovich O.P. *Teplovoi rezhim verxnei atmosfery*. Thermal regime of the upper atmosphere. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1960: 356 p. [In Russian].
3. Kondratyev K.Ya. Soviet investigations in the field of actinometry and atmospheric optics. Weather, 1961: 16 (6).
4. Kondratyev K.Ya., Burgova M.P., Grischechkin V.S., Mihailov V.V., Petelin G.M. Investigations of the spectral composition of short-wave radiation. *Problemy fiziki Atmosfery*. Problems of atmospheric physics LSU Ed., 1962, 2. [In Russian].

5. Kondratyev K.Ya. *Meteorologicheskie issledovaniya s pomoshchyu roket i sputnikov*. Meteorological research using rockets and satellites. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1962: 252 p. [In Russian].
6. Kondratyev K.Ya., Badinov I.Ya., Gaevskaya G.N., Nikolsky G.A., Fedorova M.P. Balloon investigations of radiative fluxes in the free atmosphere. Pure and Appl. Geophysics. 1964, 58.
7. Kondratyev K.Ya., Budyko M.I. The heat balance of the Earth. Research in Geophysics, MIT Press, Cambridge, Mass. 1964, 2 (20).
8. Kondratyev K.Ya., Andreev S.D., Badinov I.Ya., Grishechkin V.S., Popova L.V. Atmospheric optics investigations on Mt. Elbrus. Applied Optics. 1965, 4 (9).
9. Kondratyev K.Ya., Gaevsky V.L., Konashenok V.N., Reshetnikov A.I. Lunar meteorological observatory for observations of the Earth. Proc. First LIL Symp., Springer Verlag, Wien – New York, 1966.
10. Kondratyev K.Ya. Meteorological research on manned spaceships. *Izvestiya AN SSSR, seriya fiziki atmosfery i okeana*. Izvestiya AN USSR, a series of atmospheric physics and ocean. 1966, 2 (7). [In Russian].
11. Kondratyev K.Ya., Timofeev Ya.M. On the application of approximate methods for accounting for atmospheric inhomogeneity in calculating the transmission functions of a rotational band of water vapor. *Izvestiya A.N. SSSR, seriya fiziki atmosfery i okeana*. Izvestiya A.N. USSR, a series of atmospheric physics and ocean. 1967, 3 (2). [In Russian].
12. Kondratyev K.Ya. *Radiatsionnye xarakteristiki atmosfery i zemnoi poverhnosti*. Radiation characteristics of the atmosphere and the earth's surface. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1969: 564 p. [In Russian].
13. Kondratyev K.Ya. Radiation in the Atmosphere. Academic Press, 1969: 912 p.
14. Kondratyev K.Ya., Timofeev Ya.M., Shul'gina E.M. On possibilities of determination of characteristics of surface soil by its thermal radiation. *Doklady AN SSSR*. Proc. of the Academy of Sciences USSR. 1970, 194 (6).
15. Kondratyev K.Ya., Buznikov A.A., Vinogradov B.V., Volkov V.N., Gorbatko V.V., Smoktiy O.I., Orlov V.M. Some results of Earth spectrophotometry from the Soyuz-7 manned spacecraft. *Doklady AN SSSR*. Proc. of the USSR Academy of Sciences. 1970, 195 (5).
16. Kondratyev K.Ya., Orlenko L.R., Rabinovich Ya.I. Complex energetics experiment. Bulletin WMO. 1970, XIX (4).
17. Kondratyev K.Ya., Buznikov A.A., Chapursky L.I., Gorbatko V.V., Grigoriev A.A., Nikolaev A.G., Orlov L.M., Rabinovich Yu.I., Sevastyanov V.I., Smoktiy O.I., Vasiliev O.B., Vinogradov B.V., Volkov V.N. Spectrophotometry of the Earth from manned spacecraft (from the data of Soyuz-7 and Soyuz-9). Astronautical Research. Proc. of the XXI-st IAF Congress. North Holland Publ. Co. 1971: 1001-1008.
18. Kondratyev K.Ya. Spectrophotometry of environments from space. *Naturwissenschaften*. 1971, 58 (11): 529-541.
19. Kondratyev K.Ya. Radiation Processes in the Atmosphere. WMO Monograph. 1971, 309: 214 p.
20. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I., Chernenko A.N. Detection of small fires and mapping large forest fires by infra-red imagery. Proc. of the 8-th International Symposium on Remote Sensing of Environment. 2-6 Oct. 1972, Michigan, USA, 1972. 2: 1297-1311.
21. Kondratyev K.Ya. Abridged report to the JOC on the October 1970-March 1972 Complex Atmospheric Energetics Experiment (CAENEX) results/ JOC-VII/ Doc. 6.3 WMO, Geneva, 17 April 1972, 1972: 28 p.
22. Kondratyev K.Ya. *Ekspеримент «Bering»*. *Otchet o vypolnenii sovetskoy storonoi programmy sovmechnogo sovetsko-amerikanskogo eksperimenta po issledovaniyu ledovogo pokrova, sostoyaniyu morskoi poverhnosti i zon ocadkov v raione Beringova morya*. The Bering Experiment. Report on the implementation by the Soviet side of the program of the joint Soviet-American experiment to study the ice cover, the state of the sea surface and precipitation zones in the Bering sea area. Leningrad: Voeikov Main Geophysical Observatory, 1973: 186 p. [In Russian].
23. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I. Results of a complete radiation experiment in a cloudy atmosphere. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii*. Proceedings of the Main Geophysical Observatory. 1973, 317: 3-16. [In Russian].
24. Kondratyev K.Ya., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S. Vertical profiles of the spectral radiative characteristics of the free atmosphere over the desert. Remote Sensing of Earth Resources. Univ. of Tennessee. 1973, 2: 417-434.
25. Kondratyev K.Ya., Berlyand M.E., Budyko M.I. City climate and the problem of global climate change. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1973, 1: 3-14. [In Russian].

