

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 68

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года

Выходит 4 раза в год

ISSN 2713-3001

Санкт-Петербург
РГГМУ
2022

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

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

Редакционный совет:

Чилингаров А. Н., д-р геогр. наук, проф., член-корр. РАН, президент РГГМУ — *председатель совета*

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

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

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79. Тел.: (812) 633-01-88 (доб. 421), e-mail: rio@rshu.ru.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2022

© Авторы публикаций, 2022

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

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

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

№ 68

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2713-3001

St. Petersburg
RSHU
2022

UDC 001(051.2)«540.1»
LBC 72я5

Hydrometeorology and Ecology. No. 68. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2022. 130 p.

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

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

The Editorial Board:

Chilingarov A. N., Grand PhD in Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of RSHU — *Chairman*

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

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

Agafonov G. I., Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, Board Chairman of "Pigment" holding company; **Fedorov M. P.**, Grand PhD in Engineering, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Henry de Lumley**, PhD, Professor, Corresponding Member of the Academy of Sciences, France; **Huaqing Lu**, PhD, Professor, Vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Kambo-lov M. A.**, PhD in Juridical Sciences, Vice-president of the National Research Center «Kurchatov Institute»; **Kuleshov Iu. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Vice-president of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research; **Kvint V. L.**, Grand PhD in Economics, Professor, leading researcher of the RAS Central Economic and Mathematical Institute; **Leal W.**, PhD, Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (UK); **Malaurie Jean**, PhD, Professor, Honorary President of RSHU, France; **Otryshchenko A. S.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Department at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Salnikov V. G.**, Grand PhD in Geography, Professor, Dean of Geography and Natural Management Faculty of Al-Farabi Kazakh National University; **Silnikov M. V.**, Grand PhD in Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Military-Technical Education and Security Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; **Timo-feeva A. G.**, PhD in Geography, Director of the Institute of permanent education RSHU.

Editors:

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

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

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

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

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

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

Certificate ПИ № ФС77-79574 of November 11, 2020.

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

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

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

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

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

Editorial Office address: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia. Phone: (812) 633-01-88 (421), e-mail: rio@rshu.ru.

Содержание

Метеорология

- Н. В. Двоеглазова, Б. В. Чубаренко.* О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области) 407

Гидрология

- И. Л. Калюжный.* Особенности испарения со снега при снегонакоплении и снеготаянии 422
- В. А. Лобанов, Н. И. Горошкова, А. В. Стриженок, Д. А. Семенова.* Влияние изменения климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры 435
- А. Р. Магеррамова.* Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков рек Азербайджана 453

Океанология

- В. Н. Малинин, М. А. Смирнов.* Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание 463
- А. А. Малышева, Т. В. Белоненко, Д. А. Яковлева.* Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс 478

Экология

- Д. С. Гальченко, Л. И. Соколова, В. В. Ткачев, Н. П. Шапкин, В. И. Разов, Я. Ю. Блиновская.* Исследование механизма сорбции антибиотиков природными алюмосиликатами методами спектроскопии 494

Геоинформатика

- С. И. Биденко, И. С. Храмов, А. А. Бенгерт, И. С. Мучкаева.* Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) 508

Хроника

- Памяти В. Н. Воробьева 525
- Памяти М. Г. Лазара 527

Contents

Meteorology

- N. V. Dvoeglazova, B. V. Chubarenko.* On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast) . . . 407

Hydrology

- I. L. Kalyuzhny.* Specific features of evaporation from the snow cover under snow accumulation and snow melting 422
- V. A. Lobanov, N. I. Goroshkova, A. V. Strizhenok, D. A. Semenova.* Impact of climate change on extreme hydrological characteristics in the Pechora river basin 435
- A. R. Maharramova.* Calculation of the maximum water discharges of flood in Azerbaijan rivers. 453

Oceanology

- V. N. Malinin, M. A. Smirnov.* Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean 463
- A. A. Malysheva, T. V. Belonenko, D. A. Iakovleva.* Characteristics of two eddies of different polarity in the Agulhas Current 478

Ecology

- D. S. Gal'chenko, L. I. Sokolova, V. V. Tkachev, N. P. Shapkin, V. I. Razov, Ya. Yu. Blinovskaya.* Antibiotic sorption mechanism investigation by natural aluminosilicates by spectroscopy methods. 494

Geoinformatics

- S. I. Bidenko, I. S. Khramov, A. A. Bengert, I. S. Muchkaeva.* Geoinformation procedure for assessing the regional situation on the basis of operational ANN-analysis of hydrometeorological and environmental information (on the example of the Ob Bay) 509

- Chronicle.** 525

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 407—421.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):407—421.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.55(470.26)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421

О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области)

Надежда Вадимовна Двоглазова^{1, 2}, Борис Валентинович Чубаренко¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, chuboris@mail.ru

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, nadya2eyes@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены способы представления ряда векторных величин в виде одного вектора, характеризующего весь ряд: мода, результирующий и средний вектора, а также введенные в статье «репрезентативный» и «типичный» вектора. На примере данных о ветре в г. Балтийск при использовании критерия сонаправленности векторов показано, что каждый из способов подходит для решения определенных задач: результирующий или средний вектора — для характеристики переноса; мода, если применять ее оценку покомпонентно, может давать неоднозначный и непредставительный для всего ряда результат; «репрезентативный» и «типичный» вектора — лучше всего подходят для поиска вектора, наиболее характерного для ряда.

Ключевые слова: направление и скорость ветра, векторное осреднение, Балтика, Калининградская область.

Благодарности. Работа подготовлена в рамках выполнения темы № FMWE-2021-0012 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Авторы благодарят своего коллегу А. В. Килесо за полезные советы и содействие в практической части работы. Авторы также искренне благодарны двум анонимным рецензентам, привлеченным редакцией, за их критику и замечания, т. к. это позволило существенно улучшить содержание и стиль подачи материала.

Для цитирования: Двоглазова Н. В., Чубаренко Б. В. О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 407—421. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.

METEOROLOGY

Original article

On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast)

Nadezhda Vadimovna Dvoeglazova^{1, 2}, Boris Valentinovich Chubarenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, chuboris@mail.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, nadya2eyes@mail.ru

Summary. The paper discusses options for representing a series of vectors as a unit vector that describes the entire series as a whole. The following options were studied: the “mode”, “progressive” and “average”

vectors, as well as the “representative” and “typical” vectors introduced in the paper. The example of wind data in the town of Baltiysk for the period 1 January 2022 — 2 February 2022 was used. The criterion of co-direction of vectors based on maximum scalar product of vectors was introduced to compare the mentioned above options. A numerical comparison of the results (the value of criterion) allowed to reveal the difference between all the considered options and the possibility for them to be applied for a certain class of physical problems. The methods for calculating the “representative” and “typical” vector appeared to be the best to characterize the vector series. To optimally represent the series by one vector included in the series, a “typical” vector should be used. “Progressive” or “average” vectors characterize the transport problem. The “mode” when used separately for direction and velocity often gives ambiguous result, being unrepresentative for the entire series.

Keywords: wind direction and speed, vector’ averaging, Baltic, Kaliningrad Oblast.

Acknowledgments. The work has been prepared within the theme FMWE-2021-0012 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The authors are grateful to their colleague Alexander Kileso for the useful advice and assistance in the practical part of the study. The authors are also sincerely grateful to two anonymous reviewers involved by the editors for their criticism and comments, as it allowed to improve significantly the content and style of presentation of the material.

For citation: Dvoeglazova N. V., Chubarenko B. V. On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):407—421. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.

Введение

Многие физические величины в метеорологии или океанологии являются векторными. Например, скорости течения в какой-то точке природного водоема или скорости ветра в какой-то точке над поверхностью воды или суши. При рассмотрении временной серии такой величины для некоторого отрезка времени (обычно рассматриваются серии с фиксированным шагом по времени) возникает необходимость описания такой упорядоченной группы векторных величин (т. е. выборки векторов) какой-то единой характеристикой по аналогии со стандартными статистиками для скалярных величин (среднее, мода и пр.) [1, 2].

Основные расчетные методики осреднения величин геофизических характеристик подробно описаны в [2, 3], где отдельные разделы посвящены обработке векторных величин, но не всегда обсуждается самый первый шаг — поиск среднего или характерного значения векторной величины на определенном временном интервале.

Для стандартных метеорологических наблюдений автоматически делается осреднение показаний по направлению и скорости ветра за 10 мин, предшествующих сроку наблюдения (<http://method.meteorf.ru/ansambl/pojasnenijaansambl.html> и [4, 5]). Осреднение для характеристик ветра всегда применяется в измерительных приборах, где шаг считывания измеряемых характеристик составляет доли секунды, а формируемый на базе скользящего осреднения ряд (<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725075.htm>) стандартно имеет шаг 2 мин. В отдельных инициативных разработках (<https://habr.com/ru/post/423243/>) применяется векторное осреднение для всех зафиксированных за 2 мин значений скорости ветра.

Если применять аналогичный подход для более длительных интервалов времени (например, сутки), то можно получить парадоксальный результат, когда векторное осреднение может дать близкую к нулю скорость ветра, в то время как в течение дня ветер все время был достаточно интенсивный, и дать направление

ветра, которое вообще не реализовывалось в течение дня. То есть в результате попытки такого сжатия информации и замены суточного ряда векторов ветра одной характеристикой, получается полная потеря информации, т. к. результат не представителен для всего ряда.

Целью работы является сравнительный анализ вариантов представления выборки векторов (на примере данных о ветре) в виде одного вектора, описывающего всю выборку в целом. Это важно, например, для решения практического вопроса — как наиболее правдоподобно единой величиной описать ветровую ситуацию для суток, недели и месяца, имея исходные данные стандартных метеорологических наблюдений (4 или 8 раз в сутки).

Настоящая работа не претендует на новый в векторной алгебре результат, базируется на известных подходах, не ставит целью дополнение существующих в метеорологии стандартов (отечественных и международных). Она предназначена больше для практиков, организующих так называемые волонтерские измерения на уровне школ, кружков, музеев¹ и пр., а также и коллегам, сталкивающимся с аналогичной проблемой — как описать ветер на временном интервале с помощью одной (векторной) величины.

Исходные данные и методика их обработки

Все обсуждения приведены применительно к данным о ветре, полученным за стандартные сроки наблюдений (8 сроков в сутки) безотносительно к тому, что эти данные также рассчитаны простым осреднением данных прямых инструментальных измерений за более короткие интервалы времени (10 мин). Основным источником данных — сайт gr5.ru с данными лицензированной гидрометеорологической кампании (ООО) «Расписание Погоды» (Санкт-Петербург, Россия), который содержит данные о фактической погоде, наблюдаемой на наземных станциях с 2004 г. Данные наблюдений поступают на сайт восемь раз в сутки, через каждые три часа: как правило, к 0:30, 3:30, 6:30, 9:30, 12:30, 15:30, 18:30 и 21:30 UTC [6].

Задание векторов ветра в системах координат

Исходные данные для вектора ветра задаются в виде длины и направления. За длину вектора принимается его скорость (в м/с). Направление определяется согласно румбу [3, 5], то есть углу, который образуется вектором скорости ветра и меридианом (север принимается за 360° или 0° , восток за 90° , юг — за 180° , запад — за 270°) [3]. Направление ветра традиционно [7, 8] представляется в форме «откуда дует» или «в компас»² (рис. 1 а), характеризуется углом γ_{wind}

¹ Именно с этой целевой аудиторией связаны, возможно, излишне подробные пояснения и формулы, которые могут показаться очевидными.

² В гидрологии вектор скорости течения, наоборот, традиционно задается (как и в математике) направленным отрезком, откладываемым от начала координат, т. е. «из компаса» (рис. 1 а, вектор изображен пунктиром), но направление по-прежнему отсчитывается (как и азимут) в градусах, по часовой стрелке от направления на север (в пределах от 0° до 360° , северному направлению приписывается значение 0°).

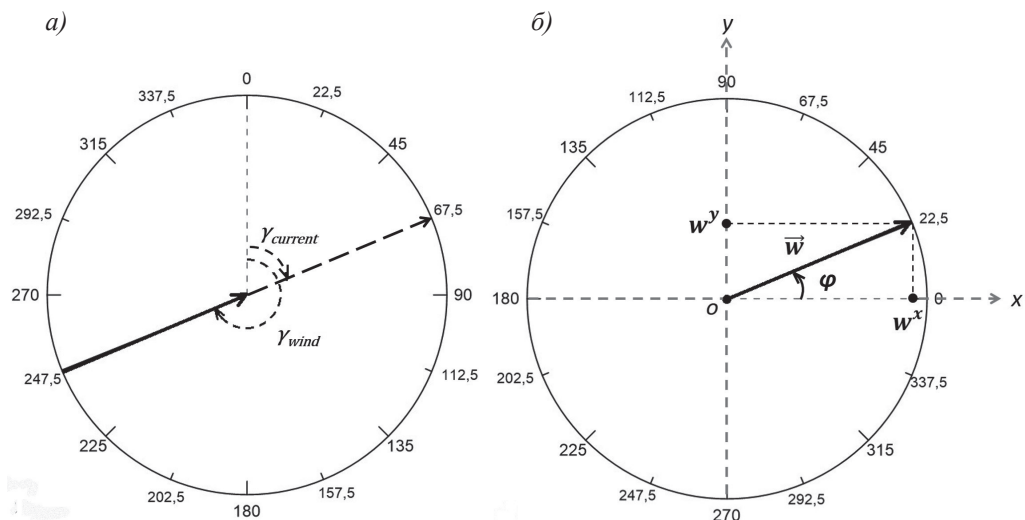


Рис. 1. Геометрическое представление:

a) ветра, дующего с запада-юго-запада (направление — γ_{wind}) (ЗЮЗ ветер, сплошная стрелка) и направления течения ($\gamma_{current}$) (БСВ течение, пунктирная стрелка), отсчитываемых от северного направления; *б)* вектора \vec{w} в ортогональной системе координат, соответствующему и ветру, дующему с запада-юго-запада, и течению, направленному на восток-северо-восток, угол φ отсчитывается против часовой стрелки от оси Ox , (w^x ; w^y) — компоненты вектора в этой системе координат.

Fig. 1. Geometrical representation of:

a) the wind blowing from the west-south-west (direction of γ_{wind}) (WSW wind, solid arrow) and direction of current ($\gamma_{current}$) (ENW current, dotted arrow) counted from the north direction; *б)* the vector \vec{w} in the orthogonal system coordinates represents the wind blowing from the west-southwest and current directed to the east-northeast, the angle φ is measured counterclockwise from the Ox axis, (w^x ; w^y) — vector's components in this coordinate system.

отсчитываемым в градусах по часовой стрелке от направления на север (в пределах от 0° до 360° , а северному направлению приписывается значение 0°). Например, западно-юго-западный ветер дует с запада-юго-запада на восток-северо-восток, поэтому угол равен $247,5^\circ$.

Для применения любых математических формул векторной алгебры необходим перевод векторов ветра или течений в привычную ортогональную систему координат, в которой вектор откладывается от начала координат, а его направление задается углом φ , измеряемом в радианах и отсчитываемом от положительного направления оси Ox в сторону положительного направления оси Oy (рис. 1 б).

Связь между углами (в градусах) задается формулами (1) и (2):

$$\varphi = 90^\circ - (\gamma_{wind} - 180^\circ) = 270^\circ - \gamma_{wind}, \quad (1)$$

$$\varphi = 90^\circ - \gamma_{current}, \quad (2)$$

где γ_{wind} и $\gamma_{current}$ — углы, отсчитываемые от северного направления; φ — угол, отсчитываемый от положительного направления оси Ox .