26. Kondratyev K. Ya., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S., Ivlev L.S. Spectral radiative flux divergence and its variability in the troposphere in the 0.4-2.4 nm region. *Appl. Opt.* 1974, 13 (3): 478-486.
27. Kondratyev K. Ya. Atlantic tropical experiment PIGAP and radiation factors of weather and climate. *Meteorologiy i gidrologiy.* Meteorology and Hydrology. 1974, 4: 97-106. [In Russian].
28. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S. Spectral optical properties of stratus clouds from aircraft observations. *Rem. Sens. Earth Resources. Univ. of Tennessee.* 1975, 3: 177-202.
29. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N.I. Spectral and spatial structure of the thermal radiation field in the conditions of the clouded atmosphere of Mars. *Doklady AN SSSR. Proc. USSR Academy of Sciences.* 1975, 224 (2): 316-319. [In Russian].
30. Kondratyev K. Ya. Climate and aerosol. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii.* Proceedings of the Main Geophysical Observatory, 1976, 381: 3-66. [In Russian].
31. Kondratyev K. Ya., Buznikov A.A., Klimuk P.I., Orlov V.M. Spectrophotometric measurements of the Earth's atmosphere from manned space vehicles. *COSPAR Space Res. Berlin,* 1976, 16: 37-42.
32. Kondratyev K. Ya., Rabinovich Yu.I., Shulgina E.M. Determination of humidity and reserves of productive moisture in the soil by microwave radiation. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii.* Proceedings of the Main Geophysical Observatory. 1976, 371. [In Russian].
33. Kondratyev K. Ya., Welch R.M., Vasilyev O.B., Zhvaley V.F., Ivlev L.S., Radionov V.F. Comparison between the measured and calculated spectral characteristics of shortwave radiation in the free atmosphere over the desert. *Colorado State Univ. Atmos. Sci. Pap.* 1976, 261: 79 p.
34. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I., Vasiliev O.B., Grishechkin V.S., Shultz E.O. Basic results of spectral radiation studies on the basis of CAENEX and GATE. *Proc. of the IAMAP Assembly, Seattle,* 1977.
35. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I. Optical properties of dirty clouds. *Boundary Layers Meteorology.* 1987, 41 (4): 24 p.
36. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I., Dyachenko L.N., Korzov V.I. *Albedo i uglovyye harakteristiki otrazheniya podstilayuschey poverhnosti i oblakov.* Albedo and angular characteristics of reflection of the underlying surface and clouds. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 232 p. [In Russian].
37. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I. (eds.). *Polar Aerosols, Extended Cloudiness, and Radiation.* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 150 p.
38. Kondratyev K. Ya., Filatov N.N. *Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach.* Springer/PRAXIS, Chichester, UK, 1999: 395 p.
39. Kondratyev K. Ya. The greenhouse effect of minor constituents in the atmosphere. *Weather.* 1980, 35 (9): 252-256.
40. Kondratyev K. Ya., Hunt G. *Weather and Climate on Planets.* Pergamon Press, 1982: 755 p.
41. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I. *Vliyeniye oblachnosti na radiatsiy i klimat.* Influence of clouds on radiation and climate. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1984: 240 p. [In Russian].
42. Kondratyev K. Ya. *Changes in global climate.* Rotterdam: Balkema, 1986: 280 p.
43. Kondratyev K. Ya., Binenko V.I. *Peristyya oblaka i klimat. Itogi nauki i tekhniki. Atmosfera – ocean – kosmos. Programma «razrezya».* Cirrus clouds, radiation and climate. "Results of science and technology. Atmosphere – ocean – space. Program "Cross Sections". Moscow: VINITI. 1988, 18: 138 p. [In Russian]
44. Kondratyev K. Ya., Marchuk G.I., Kozoderov V.V. *Energoaktivnyy zony: konceptual ocnovaya. chast I. Itogi nauki i tekhniki. Atmosfera – ocean – kosmos. Programma «razrezya».* Energy-active zones: conceptual foundations. Part I. Results of science and technology. Atmosphere, ocean, space - program "Cross sections". Moscow: VINITI. 1989, 10: 368 p. [In Russian].
45. Kondratyev K. Ya., Buznikov A.A., Pokrovsky O.M. *Global Change and Remote Sensing/ Wiley/PRAXIS Publishing Ltd.* Chichester, West Sussex, England, 1996: 370 p.
46. Kondratyev K. Ya. *Globalnyy klimat.* Global climate. St. Petersburg: Nauka, 1992: 358 p. [In Russian].
47. Kondratyev K. Ya., Losev K.S., Gorshkov V.G., Kotlyakov V.M. *Ecologiy Rossii.* Ecology of Russia. Moscow: VINITI, 1992: 321 p. [In Russian].
48. Kondratyev K. Ya., Arsky Yu.M., Danilov-Danilyan V.I., Zalikhanov M. Ch., Kotlyakov V.M., Losev K.S. *Ecological Problems: What is Going on, Who is Responsible and What to Do?* Moscow: MNEPU, 1997: 331 p.
49. Kondratyev K. Ya., Bukata R.P., Jerome J.H., Pozdnyakov D.V. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters.* Boca Raton : CRC Press, 1995: 362 p.