Проекции (координаты) вектора в ортогональной системе координат (w^x, w^y) вычисляются по формулам (3)—(4) и представляют собой произведение длины вектора (его модуля) на косинус / синус¹ угла φ :

$$w^x = w \cdot \cos(\varphi), \quad (3)$$

$$w^y = w \cdot \sin(\varphi), \quad (4)$$

где w — длина вектора (например, скорость ветра в м/с); φ — угол между направлением вектора и направлением оси ОХ; w^x и w^y — проекции вектора w на ось ОХ и ОУ.

В случае обратного преобразования, когда известны его проекции, модуль вектора рассчитывается по теореме Пифагора (квадратный корень из суммы квадратов проекций), а вычисление значения угла выполняется через функцию арктангенс для этих величин (w^x, w^y). При отрицательном значении угла, полученном при применении функции арктангенс, к полученному значению угла нужно прибавить 360° .

Характерные значения вектора ветра на временном интервале

Для поиска наиболее характерного значения вектора ветра на временном интервале, например, за сутки или несколько суток, могут быть использованы различные подходы.

Мода. В качестве такого характерного значения может использоваться обыкновенная мода, соответствующая алгоритму расчета моды в математической статистике для скалярных величин [2], которая описывает наиболее вероятное значение из группы. Соответственно, вектор, характеризующий моду из группы векторов, имеет координаты, вычисляемые по принципу наиболее часто повторяющегося значения (или, что то же самое – наибольшей продолжительности для ряда регулярных значений, заданных с некоторым интервалом времени) – отдельно для скорости ветра и для его направления.

Результирующий вектор — вектор, являющийся результатом векторного сложения всех векторов группы. Методика его расчета заключается в вычислении алгебраических проекций (рис. 2) векторов заданного ряда на оси ОХ и ОУ ортогональной системы координат. Суммарные величине полученных проекций и будут представлять собой проекции результирующего вектора на оси координат (например, в случае восьми векторов ветра за сутки):

$$\begin{aligned} W^x &= w_1^x + w_2^x \dots + w_8^x, \\ W^y &= w_1^y + w_2^y \dots + w_8^y, \end{aligned} \quad (5)$$

где W^x — проекция результирующего вектора на ось ОХ; w_i^x — значение проекций отдельных векторов на ось ОХ ($i = 1 \div 8$); W^y — проекция результирующего вектора на ось у ОУ; w_i^y — значение проекций отдельных векторов на ось ОУ ($i = 1 \div 8$).

Средний вектор вычисляется делением значения результирующего вектора на количество векторов в исходной группе (6):

¹ Для применения формул в Excel полученное значение угла φ нужно не забыть перевести в радианы.

$$W_{cp}^x = \frac{w_1^x + w_2^x \dots + w_8^x}{n},$$

$$W_{cp}^y = \frac{w_1^y + w_2^y \dots + w_8^y}{n}, \tag{6}$$

где W_{cp}^x и W_{cp}^y — проекции среднего вектора на ось ОХ и ОУ, w_i^x и w_i^y — аналогично (5). Средний и результирующий вектора совпадают по направлению, причем, это направление может не встречаться в группе исходных векторов.

«Репрезентативным» вектором назовем такой, который имеет направление результирующего (или среднего) вектора, но его абсолютная величина равна арифметическому среднему абсолютных величин (модулей) всех векторов в группе, то есть модуль принимается равным среднему значению модуля векторов выборки:

$$v_{cp} = \frac{v_1 + v_2 \dots + v_n}{n}, \tag{7}$$

где v_{cp} — значение средней скорости ветра (м/с); v_1, v_2 и т.д. — значения скорости ветра в стандартные сроки (м/с); n — количество значений (равно 8 в случае для суточной средней скорости и стандартных сроков наблюдений каждые 3 часа).

«Типичным» вектором будем считать такой вектор, модуль которого принимается равным среднему арифметическому значению для модулей всех векторов

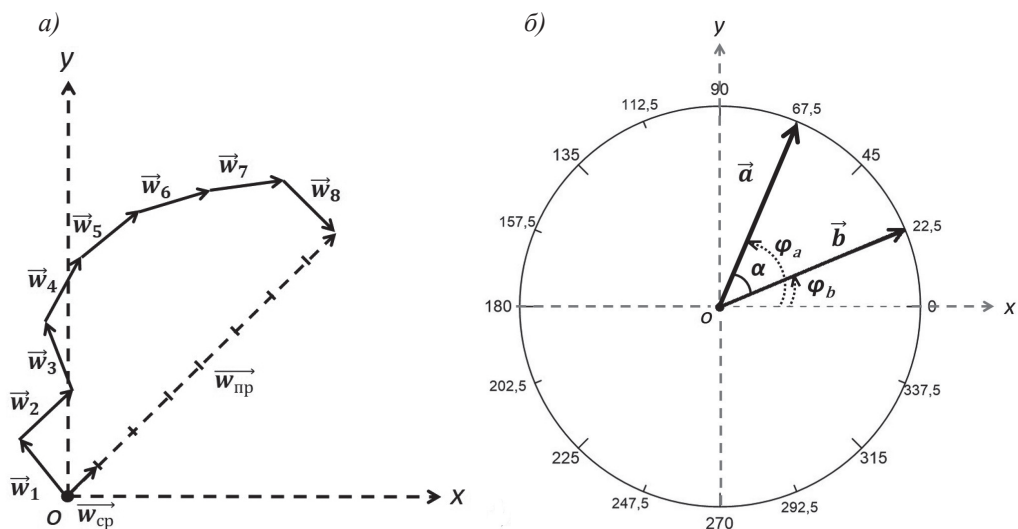


Рис. 2. Результирующий ($\overline{w_{np}}$) и средний ($\overline{w_{cp}}$) вектора (а), графическое представление элементов для расчета скалярного произведения (б).

Fig. 2. Progressive ($\overline{w_{np}}$) and average ($\overline{w_{cp}}$) vectors (а), graphical representation of elements for calculating the scalar product (б).

выборки, т. е. согласно (7), а его направление — это направление как минимум одного вектора из представленной выборки. Но как из группы векторов выбрать вектор, который наиболее сонаправлен всем остальным?

Для поиска направления такого «типичного» вектора (т. е. типичного среди исходных) используем свойство скалярного произведения двух векторов — чем более они сонаправлены, тем больше величина скалярного произведения единичных векторов, имеющих то же направление. Детали представлены в следующем разделе.

Критерий сонаправленности векторов

Предлагается применить *критерий сонаправленности векторов*, величина которого равна максимуму суммы попарных скалярных произведений. Поскольку речь идет о направлениях, то скалярно перемножаются единичные вектора, соответствующие направлениям векторов выборки.

Первым этапом является расчет по формуле (8) попарных скалярных произведений единичных векторов, произведения которых равны косинусам углов α (рис. 2 б) между этими векторами:

$$P_{ab} = \cos \alpha = \cos(\varphi_b - \varphi_a), \quad (8)$$

где P_{ab} — значение скалярного произведения двух векторов (рис. 2 б); φ_a и φ_b — направление этих векторов в ортогональной системе координат, причем порядок не важен, т. к. функция косинуса — четная функция.

В результате получается набор скалярных величин в диапазоне $[-1, 1]$, который может быть представлен в виде таблицы, симметричной относительно главной диагонали (табл. 1). Складывая полученные величины, например, по столбцам, получаем их суммы (в диапазоне $[-8, 8]$ в случае восьми векторов в выборке), характеризующие сонаправленность вектора данного направления с остальными векторами.