50. Kondratyev K.Ya., Johannessen O.M., Melentyev V.V. High Latitude Climate and Its Remote Sensing Monitoring. Praxis Publ. Ltd., UK, Chichester, 1995: 395 p.
51. Kondratyev K.Ya. Multidimensional Global Change. Wiley/PRAXIS, London, 1998: 729 p.
52. Kondratyev K.Ya. *Ecodinamika I geopolitika. Global'nye problem.* EcoDynamics and geopolitics. Global problems. St. Petersburg national research center of the Russian Academy of Sciences, 1999: 1040 p. [In Russian]
53. Kondratyev K.Ya. Grigoryev A.A., Varotsos C.A. Environmental Disasters: Anthropogenic and Natural. Chichester: Springer/Praxis. 2002: 484 p.
54. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. Global Environmental Dynamics. Springer/Praxis. 2002: 578 p.
55. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P. *Perspektivy razvitiy Mnogomernyi analiz.* Prospects for the development of civilization. Multidimensional analysis. Moscow: Logos, 2003: 573 p. [In Russian].
56. Kondratyev K. Ya., Krapivin V. F., Savinykh V. P., Varotsos C.A. Global Ecodynamics and Human Society. Springer-Praxis, Chichester, UK, 2004: 687 p.
57. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. Springer/Praxis, Chichester, UK, 2003: 344 p.
58. Kondratyev K. Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric Aerosol Properties, Formation, Processes, and Impacts: From Nano- to Global Scales. Springer/PRAXIS, Chichester, UK, 2005: 572 p.
59. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Natural Disasters as Components of Ecodynamics. Springer/PRAXIS, Chichester, UK, 2006: 625 p.
60. Bukata R.P., Jerome J.H., Kondratyev K.Ya., Pozdnyakov D.V. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton: CRC Press, 2018: 362 p.
61. Akademik Kirill Yakovlevich Kondratiev «Iz pokoleniy pobeditelei». “Academician Kirill Yakovlevich Kondratyev “From the generation of winners”. Collected papers. Saint Petersburg: VVM, 2010: 406 p. [In Russian].

Статья поступила 17.05.2020

Принята после доработки к публикации 15.06.2020

Информация об авторе

Биненко Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник СПб НИЦЭБ РАН, e-mail: vibinenko@mail.ru

Information about authors

Binenko Viktor Ivanovich, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), professor, leading researcher of St. Petersburg SRCES RAS

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

УДК 551.583.7:[001.26+ 930.24]

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-150-158

Метод совместного представления датировок ископаемых объектов

Д.И. Якушев

Санкт-Петербургский университет МВД России, Санкт-Петербург, d.i.ya@yandex.ru

Предложен метод совокупного представления датировок ископаемых объектов. Такой подход позволяет представить многочисленные разрозненные датировки ископаемых объектов, содержащие информацию о характеристиках палеоклимата, в виде дискретного ряда, качественно отражающего увлажненность регионов. Результатом применения метода также может стать гипотеза о недостоверности отдельных датировок. Метод может быть применен и для анализа температурного режима исследуемых регионов.

Ключевые слова: палеоклимат, датировка, ископаемые объекты, дискретный ряд, ошибки датирования, голоцен.

Method for consolidate representation of fossil objects dating

D.I. Yakushev

Saint-Petersburg Police University, Saint Petersburg, Russia

So far, methods of dating fossil objects have allowed us to obtain a large amount of data that characterize the moisturization of our planet's areas during different time intervals. At the same time, in some cases, fossil objects contain information about the characteristics of the climate of the epoch of their existence. The available dating is scattered and does not allow us to get an overall picture of the changes occurred. Therefore, the developed method of aggregate representation of dates is relevant. Scientific materials containing the desired dating are mainly presented on the Internet. Therefore, the target of the first stage is to identify the publications of interest. At the second stage, the dating found and its characteristics are summarized in table 1. At the third stage, the data in table 1 is converted to table 2, reflecting the change in the moisture content of regions with a 100 years sampling interval. At the fourth stage, a simple rule is applied to exclude two multidirectional trends in each cell of table 2. As a result of exclusion, only unidirectional signs remain in each cell that qualitatively characterize the moisture content of the studied regions. It seems that the dating found in a significant minority should be questioned. However, cases in which the number of exceptions exceeds the number of non-excluded characters require additional research. The proposed method is not limited either by the number of studies involved or by the dating methods used. The scientific novelty of the proposed method consists in the aggregate representation of known dating of fossil objects containing information about the characteristics of the climate of the epoch of its existence. The objectivity of the results obtained is based on the use of a variety of independent dating of fossil objects obtained by different methods for different periods and regions. The reliability of the results obtained will increase with the number of dating involved in the analysis.

Keywords: paleoclimate, dating, fossil objects, discrete series, errors of dating, Holocene.

For citation: *D.I. Yakushev. Method for consolidate representation of fossil objects dating. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Russian J. of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 59: 150—158. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-150-158*

Введение

Методы датировки ископаемых объектов к настоящему времени позволили получить большое количество данных, характеризующих увлажнение районов нашей планеты в различные временные интервалы. Перечисление этих методов и особенности их применения выходят за рамки настоящей статьи. Общим является то, что они позволяют оценить возраст ископаемых объектов. При этом в некоторых случаях ископаемые объекты содержат информацию и о характеристиках климата эпохи своего существования. Например, исследование пыльцы и спор в ископаемом слое позволяет судить о типе растительности, а следовательно, о температуре и увлажненности исследуемого региона.

К настоящему времени накоплены огромные массивы разрозненных датировок в виде научных статей и отчетов, и число их продолжает увеличиваться. География ископаемых объектов охватывает большую часть поверхности суши. Датировки получены с помощью различных методов и в основном подтверждают и взаимно дополняют друг друга. Однако, во-первых, датировки являются разрозненными, что не позволяет оценить в совокупности имеющиеся данные по интересующему периоду или региону, а, во-вторых, встречаются несогласующиеся между собой и даже противоречащие друг другу данные (см., например, [1, с. 41; 2, с. 8—9]). Поэтому актуальным является вопрос о совместном представлении имеющихся разрозненных датировок ископаемых объектов, что позволит: во-первых, собрать имеющиеся датировки объектов, содержащих информацию о палеоклимате; во-вторых, совокупно представить выявленные данные о климате предшествующих эпох; в-третьих, выявить несоответствия, которые, возможно, помогут оценить существующие датировки с точки зрения их достоверности.

Целью настоящей статьи является описание метода совместного представления датировок ископаемых объектов.

В исследовании рассматривались данные об увлажненности регионов, взятые из случайной выборки статей, в которых в основном представлены результаты исследований ископаемой пыльцы растений.

Метод совместного представления датировок

1. Первым шагом при проведении исследования является выявление существующих датировок. Представляется, что большинство полученных датировок опубликовано в научных отчетах, статьях, материалах конференций, выложенных в Интернет. Поэтому задачей первого этапа исследований является поиск представляющих интерес датировок в Интернете. При разработке метода поиск производился путем обычного запроса в поисковой системе (например, Яндекс) по ключевым словам (например, «палинологические исследования»), а далее осуществлялся просмотр выдачи.

Доля страниц, на которых отсутствуют искомые датировки, очень велика. Поэтому при применении метода к решению конкретной практической задачи, например совместного представления датировок ископаемых объектов, характеризующих увлажнение Камчатки, предпочтительна разработка специального

поискового запроса, учитывающего как особенности поисковой системы, так и характер решаемой задачи. Результатом первого этапа, помимо датировки, описания региона (например, Камчатка) и представляющей интерес характеристики (например, «увеличение увлажнения»), должны стать данные об авторе материала, ископаемом объекте, методе датировки, универсальном указателе ресурса (URL), дате обращения, идентификаторе цифрового объекта (doi) и текст статьи. Возможно, некоторые из этих атрибутов и не понадобятся в дальнейшем исследовании, однако в случае возникновения неясностей эта информация с высокой вероятностью поможет их разрешить.

При разработке метода совместного представления датировок использовались материалы случайной выборки статей из Интернета, содержащих датировки ископаемых объектов в голоцене — более 12 000 лет тому назад.

2. Данные по датировке увлажненности регионов, содержащиеся в выявленных публикациях, были сведены в табл. 1 (некоторые атрибуты в целях сокращения объема не представлены). При этом интервалы повышения/понижения увлажненности, превышающие 1200 лет, не рассматривались, поскольку их длительность значительно превышает продолжительность подавляющего числа других интервальных оценок. Все найденные датировки были приведены к хронологии «календарных лет назад».

Таблица 1

Датировки увлажненности регионов
Dating of moisture content of regions

Число календарных лет назад	Регион	Характеристика	Источник
10 800—10 200	Карелия	Уменьшение увлажненности	Лаврова, 2008
10 300—10 200	Волго-Клязьменское междуречье	Увеличение влажности	Аверин, 2008
9800—9500	Дубна	Сокращение площади болот	Низовцев, 2009
9500—9300	Дубна	Существенное сокращение площади водоемов	Низовцев, 2009
9400—8400	Эфиопия Кения Чад	Экстремально высокий уровень озер	Grove, Goudie, 1971 Richardson, 1966 Grove, Goudie, 1971
9200—9000	Дубна	Увеличение площади водоемов	Низовцев, 2009
9000—8600	Дубна	Уменьшение площади водоемов	Низовцев, 2009
9025±180	Среднетаежная подзона	Осадки (N–242)	Карпекко, 2005
8420±120	Западной Сибири	Осадки (N–134)	
8500—7700	Южное Зауралье	Высокое увлажнение	Рябогина, 2005
8000	Палестина	Аридизация климата	Hassan, 1986
7700—6300	Южное Зауралье	Низкое увлажнение	Рябогина, 2005
7500	Северная Африка	Кульминация аридного климата	Lubell, 2001
7500—7100	Дубна	Уменьшение площади водоемов	Низовцев, 2009
7500—6800	Северо-запад Байкала	Обильное увлажнение	Безрукова и др., 2007