Таблица 1

Пример применения методики расчета «типичного» вектора для восьми векторов ветра, измеренных каждые 3 часа в интервале 02:00—23:00

An example of the application of the methodology for calculating the “typical” vector for 8 wind vectors measured every 3 hours in the interval 02:00—23:00

Время	Направление ветра, рад.	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
		0	0	0	0	0,393	0,785	0,785	0,393
2:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
5:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
8:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
11:00	0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,71	0,71	0,92
14:00	0,393	0,92	0,92	0,92	0,92	1,00	0,92	0,92	1,00
17:00	0,785	0,71	0,71	0,71	0,71	0,92	1,00	1,00	0,92

Время	Направление ветра, рад.	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
			0	0	0	0	0,393	0,785	0,785
20:00	0,785	0,71	0,71	0,71	0,71	0,92	1,00	1,00	0,92
23:00	0,393	0,92	0,92	0,92	0,92	1,00	0,92	0,92	1,00
	Сумма	7,26	7,26	7,26	7,26	7,54	6,68	6,68	7,54

Максимальная сумма по столбцу будет у того вектора, направление которого является наиболее близким ко всем остальным векторам в анализируемой выборке. Согласно примеру (табл. 1), таким «типичным» направлением ветра среди восьми измерений, полученных в течение суток, является направление 0,393 рад. (22,5°, согласно математической системе координат, и 67,5°, согласно географической системе), зафиксированное дважды за сутки: в 14:00 и в 23:00.

Представленный пример показал, что применение этого критерия может давать неоднозначный результат.

Результаты

Результаты применения изложенных методов даны на примере данных для пункта Балтийск в Калининградской области. Взят период¹ 01.01.2022 г. — 02.02.2022 г. (рисунки 3—6), характеризующийся сильной штормовой активностью (порывы до 26 м/с). В рамках этого периода были выбраны две даты (14 и 30.01.2022 г.), в которые ветер оставался достаточно сильным и менялся в пределах 45—67,5° (рис. 4). Также отдельно анализировались недельные серии, содержащие эти даты (11—17.01.2022 г. и 27.01—02.02.2022 г.) (рис. 5), а также весь месяц в целом (01.01.2022 г. — 02.02.2022 г.) (рис. 6).

Значения характерных векторов (мода, средний вектор, «репрезентативный», «типичный» вектора) были рассчитаны для каждого дня периода 01.01.22—02.02.22 (обозначены соответственно 1, 2, 3, 4 на рисунках 4—6). То, насколько полученные характерные вектора представительны для выборки за соответствующий период, оценивалось визуально (рисунки 4—6) и на основе числового критерия сонаправленности векторов (максимума скалярного произведения, раздел «Критерий сонаправленности векторов»).

Критерий сонаправленности (в одноименном разделе) оценивался с точностью до сотых (табл. 2), т. к. степень округления величин критерия для маленькой выборки должна быть выбрана такой, чтобы величины критерия различались, и можно было однозначно выбрать преимущественное направление.

Пример двух суток с максимальными ветрами (14.01.2022 г. и 30.01.2022 г.) показал (рис. 4), что усреднение по принципу моды выбирает крайние вектора из выборки, явно ее не характеризующие, и дает неоднозначный результат (рис. 4, табл. 2).

¹ Авторы уверены, что полученные для такого ряда оценки уже иллюстрируют общие тенденции, хотя, конечно, их следует проверить на других выборках (другие даты, другие сезоны и пр.).



Рис. 3. Ветер в период с 01.01.2022 г. по 02.02.2022 г. в г. Балтийске (Калининградская обл.).

Fig. 3. Wind for the period 01.01.2022 — 02.02.2022 in Baltiysk (Kaliningrad Oblast).

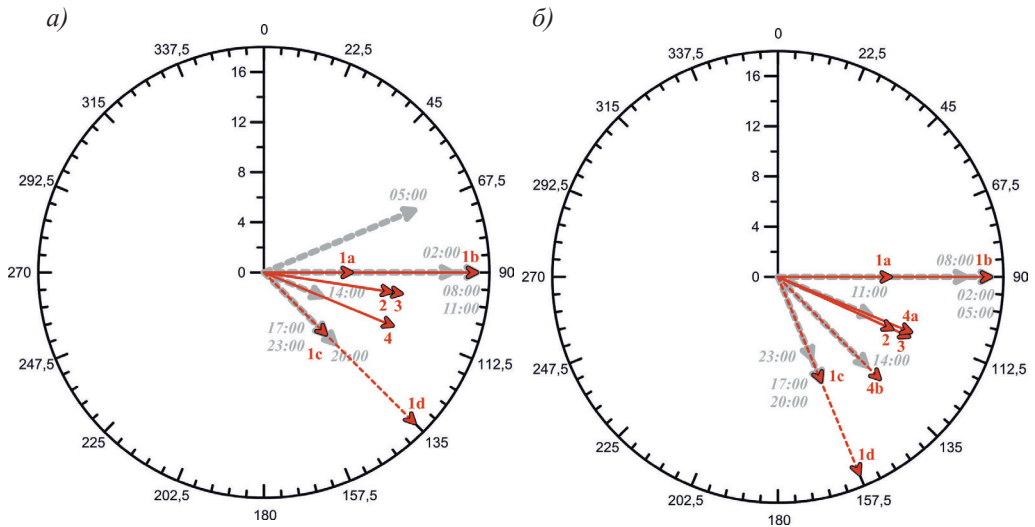


Рис. 4. Графическое изображение суточной ветровой активности 14.01.2022 г. (а) и 30.01.2022 г. (б):

исходные измерения (8 раз в сутки, местное время указано для иллюстрации повторяющихся значений) — серым цветом, мода (1a, 1b, 1c, 1d), средний (2), «репрезентативный» (3), «типичный» (4, 4a, 4b).

Fig. 4. Graphical representation of daily wind activity on 01.14.2022 (a) and 01.30.2022 (б):

original measurements (8 times a day, local time is provided to illustrate repetitive values) — in gray, mode (1a, 1b, 1c, 1d), average (2), “representative” (3) and “typical” (4, 4a, 4b).

Оказалось, что «репрезентативный» вектор по модулю всегда больше, чем средний (рисунки 4—6), и визуально более точно представляет модули векторов совокупности. Что касается направления этих векторов (которые совпадают по методике расчета), то, как показал этот пример, оно находится в самой «гуще» пучка исходных векторов, т. е. хорошо описывает множество имеющихся векторов.

Таблица 2

Суммарные значения парных скалярных произведений для характерных векторов (мода, средний, «репрезентативный» и «типичный») для 01.01.2022—02.02.2022

Total values of paired scalar products between the characteristics vectors (mode, average, progressive, “representative” and “typical”) for 01.01.2022 to 02.02.2022

Дата	Мода*		Средний / «репрезентативный»	«Типичный»
01.01.2022	3,69	5,32	5,34**	5,32
02.01.2022	6,54	6,54	6,84	6,89
03.01.2022	7,01	7,01	7,30	7,25
04.01.2022	7,70	7,70	7,84	7,70
05.01.2022	7,26	7,26	7,28	7,26
06.01.2022	6,85	6,85	6,74	6,85
07.01.2022	5,72	5,72	6,82	6,68
08.01.2022	7,92	7,92	7,93	7,92
09.01.2022	3,41	6,13	5,95	6,17
10.01.2022	7,48	7,48	7,56	7,48
11.01.2022	7,34	7,34	7,10	7,34
12.01.2022	6,26	6,26	6,84	7,00
13.01.2022	7,41	7,41	7,54	7,41
14.01.2022	6,43	6,97	7,21	7,25
15.01.2022	7,40	7,40	7,44	7,40
16.01.2022	7,23	7,23	7,42	7,33
17.01.2022	5,77	6,48	6,36	6,48
18.01.2022	5,32	5,32	6,35	6,28
19.01.2022	7,48	7,48	7,56	7,48
20.01.2022	5,55	5,55	6,45	6,40
21.01.2022	7,77	7,77	7,86	7,77
22.01.2022	6,48	6,48	6,49	6,48
23.01.2022	2,41	3,25	3,25	3,25
24.01.2022	7,48	7,48	7,47	7,48
25.01.2022	4,72	6,03	6,31	6,57
26.01.2022	6,86	6,86	6,84	6,86
27.01.2022	6,50	6,50	7,18	6,75
28.01.2022	5,63	5,63	5,94	6,00
29.01.2022	5,85	5,85	5,91	5,85
30.01.2022	5,78	5,78	6,86	6,82
31.01.2022	7,70	7,70	7,85	7,70

Окончание табл. 2

Дата	Мода*		Средний / «репрезентативный»	«Типичный»
01.02.2022	2,23	2,23	4,72	4,59
02.02.2022	4,47	4,47	4,75	4,86
Сумма за весь период с 01.01—02.02.2022 г.	203,67	211,41	221,28	220,86
Сумма за 11—17.01.2022 г.	47,85	48,39	49,90	50,21
Сумма за 27.01—02.02.2022 г.	38,16	38,16	43,21	42,57

* Поскольку оценка критерия для моды не всегда дает единственное значение, указаны минимальное и максимальное из полученных.

** Жирным шрифтом выделены максимальные значения критерия сонаправленности векторов для данных суток.

Заливка серым — случаи, когда алгоритм поиска дал два вектора с одним и тем же значением критерия.

Метод расчета «типичного» вектора может давать неоднозначный результат: два вектора из группы могут иметь направления, для которых значение критерия сонаправленности будет максимальным (например, 04, 18, 30 и 31.01.2022 г., табл. 2). Поскольку эти направления, «равные» с точки зрения критерия сонаправленности, всегда будут на соседних румбах, то избавиться от полученной неоднозначности можно путем расчета среднего направления между ними. Значение критерия для этого направления станет наибольшим. Такое среднее направление повышает значение критерия для четырех перечисленных выше неоднозначных случаев: с 7,70 до 7,85 (04.01.2022), с 6,28 до 6,40 (18.01.2022), с 6,82 до 6,95 (30.01.2022) и с 7,70 до 7,85 (31.01.2022). Во всех четырех случаях критерий становится наибольшим в сравнении с остальными методами, а, следовательно, наиболее близко характеризующим вектора выборки. Но такое среднее направление уже становится расчетным, т. к. не присутствует в выборке.

Направление «типичного» вектора, как наилучшего среди имеющихся (а не расчетных) направлений, оказывается наиболее близким к направлению среднего / «репрезентативного» вектора.

Как для суточного, так и недельного периодов лучшими (согласно критерию сонаправленности векторов) оказывались направления либо среднего / «репрезентативного» вектора, либо «типичного» векторов. Например, для периода 11—17.01.2022 г. (рис. 5 а) максимальный суммарный критерий получился для «типичного» вектора, а для периода 27.01—02.02.2022 г. (рис. 5 б) — для среднего / «репрезентативного» вектора. Нужно сказать, что величины критерия для этих векторов в каждую неделю отличались незначительно (на 0,31—0,34 при округлении до сотых), но направления различались на угловую меру в пределах одного румба (рис. 5).

В целом за анализируемый период 01.01.2022 г. — 02.02.2022 г. максимальная величина суммарного критерия сонаправленности (табл. 2) получена для среднего / «репрезентативного» вектора (в 20-ти днях из 33-х). В остальных 12-ти днях — для «типичного» вектора. Из них лишь для пяти дней значения критерия совпадают с его значением для моды.

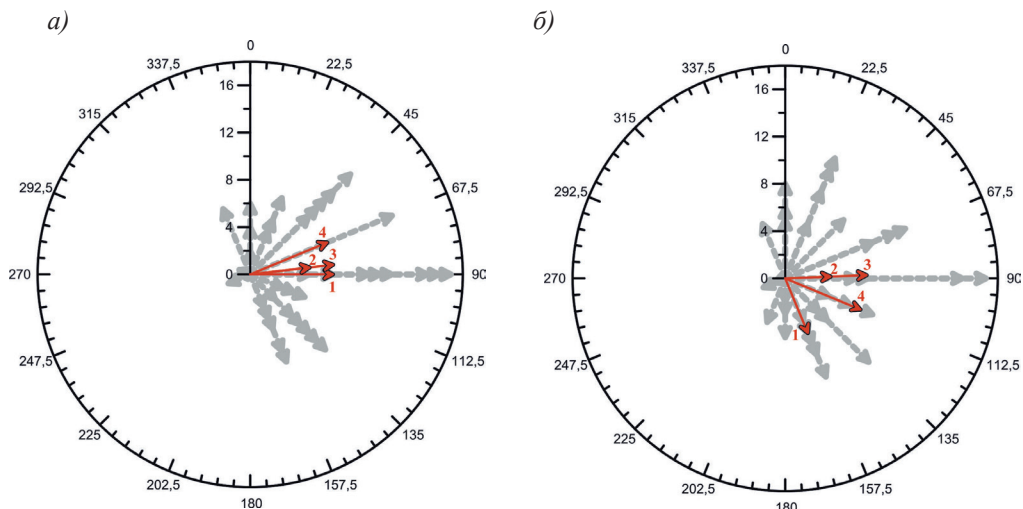


Рис. 5. Графическое изображение семидневной ветровой активности с 11 по 17.01.2022 г. (а) и с 27 января по 02 февраля 2022 г. (б):

исходные измерения (восемь раз в сутки, местное время для повторяющихся значений не указано, т. к. таковых слишком много) — серым цветом, мода (1), средний (2), «репрезентативный» (3), «типичный» (4).

Fig. 5. Graphical representation of the seven-day wind activity from 01.11.2022 to 01.17.2022 (a) and from 01.27.2022 to 02.02.2022 (б): original measurements (8 times a day, local time is not specified for duplicate values, because too many of those) — in gray, mode (1), average (2), “representative” (3), “typical” (4).

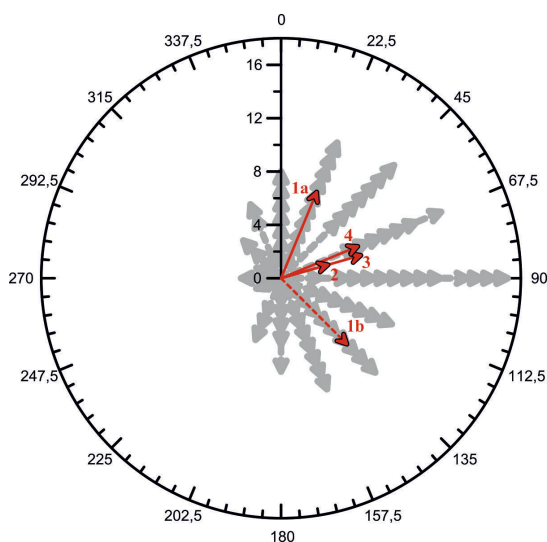


Рис. 6. Графическое представление векторов ветра, фиксируемых в течение месяца (с 1 января по 02 февраля 2022 г.): мода (1a, 1b), средний (2), «репрезентативный» (3), «типичный» (4).

Fig. 6. Graphical representation of wind vectors recorded during the month (from 01.01.2022 to 02.02.2022): mode (1a, 1b), average (2), “representative” (3), “typical” (4).

Обсуждение

Каждый из подходов для поиска характерного вектора для набора векторов (мода, средний вектор, «репрезентативный», «типичный» вектора) характеризуется своими плюсами и минусами.

Мода. Так как мода описывает наиболее часто встречающееся значение¹ (т. е. наиболее вероятное из представленных) из ряда скалярных величин, она может быть применима отдельно к величинам модуля вектора скорости и его направления. Естественно, нужно принимать во внимание количество членов ряда и подчиненность их значений нормальному распределению, чтобы получить статистически значимый результат (моду для восьми значений ветра в день технически выделить можно, но она не имеет статистического смысла). Вектор, для которого направление и величина являются отдельно модами для выборок направлений и скоростей не может быть «реальным» и, следовательно, трактоваться как представительный для данной выборки векторов.

Результирующий вектор дает информацию о «переносе» в результате реализации всей группы векторов. Он не характеризует индивидуальные вектора, присутствующие в выборке (вероятность того, что он может встретиться в имеющейся выборке, крайне мала), а характеризует всю группу в целом.