Продолжение табл. 1

Число календарных лет назад	Регион	Характеристика	Источник
7200—6500	Северо-запад России	Увеличение площади водоемов	Долуханов, 1981
7100—6500	Дубна	Увеличение площади водоемов	Низовцев, 2009
6800—6300	Уэлен, северо-восток Чукотки	Высокое увлажнение	Переладов, 2006
6700—5980	Приморье	Влажный климат голоценового оптимума	Урусов, Чипизубова, 2009
6300—6100	Южное Зауралье	Увеличение увлажнения	Рябогина, 2005
6100—5300	Южное Зауралье	Уменьшение увлажнения	Рябогина, 2005
6000	Карелия	Максимум осадков	Филимонова, 2005
6000—4500	Нижнее Поволжье	Увеличение годового количества осадков	Бочкарев, Рысин, 2006
5670—5000	Камчатка	Пик увлажнения	Дирксен, Успенская, 2005
5500—5000	Центральная Мещера	Максимальное сокращение площади озер	Дьяконова, Абрамова, 1998
5200—4200	Горные районы Южной Сибири, Камчатки, Северной Америки, Скандинавии	Проявление увлажнения	Максимов, 1980; Зубарева, 1981; Савина, 1986; Webb et al., 1993; Андреев, Певзнер, 2001
5000	Белоруссия	Начало увеличения увлажнения	Симакова, 2007
5000—4300	Камчатка	Низкая влажность	Дирксен, Успенская, 2005
5000—4700	Северо-запад Байкала	Увеличение влажности	Безрукова и др., 2007
4700—3600	Карелия	Низкое увлажнение	Филимонова, 2005
После 4500	Нижнее Поволжье	Ярко выраженная аридизация климата	Бочкарев, Рысин, 2006
4300—3600	Пустыня Негев	Наибольшее увлажнение	Бабенко, 2007
4300—3500	Камчатка	Пик увлажнения	Дирксен, Успенская, 2005
~ 4200	Приморье	Уменьшение увлажненности	Урусов, Чипизубова, 2009
~ 4200	Египет	Начало упадка Древнего царства. Начало сильнейшей засухи	—
4200—3900	Междуречье	Великая засуха	—
4200—3700	Нижнее Поволжье	Резкая аридизация климата (–50 мм)	Бочкарев, Рысин, 2006
~ 4100	Южный Урал	Резкая аридизация климата. Лесостепь сменяется степью и даже полупустыней	Спиридонова, 1991
4000—3000	Монголия	Понижение уровня озер	Дорофеюк, 2008

Число календарных лет назад	Регион	Характеристика	Источник
3900—3500	Среднерусская лесостепь	Повышенное увлажнение	Ахтырцев, Ахтырцев, Яблонских, 2009
3800	Камчатка	Влажный климат	Дирксен, Успенская, 2005
3500—3200	Самарское Поволжье	Влажный климат	Мерперт, Смирнов, 1960
3500—2800	Нижнее Поволжье	Увеличение увлажненности	Бочкарев, Рысин, 2006
3400—2800	Дон	Повышение влажности	Агафонов, 2005
~ 3300	Степи Восточной Европы	Максимум увлажнения	Брукс, 1952
3000—2000	Монголия	Повышение уровня озер	Дорофеюк, 2008
2750—1550	Прибайкалье	Период очередного увлажнения климата Ярменских болот	Безрукова и др., 2004
~ 2600	Западный Саян	Расширение ареала еловых лесов (увеличение увлажненности)	Савина, 1986
~ 2600	Монгольский Алтай	Расширение ареала еловых лесов (увеличение увлажненности)	Виппер и др., 1975
~ 2600	Киргизский Алатау	Подвижки ледников (увеличение увлажненности)	Максимов, 1980
~ 2600	Алтай	Подвижки ледников (увеличение увлажненности)	Михайлов, Севастьянов, 1994
~ 2600	Западный Тибет	Поднятие уровня озер	Hui et al., 1996
~ 2600	Вьетнам	Трансгрессия уровня моря у побережья	Korotky et al., 1995
2800—2100	Северо-Западная Европа	Влажный климат	Борисенков, Пасецкий, 1988
2600—2150	Пустыня Негев	Аридизация климата	Бабенко и др., 2005
2500—2000	Белоруссия	Влажный климат	Симакова, 2007
2450	Патагония	Обнаружена фауна, характерная для аридных условий	Борисова, 2007
2000—1600	Пустыня Негев	Увлажнение климата	Бабенко и др., 2005
700—300	Пустыня Негев	Наибольшее увлажнение	Бабенко, 2007

То, что климат вообще и увлажненность материков в частности не являются величиной постоянной, видимо, обоснования не требует. Однако данные о времени и об интенсивности происходивших изменений могут различаться вплоть до того, что противоречат друг другу. Подобное расхождение может быть вызвано различными внешними физическими условиями существования исследуемых образцов [1], ошибками стратиграфии и другими факторами. При этом представляется, что большинство датировок соответствуют происходившим процессам. В противном случае неминуемо всплывшие противоречия вызвали бы отказ от применения метода, с помощью которого они были получены. Поскольку методы применяются, в большинстве случаев явные противоречия не проявляются.

3. При анализе данных, приведенных в табл. 1, было принято, что изменения увлажненности материков происходили однонаправленно в разных регионах. Представляется, что это предположение было основано на том, что в настоящее время происходит глобальное потепление. Оно происходит на всей планете Земля независимо ни от границ северного, южного, восточного или западного полушария, ни от границ материков, ни тем более от установленных государственных границ ([3, с. 4, 13, 31] и др.). Отсюда в рамках принятого предположения следует вывод о том, что, например, значительное долговременное сокращение площади ледников в Альпах говорит о потеплении климата на всей планете. Если же для какой-либо эпохи будет найдено фактическое опровержение выдвинутому предположению, то оно должно быть либо отвергнуто, либо скорректировано.