В результате расчета *среднего* вектора получается вектор, имеющий смысл математического среднего (векторное осреднение). Его направление совпадает с направлением результирующего вектора. Но основной недостаток заключается в том, что полученный средний вектор слабо соотносится с каждым из векторов выборки (зачастую не совпадает по направлению и по величине ни с одним из векторов группы).

Абсолютная величина *«репрезентативного»* вектора равна арифметическому среднему абсолютных модулей всех векторов в группе, что делает вектор более объективным (в отличие от результирующего и среднего векторов) с точки зрения представления модулей всех векторов выборки. К недостатку можно отнести то, что его направление в общем случае не совпадает ни с одним направлением, встречающимся в выборке (как и в случае с результирующим и средним векторами).

«Типичный» вектор. В качестве модуля для него используется среднее арифметическое из всех модулей векторов выборки, что делает его вполне представительным. Согласно методике расчета направление «типичного» вектора — это направление одного из векторов, присутствующих в выборке. Того, который наиболее «сонаправлен» со всеми векторами в выборке. То есть «типичный» вектор расположен в самой середине «пучка» всех векторов выборки. Выяснилось, что результат применения критерия сонаправленности векторов может дать два (и более) направления, в равной степени «сонаправленных» со всеми векторами выборки. Избавиться от неоднозначности можно расчетом среднего между этими направлениями.

¹ Следует иметь в виду, что значение моды для ряда, в котором какие-то значения не повторяются, не имеет смысла. Для выборки значений ветра за сутки (8 значений за сутки, 8 или 16 возможных румбов) такое вполне может быть.

Нами фактически рассмотрены разные комбинации схожих подходов в определении характерных направлений и модулей. Направления результирующего, среднего и «репрезентативного» векторов, а также модули для «репрезентативного» и «типичного» векторов — вычисляются одинаково.

Заключение

Результат применения моды для векторных характеристик нельзя назвать удачным, так как он может давать неоднозначный результат, величины которого могут сильно отличаться. Кроме того, в результате применения критерия сонаправленности векторов вектор-мода оказался в меньшей степени сонаправленным с реальными значениями ряда.

Результирующий и средний за любой период (масштаб «осреднения») вектор хорошо описывает процесс в целом, если только речь идет о задаче переноса, но не дает возможности получить вектор, характерный для всей выборки, т. е. совокупно характеризующий вектора, имеющиеся в выборке.

«Репрезентативный» вектор однозначно и хорошо (согласно критерию сонаправленности векторов) описывает направление и величины всего набора векторов в выборке.

«Типичный» вектор по определению имеет направление одного из векторов, присутствующих в выборке. Он также хорошо описывает направление и величины векторов в выборке. Критерий сонаправленности при этом может быть немного меньше, чем для среднего / «репрезентативного» вектора.

Проблемой может быть неоднозначность, когда «типичными» направлениями являются несколько направлений, встречающихся в выборке и доставляющих максимум критерию сонаправленности векторов. Избавиться от неоднозначности следует расчетом среднего между этими «типичными» направлениями. И такой «однозначно типичный» вектор уже доставляет абсолютный максимум критерию сонаправленности.

Именно методы расчета «представительного» и «типичного» векторов позволяют получить вектор, который может интегрально отразить группу векторов, т. е. максимально представить те направления и модули векторов, которые встречались в выборке.

Список источников

1. Балинова В. С. Статистика в вопросах и ответах: учеб. пособие. М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2004. 344 с.
2. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
3. Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. СПб.: РГГМУ, 1992. 96 с.
4. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.
5. Иванов В. А., Москальченко С. А. Метеорология и климатология: лаб. практикум для студентов. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. 110 с.
6. «Расписание погоды»: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rp5.ru> (дата обращения: 25.05.2022).

7. Полякова Л. С., Кашарин Д. В. Метеорология и климатология. Учебное пособие. Новочеркасск: НГМА, 2004. 107 с.
8. Васильев К. П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состоянии моря. Л.: Гидрометиздат, 1980. 230 с.

References

1. Balinova V. S. *Statistika v voprosah i otvetah: ucheb. posobie = Statistics in questions and answers: Study guide*. Moscow: Prospect, 2004: 344 p. (In Russ.).
2. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii. Uchebnik = Statistical methods of analysis of hydrometeorological information. Study guide*. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
3. Vainovsky P. A., Malinin V. N. *Metody obrabotki i analiza okeanologicheskoy informacii. Mnogomernyy analiz = Methods of processing and analysis of oceanological information. Multidimensional analysis*. St Petersburg: RSHU, 1992: 96 p. (In Russ.).
4. Khromov S. P., Mamontova L. I. *Meteorologicheskij slovar' = Meteorological dictionary*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974: 568 p. (In Russ.).
5. Ivanov V. A., Moskalchenko S. A. *Meteorologiya i klimatologiya: lab. praktikum dlia studentov = Meteorology and climatology: study guide for students*. Krasnoyarsk: Reshetnev SibGU, 2004: 110 p. (In Russ.).
6. «Raspisanie pogody» = «Weather schedule»: [Electronic resource]. Available at: <http://www.rp5.ru> (accessed 25.05.2022). (In Russ.).
7. Polyakova L. S., Kasharin D. V. *Meteorologiya i klimatologiya. Uchebnoe posobie = Meteorology and climatology. Study guide*. Novocherkassk: NGMA, 2004: 107 p. (In Russ.).
8. Vasiliev K. P. *Chto dolzhen znat' sudovoditel' o kartakh pogody i sostoyanii moray = What a boatmaster should know about weather maps and the state of the sea*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 230 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Двоеглазова Надежда Вадимовна, аспирант Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград); лаборант, лаборатория прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва), nadya2eyes@mail.ru.

Чубаренко Борис Валентинович, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией прибрежных систем Атлантического отделения (г. Калининград) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (г. Москва); chuboris@mail.ru.

Information about authors

Nadezhda V. Dvodeglazova, PhD student of Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad), assistant of the Laboratory of Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow), nadya2eyes@mail.ru.

Boris V. Chubarenko, PhD (Phys. and Math. Sci.), Head of the Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch (Kaliningrad) of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (Moscow), chuboris@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 02.06.2022.

Принята к публикации после доработки 30.08.2022.

The article was received on 02.06.2022.

The article was accepted after revision on 30.08.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 422—434.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):422—434.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.132.4
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-422-434

Особенности испарения со снега при снегонакоплении и снеготаянии

Игорь Леонидович Калюжный

Государственный гидрологический институт, СПб, Россия, hfl@mail.ru

Аннотация. Основным фактором испарения со снега в период снегонакопления является диффузионный перенос влаги, интенсивность которого обусловлена градиентом температуры в снеге, который уменьшается с увеличением толщины покрова. При высоте снега 30 см и больше, поток пара не выходит за пределы 0,01 мм/сутки и принимает нулевые значения. Коэффициент диффузии пара при температуре около 0 °С равен (8—9) 10^{-5} м²/с и с понижением температуры до –25 °С уменьшается до 3×10^{-5} м²/с. Весной, при изотермии в снежном покрове, диффузионный поток отсутствует. На кристаллах льда образуется пленка влаги. Ее испарения зависит от поглощенной солнечной радиации. При этом испаряется от 5—10 до 20—25 мм и больше влаги, что равно 85—95 % от испарения за зиму. Приведена методика восстановления пропусков в наблюдениях при неблагоприятных условиях погоды.

Ключевые слова: испарение со снега, диффузия водяного пара, снегонакопление, снеготаяние.

Для цитирования: Калюжный И. Л. Особенности испарения со снега при снегонакоплении и снеготаянии // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 422—434. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-422-434.