Таблица 2 (строки КЛН (календарных лет назад) и НИУ (направление изменения увлажненности) была составлена на основании данных табл. 1 по следующим правилам:

- временные интервалы, указанные в табл. 1, были разбиты на отрезки по 100 лет;

- при увеличении увлажненности в рассматриваемый отрезок времени в соответствующую ячейку табл. 2 ставился знак ↑, а при уменьшении — знак ↓;

- при максимуме увлажненности в рассматриваемый отрезок времени в соответствующую ячейку табл. 2 ставился знак ↑↑, а при минимуме — знак ↓↓;

- если максимум (минимум) указан в точке (например, 7500), то интервалом повышения (понижения) увлажненности считался период ± 100 лет (7600—7400).

Выбор интервала дискретизации в 100 лет стал компромиссом между желанием его минимизации, с одной стороны, и реальными интервальными оценками, в некоторых случаях превышающими 1000 лет, с другой стороны. Кроме того, интервал 100 лет соответствует разрешению по времени таких источников климатической информации, как споро-пыльцевые спектры, палеопочвы и лессовые отложения [4, с. 306].

4. Исходя из принятой гипотезы о соответствии в основном существующих датировок происходившим процессам при анализе полученных результатов используется простое правило исключения двух разнонаправленных трендов в каждой ячейке строк НИУ в табл. 2. В результате исключения в каждой ячейке остаются только однонаправленные знаки, качественно характеризующие увлажнение исследуемых регионов. Представляется, что оказавшиеся в значимом меньшинстве датировки должны быть подвергнуты сомнению. Однако случаи, в которых число исключений превышает число не исключенных знаков, требуют поиска дополнительных датировок. Кроме того, подобная ситуация может указывать на разнонаправленность изменений, происходивших в разных регионах.

5. В результате получится ряд с интервалом дискретизации 100 лет (строки КЛН и «Ряд» в табл. 2), составленный на основании данных доступных публикаций, который характеризует изменение увлажненности регионов во времени. Запись ряда должна иметь неизменную структуру, что необходимо для корректной автоматической обработки, но при этом представление ряда должно быть удобно для зрительного восприятия. Исходя из этого было принято табличное

Таблица 2

Изменение увлажненности регионов

Changing the moisture content of regions

КЛН	1000— 1100	1100— 1200	1200— 1300	1300— 1400	1400— 1500	1500— 1600	1600— 1700	1700— 1800	1800— 1900	1900— 2000
НИУ	—	—	—	—	—	—	↑	↑	↑	↑
Ряд	0—(0)	0—(0)	0—(0)	0—(0)	0—(0)	0—(0)	1(0)	1↑(0)	1↑(0)	1↑(0)
КЛН	2000— 2100	2100— 2200	2200— 2300	2300— 2400	2400— 2500	2500— 2600	2600— 2700	2700— 2800	2800— 2900	2900— 3000
НИУ	↑↑	↑↑	↑↓↑	↑↓↑	↑↓↑	↑↑↑↑↑↑↑↓	↑↑↑↑↑↑↑	↑	↑↑↑	↑↑↑
Ряд	2↑(0)	2↑(0)	1↑(1)	1↑(1)	1↑(1)	6↑(1)	7↑(0)	1↑(0)	3↑(0)	3↑(0)
КЛН	3000— 3100	3100— 3200	3200— 3300	3300— 3400	3400— 3500	3500— 3600	3600— 3700	3700— 3800	3800— 3900	3900— 4000
НИУ	↓↑↑	↓↑↑	↓↑↑↑	↓↑↑↑	↓↑↑	↑↓↑	↑↓↑↓	↓↑↓↑↑↑	↓↑↓↑↑↑	↓↑↓↓↓↓
Ряд	1↑(1)	1↑(1)	2↑(1)	2↑(1)	1↑(1)	1↑(1)	0—(2)	0—(3)	0—(3)	4↓(1)
КЛН	4000— 4100	4100— 4200	4200— 4300	4300— 4400	4400— 4500	4500— 4600	4600— 4700	4700— 4800	4800— 4900	4900— 5000
НИУ	↓↑↓↓↓↓↓↓	↓↑↓↓↓↓↓↓	↑↓↑↓↓	↑↓↓	↑↓↓↓	↑↓↓	↑↓↓	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
Ряд	6↓(1)	7↓(1)	1↓(2)	1↓(1)	2↓(1)	1↓(1)	1↓(1)	1↑(1)	1↑(1)	1↑(1)
КЛН	5000— 5100	5100— 5200	5200— 5300	5300— 5400	5400— 5500	5500— 5600	5600— 5700	5700— 5800	5800— 5900	5900— 6000
НИУ	↑↓↑↑	↑↓↑↑	↑↓	↓↑↓	↓↑↓	↓↑	↓↑	↓	↓	↓↑↑
Ряд	2↑(1)	2↑(1)	0—(1)	1↓(1)	1↓(1)	0—(1)	0—(1)	1↓(0)	1↓(0)	1↑(1)
КЛН	6000— 6100	6100— 6200	6200— 6300	6300— 6400	6400— 6500	6500— 6600	6600— 6700	6700— 6800	6800— 6900	6900— 7000
НИУ	↑↓↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
Ряд	2↑(1)	2↑(0)	2↑(0)	2↑(0)	2↑(0)	4↑(0)	4↑(0)	3↑(0)	3↑(0)	3↑(0)
КЛН	7000— 7100	7100— 7200	7200— 7300	7300— 7400	7400— 7500	7500— 7600	7600— 7700	7700— 7800	7800— 7900	7900— 8000
НИУ	↑↑↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↓↓↑	↓↓	—	↑	↑	↑↓
Ряд	3↑(0)	0—(1)	0—(1)	0—(1)	2↓(1)	2↓(0)	0—(0)	1↑(0)	1↑(0)	0—(1)
КЛН	8000— 8100	8100— 8200	8200— 8300	8300— 8400	8400— 8500	8500— 8600	8600— 8700	8700— 8800	8800— 8900	8900— 9000
НИУ	↑↓	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
Ряд	0—(1)	1↑(0)	1↑(0)	1↑(0)	2↑(0)	1↑(0)	0—(1)	0—(1)	0—(1)	0—(1)
КЛН	9000— 9100	9100— 9200	9200— 9300	9300— 9400	9400— 9500	9500— 9600	9600— 9700	9700— 9800	9800— 9900	9900— 10000
НИУ	↑↑	↑↑	↑	↓↑	↓	↓	↓	↓	—	—
Ряд	2↑(0)	2↑(0)	1↑(0)	0—(1)	1↓(0)	1↓(0)	1↓(0)	1↓(0)	0—(0)	0—(0)
КЛН	10000— 10100	10100— 10200	10200— 10300	10300— 10400	10400— 10500	10500— 10600	10600— 10700	10700— 10800	10800— 10900	10900— 11000
НИУ	—	—	↑↓	↓	↓	↓	↓	↓	—	—
Ряд	0—(0)	0—(0)	0—(1)	1↓(0)	1↓(0)	1↓(0)	1↓(0)	1↓(0)	0—(0)	0—(0)