HYDROLOGY

Original article

Specific features of evaporation from the snow cover under snow accumulation and snow melting

Igor L. Kalyuzhny

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia, hfl@mail.ru

Summary. Based on the results of performed field studies and laboratory investigations, the processes of generating evaporation from the snow cover are determined for the periods of snow accumulation and snow melting. It is shown that diffusion flow of water vapour caused by temperature gradient within a snow mass is the main factor of generating evaporation during the snow accumulation period. Experiments for assessing water vapour diffusion from soil to snow mass and from snow mass to the atmosphere were performed

© Калюжный И. Л., 2022

at the Valdai Experimental Site. During the cold season, excluding the snow-melting period, water vapour flow from soil is equal to 0.577 mm, while the flow from the snow mass to the atmosphere amounts to 0.249 mm, i.e. twice as small. Water vapour diffusion flow from the snow mass to the atmosphere depends on snow cover thickness. Diffusion value (at maximum of 0.05 mm daily) strongly decreases with the increase in snow cover thickness up to 25—30 cm. At thickness value equal to 30 cm and more, diffusion does not exceed 0.01 mm daily and may take negative values. Coefficient of water vapour diffusion (D) within the snow mass was determined with the use of special crystallizer pan where convective move of vapour was completely absent. Dependence of coefficient D on average snow temperature is shown. Its maximal values are observed in near-freezing temperatures; D is equal to $(8-9) \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ at 0.5°C . Under temperature decrease up to -25°C , coefficient D decreases up to about $3.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. During the snow cover melting, temperature isothermy within the snow mass is observed; temperature gradient during this period is equal to zero. During the experiments performed at the Valdai Experimental Site the diffusion flow was equal to zero at snow cover temperature of about 0.6°C . The main factor becomes the heat inflow to the evaporating quasi-liquid film of water that generates at the surface of ice crystals during the snow melting. Dependence of evaporation intensity relation on absorbed solar radiation has been determined. In the absence of incoming solar radiation, small moisture losses for evaporation are caused by molecular diffusion of water vapour. It is shown that during the period of snow melting the amount of evaporated moisture varies from 5—10 mm to over 20—25 mm and more, which accounts to 85—95 % of evaporation value during the cold period. Unfavourable weather conditions do not provide information on observations of evaporation from the snow cover using standard evaporation gauge GGI 500-6. Methods for absent data recovery have been developed. The sum of observed and recovered values of evaporation is shown to have increased practically twice compared to the observed values.

Keywords: evaporation from the snow cover, water vapour diffusion, snow accumulation, snow cover melting.

For citation: Kalyuzhny I. L. Specific features of evaporation from the snow cover under snow accumulation and snow melting. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):422—434. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-422-434.

Введение

Важным звеном гидрологического цикла является испарение снежного покрова. На отдельных территориях в этот процесс вовлекается до 30 и больше миллиметров влаги и до 30 и более процентов поглощаемой солнечной энергии. Потери воды на испарение со снега обычно оцениваются инструментальным путем или расчетными методами. Методы расчета базируются либо на фундаментальных законах природы (метод теплового и водного баланса, турбулентной диффузии), либо на эмпирических формулах, параметры которых получены на основе инструментальных наблюдений. Конкретных исследований в части оценки точности методов измерения не существует. Основным инструментальным методом определения испарения со снега является метод испарителей. Метод основан на учете составляющих водного баланса этого прибора. Однако не все составляющие баланса учитываются в полной мере. Несмотря на полученный экспериментальный материал, многие аспекты формирования испарения со снежного покрова, особенно в характерные периоды года, изучены далеко не полно. Отсюда возникает основная цель работы: выполнить детальные исследования процесса формирования испарения со снега на основе натуральных наблюдений, на этапах снегонакопления и снеготаяния, а также усовершенствовать методику определения и расчета величин испарения за зимний период года по данным наблюдений сети станций Росгидромета.

Испарение со снега в период снегонакопления

Испарение со снежного покрова в основном определяется величиной и направлением притока энергии к испаряющей поверхности, диффузионным переносом водяного пара в толще снега и турбулентного его оттока в приземном слое атмосферы. Наименее изученным здесь является процесс диффузии водяного пара. В работах [1, 2] показано, что в толще снега происходит диффузионный перенос водяного пара под действием перепада температур. Перенос происходит по поровой структуре снега (макроскопическая диффузия), путем сублимации пара на нижних частях кристаллов (при направлении потока снизу вверх) и возгонки на их верхней части (макроскопическая диффузия) [1]. Интенсивность потока водяного пара зависит от градиента температур и в стационарном режиме описывается известным уравнением:

$$I = D (\partial e / \partial Z), \quad (1)$$

где I — интенсивность диффузии, кг/(м²×с); D — коэффициент диффузии, м²/с; $\partial e / \partial Z$ — вертикальный градиент плотности насыщенного водяного пара, кг/м³.

В Гидрофизической лаборатории ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ) были проведены исследования влагооборота в снеге на специальной установке с использованием кристаллизаторов. Не рассматривая методику исследования, так как она детально изложена в работах [3, 4], укажем, что на основе этих измерений, при оптимальной высоте установки кристаллизаторов, были определены значения коэффициентов диффузии в зависимости от температуры, а также вынос водяного пара за пределы поверхности снежного покрова.

Оптимальной высотой установки приемной пластины кристаллизатора, относительно ее расположения над поверхностью снега, является условие, при котором в этом пространстве не будет происходить конвективное движение воздушной массы. Для оценки условий возникновения свободной конвекции внутри некоторого объема использован критерий Грассхофа—Прандтля [5]. Не останавливаясь на математических выкладках, приводим окончательное решение для наших условий: $\Delta T > 19 / L^3$. Здесь ΔT — разность температур поверхности снега и пластины кристаллизатора, °С; L — расстояние между ними, см. Из расчетов следует [3, 4], что свободная конвекция в кристаллизаторах высотой 0,5; 1,0; 1,5 и 2,5 см возникнуть не может, поскольку для этого необходимы большие перепады температур.

Установлено, что наибольшие значения коэффициента диффузии наблюдаются при температурах около 0 °С и равны $(8—9) \times 10^{-5}$ м²/с при — 0,5 °С. С понижением температуры до — 25 °С он уменьшается примерно до 3×10^{-5} м²/с.

Зависимость коэффициентов диффузии от средней температуры снега (T) автор работы [3] представил в виде:

$$D = [0,83 / (1 - T) + 0,27] / 10^4, \quad (\text{м}^2/\text{с}). \quad (2)$$

Эта зависимость близка к результатам, приведенным в работах [6, 7]. Отсюда зная величину средней температуры снега и определив D по формуле (2), возможно выяснить интенсивность диффузии водяного пара.

Зимой 1983—1985 гг. на Валдае были поставлены опыты по оценке диффузии водяного пара из почвы в снег и из снега в атмосферу. За период с 25.12.1984 г.

по 12.02.1985 г. (т. е. в холодный период года, исключая период снеготаяния) поток пара из почвы составил 0,577 мм, а из снежной толщи в атмосферу 0,249 мм, т. е. в 2,3 раза меньше. По наблюдениям, проведенных в Северном Казахстане (1982—1985 гг.) диффузионный вынос водяного пара в среднем, за период накопления снегозапасов, составил 1,61 мм.

Установлено, что диффузионный поток водяного пара из снега в атмосферу зависит от высоты снежного покрова. Зависимость, приведенная на рис. 1, показывает, что величина диффузии, при максимуме 0,05 мм/сутки, интенсивно уменьшается с увеличением толщины снега до 25—30 см, а затем, при его толщине ≥ 30 см, не выходит за пределы 0,01 мм/сутки и может принимать нулевые значения.

Зависимость между интенсивностью диффузии водяного пара (i) и высотой снежного покрова описывается уравнением вида:

$$i = 9 \times 10^{-6} h^2 - 0,0011h + 0,0387 \text{ (мм/сутки)}, \quad (3)$$

где h — высота снега, см. Коэффициент корреляции (R) зависимости между интенсивностью диффузии и высотой снежного покрова равен 0,727. Относительно низкий R обусловлен значительной изменчивостью температуры воздуха, а, следовательно, и температуры поверхности снега. В процессе опыта она изменялась от $-0,6$ до $-14,0$ °C и ниже. В работе [8] получена аналогичная зависимость.