Примечание. КЛН — календарных лет назад, НИУ — направление изменения увлажненности, Ряд — итоговый ряд.

представление ряда со следующей структурой. Временные отметки расположены в строках КЛН. Первое число в ячейке строки «Ряд» (см. табл. 2) обозначает число не исключенных датировок, указывающих на повышение ↑ или понижение ↓ увлажненности, а число в скобках — число исключенных разнонаправленных трендов. Прочерком (—) обозначено отсутствие не исключенных трендов. В отдельных случаях, например при отсутствии датировок в ячейке, запись могла бы быть упрощена, однако структура записей оставлена неизменной в целях упрощения их дальнейшей автоматической обработки.

В полученном ряде отображаются только периоды повышения ↑ и понижения ↓ увлажнения, а количественные характеристики не учитываются. Предлагаемый метод не ограничен ни количеством привлекаемых исследований, ни географическим расположением исследуемых регионов, ни использованными методами датирования.

Полученный ряд содержит совместное представление датировок климатических изменений за исследуемый промежуток времени. Подобное представление информации о палеоклимате позволит свести имеющиеся данные, полученные с помощью различных методов датирования разными исследователями в разных регионах, в форму, удобную как для дальнейшей автоматической обработки, так и для визуального восприятия. Реализация предложенного подхода позволит оценивать имеющиеся данные в совокупности, что повысит обоснованность и достоверность выносимых суждений.

Заключение

В статье описан метод совместного представления датировок ископаемых объектов, позволяющий свести разрозненные данные о климате прошедших эпох во временной ряд с периодом дискретизации 100 лет, отражающий происходившие качественные изменения.

Научная новизна предложенного метода заключается в возможности совместного рассмотрения датировок ископаемых объектов, содержащих информацию и о характеристиках климата эпохи своего существования.

Объективность получаемых результатов основывается на использовании множества независимых датировок ископаемых объектов, полученных различными методами для различных периодов и регионов.

Метод разработан на основании данных об увлажненности регионов, взятых из случайной выборки статей, в которых в основном представлены результаты исследований ископаемой пыльцы растений. Возможно также исследование и датировок температуры. Кроме того, вместо возрастания (убывания) увлажненности (повышения (понижения) температуры) можно рассматривать произрастание в регионе выбранных растений (например, сосны или дуба), что позволит оценить количественные характеристики увлажнения или температуры.

Достоверность полученных результатов будет возрастать с увеличением числа привлеченных к анализу датировок. При этом также возможно проведение дифференцированного исследования по регионам и последующее сопоставление

полученных результатов с целью подтверждения (опровержения) гипотезы об односторонности изменений климата в прошлом в разных регионах планеты. Выявляемые в процессе исследования несоответствия, возможно, помогут оценить существующие датировки с точки зрения их достоверности.

Список литературы

1. *Епимахов А.В.* Радиоуглеродная хронология бакальской культуры / В сб.: Проблемы бакальской культуры. Челябинск: ООО «ЦИКР «Рифей», 2008. 164 с.
2. *Соломина О.Н.* Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 272 с.
3. Изменение климата. Информационный бюллетень. 2019. № 81 (октябрь — ноябрь). URL: http://www.meteorf.ru/upload/iblock/e38/Izmenenie_klimata_N81_OctNov_2019.pdf (дата обращения 18.05.2020).
4. *Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е.* и др. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. 500-летняя хронология аномальных явлений в природе и социуме Сибири и Монголии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. 383 с.

References

1. *Epimahov A.V.* Radiokarbonnaya hronologiya Bakalskoy kultury. Problemy Bakalskoy kultury. Radiocarbon chronology of Bakal culture. The problems of Bakal culture. Chelyabinsk: ООО «CIKR «Rifey», 2008: 164 p. [In Russian].
2. *Solomina O.N.* Gornoye oledeneniye Severnoy Evrazii v golocene. Mountain glaciation of Northern Eurasia in the Holocene. Moscow: Nauchny mir, 1999: 272 p. [In Russian].
3. *Izmeneniye klimata. Informatsionnyy byulleten.* Climate change. Newsletter. 2019, 81 (October – November). Available at: http://www.meteorf.ru/upload/iblock/e38/Izmenenie_klimata_N81_OctNov_2019.pdf (accessed: 18.05.2020). [In Russian].
4. *Levi K.G., Zadonina N.V., Berdnikova N.E.* et al. *Sovremennaya geodinamika i geliogeodinamika. 500-letnyaya hronologiya anomalnykh yavleniy v prirode i sociume Sibiri i Mongolii.* Modern geodynamics and heliogeophysical. 500-year chronology of anomalous phenomena in nature and society in Siberia and Mongolia. Irkutsk: Irkutsk GTU, 2003: 383 p. [In Russian].

Статья поступила 16.03.2020

Принята после доработки к публикации 21.05.2020

Сведения об авторе

Якушев Денис Игоревич, д-р техн. наук, профессор кафедры Специальных информационных технологий Санкт-Петербургского университета МВД России, d.i.ya@yandex.ru

Information about author

Yakushev Denis Igorevich, Grand PhD (Tech. Sci.), Saint-Petersburg Police University, Professor of the Special Information Technologies Department

doi 10.33933/2074-2762-2020-59-159-160

**К столетию со дня рождения Л.Т. Матвеева
(1920—2009)**



18 августа 2020 г. исполняется 100 лет со дня рождения известного ученого-метеоролога, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, почетного профессора Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, доктора физико-математических наук, профессора Леонида Тихоновича Матвеева.

Л.Т. Матвеев родился в крестьянской семье, проживавшей в селе Хотавец Калининской области, недалеко от Рыбинского водохранилища. Окончил школу колхозной молодежи, а в 1938 г. педагогическое училище в г. Весьегонске, где получил первую в своей жизни квалификацию — учителя математики неполной средней школы. Поскольку уже в этом возрасте у него проявились недюжинные математические способности, сразу после выпуска он был направлен в Москву для продолжения образования в Московском государственном педагогическом институте им. В.И. Ленина.

Продолжить учебу и получить специальность математика ему помешала Великая Отечественная война. Он был направлен в составе студенческого отряда для строительства укреплений в прифронтовую полосу, где он не только активно работал, но и принял участие в боевых действиях по ликвидации десанта противника в районе Каширы. За участие в обороне Москвы он был награжден медалью «За оборону Москвы».

В сентябре 1941 г. Л.Т. Матвеев был направлен на обучение в Высший военный гидрометеорологический институт Красной Армии (ВВГМИ КА) — один из исторических предшественников РГГМУ и факультета сбора и обработки информации (изначально метеорологического факультета) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского — для ускоренного овладения крайне востребованной в военное время специальностью метеоролога. Именно с этого момента судьба навсегда связала его с метеорологией. Весной 1944 г. Леонид Тихонович окончил ВВГМИ КА с отличием. В последующие годы (в общей сложности 65 лет) он активно работал в вузах метеорологического профиля: 28 лет в должности начальника (заведующего) кафедр ВВГМИ КА, ВГМФ СА, ВКА им. А.Ф. Можайского (ЛВВИА им. А.Ф. Можайского), а затем 15 лет в РГГМУ (ЛГМИ). В 1947 г. он защитил кандидатскую диссертацию в ЛГМИ, а в 1959 г. — докторскую диссертацию в Гидрометцентре СССР.

За годы своей многолетней успешной работы Л.Т. Матвеев создал научную школу по направлению «Динамика облаков и осадков» и участвовал в становлении научных школ по другим актуальным направлениям фундаментальной и прикладной гидрометеорологии, подготовил шесть учебников, один из которых — «Физика атмосферы» — выдержал пять изданий и переведен на пять иностранных языков. Список его научных трудов насчитывает более 200 наименований (первая его работа была опубликована в 1947 г. в журнале «Метеорология и гидрология»). Леонид Тихонович подготовил 43 кандидата наук, семь из которых в дальнейшем под его руководством стали докторами наук. В 1960 г. он стал профессором, а в 1973 г. ему было присвоено звание Заслуженный деятель науки РСФСР. С 1995 г. он являлся почетным профессором Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. В 1951 г. он был награжден медалью «За боевые заслуги», а в 1956 г. — орденом Красной Звезды.

Леонида Тихоновича отличали скромность, простота в общении, высокая культура, чуткое и внимательное отношение к людям. Он снискал заслуженный авторитет и искреннее уважение со стороны всех, кто его знал, работал или общался с ним. Везде, где он работал, коллеги и сослуживцы любили его и высоко ценили его человеческие качества. Он оставил о себе добрую и светлую память.

Леонид Тихонович проявлял высокий профессионализм, глубокую преданность науке, творческую энергию, завидную работоспособность и эрудицию. Он является ярким примером служения Родине. Его книги и публикации по различным проблемам метеорологии вызывали и вызывают неиссякаемый читательский интерес как в нашей стране, так и за рубежом.

Светлая память о Леониде Тихоновиче Матвееве навсегда сохранится в наших сердцах.

*Коллеги, друзья, ученики
(сотрудники ВКА им. Можайского и РГГМУ)*

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 59

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Подписано в печать 30.06.2020. Формат 70×100 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,1625. Тираж 500 экз. Заказ № 950.
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