При небольших высотах снежного покрова градиент температуры в снежной толще значителен и существенно больше, чем при высотах до 60—70 см: 0,40—5,0 против 0,10—2,0 градус/см. Уменьшение градиента температуры в снежном покрове с возрастанием его толщины обуславливает и уменьшение диффузии водяного пара.

Инструментальные методы определения, в частности применения сетевого испарителя ГГИ 500-6, не учитывают процесса диффузии водяного пара и, как следствие, вносят в измеренную величину испарения ошибку. Если принять

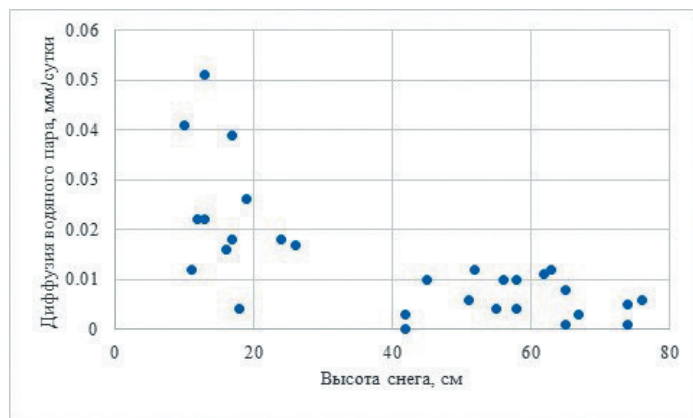


Рис. 1. Зависимость диффузии водяного пара в снежной толще от высоты снега.

Fig. 1. Dependence of water vapor diffusion in snow on snow height.

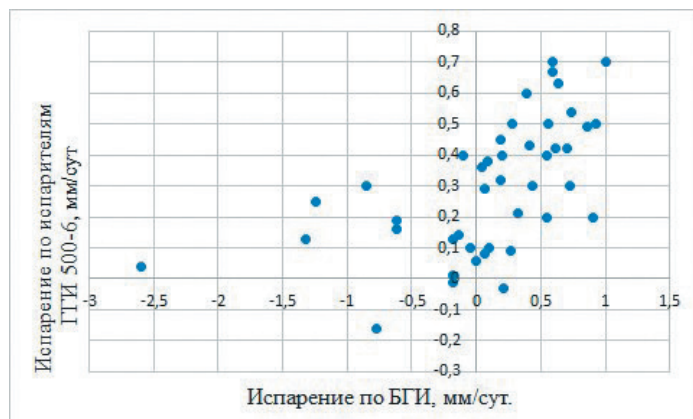


Рис. 2. Сравнение величин испарения со снега, измеренных с применением БГИ, и испарителя ГГИ 500-6.

Fig. 2. Comparison of evaporation from snow measured using BGI and GGI 500-6 evaporator.

в качестве временного эталона измерения испарения со снега показания Большого гидравлического испарителя (БГИ, площадь испаряющей поверхности 5,0 м²) [9] и показания ГГИ 500-6 (рис. 2), то наблюдается слабая корреляционная зависимость между результатами измерений по этим приборам. Причем отклонения происходят в ту и другую сторону. Объяснить это возможно формированием диффузионного потока пара при изменении высоты снежного покрова непосредственно на БГИ. В испарителях ГГИ 500-6, при площади испаряющей поверхности 500 см², она постоянная и равна 6 см, в БГИ — изменяется на протяжении зимнего периода. Отсюда следует, что измеренные величины испарения при использовании испарителя ГГИ 500-6 в период снегонакопления имеют неустранимую ошибку.

Испарение со снега в период снеготаяния

В весенний период, при снеготаянии, в снежной толще образуется изотермия. Градиент ее в этот период равен нулю, и вынос водяного пара отсутствует. В опытах на Валдае весной 1983 г., с 12 по 22 марта, при температуре поверхности снега около $-0,6$ °С, диффузионный поток был равен нулю.

Анализ материалов наблюдений за испарением со снега показывает, что наибольшие величины испарения наблюдаются в период снеготаяния. За этот период испаряется от 5—10 до 20—25 мм и больше, что составляет до 85—95 % от испарения в холодный период года. Согласно работе А. В. Павлова [2] за весь весенний период испарение со снега в Якутске в среднем равно 22,6 мм, что составляет 93 % от суммы за всю зиму.

Интенсивное увеличение испарения полностью обусловлено характером снеготаяния. По признаку характера снеготаяния, влияющего на интенсивность

испарения, выделяются весны солярного и смешанного (солярного и адвективного) типа снеготаяния.

Для северо-запада России характерен смешанный тип снеготаяния и соответственно ему прерывистый ход интенсивности испарения. Смешанный тип снеготаяния характерен тем, что в нем выделяется два небольших периода: первый определяется приходом относительно теплой воздушной массы, нередко сопровождающейся выпадением осадков, а второй — зачастую безоблачной погодой и большой солнечной радиацией.

Примером динамики испарения со снега при смешанном типе снеготаяния является весна 1961 г. на Валдае (рис. 3). Общая продолжительность снеготаяния составила 44 суток. Продолжительность первого периода снеготаяния составила 22 дня (с 18 марта по 7 апреля), из которых 10 дней испарение не наблюдалось из-за выпадения твердых осадков. При выпадении осадков испарение со снега в большинстве случаев близко к нулю. За первый период испарилось 7,23 мм влаги, что составляет в среднем 0,33 мм/сут. Во втором периоде, также продолжительностью 22 суток, осадки отсутствовали, испарилось 26,6 мм, т. е. в среднем 1,21 мм/сут. Максимальная величина испарения за сутки достигла 2,50 мм. За весь период снеготаяния испарилось 33,8 мм влаги, в среднем 0,77 мм/сут.

Типичным примером солярного типа снеготаяния является весна 1966 г. на Валдае. Сезонный ход испарения в 1966 г. также приведен на рис. 3. В начальном периоде снеготаяния, с 5 по 18 апреля, испарилось всего 1,36 мм влаги, в среднем 0,097 мм/сутки. При этом суточные величины испарения изменялись от $-0,79$ до $+0,64$ мм/сутки. Конденсация за этот период составила 1,35 мм, сумма испарившейся влаги $+2,71$ мм, т. е. испарение влаги, превысило конденсацию практически в 2 раза. Начиная с 18 апреля, по мере возрастания среднесуточной температуры, и до полного схода снега, суточная величина испарения неуклонно возрастала

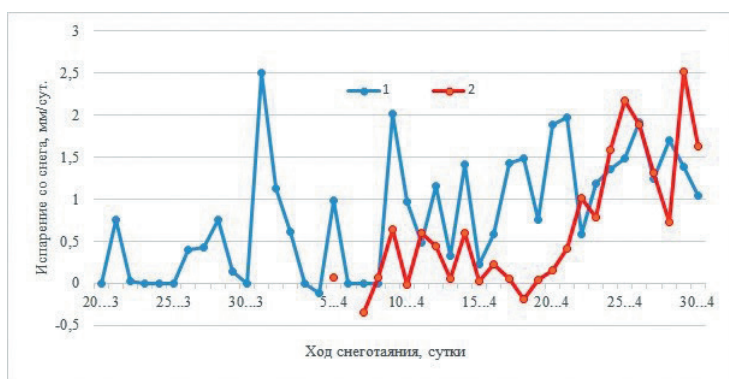


Рис. 3. Динамика испарения со снежного покрова при смешанном (1, Валдай 1961 г.) и солярном (2, Валдай 1966 г.) типах снеготаяния.

Fig. 3. Evaporation dynamics from snow cover during mixed (1, Valdai 1961) and solar (2, Valdai 1966) types of snowmelt.



Рис. 4. Динамика испарения со снежного покрова (при снеготаянии) по показаниям БГИ в апреле 1966 г.

Fig. 4. Evaporation dynamics from the snow cover (during snowmelt) according to the readings of the BGI in April 1966.

от 0,04 до 2,17—2,52 мм/сут. Всего за 12 суток испарилось 14,22 мм, т. е. в среднем 1,185 мм/сут.

Анализ результатов наблюдений показывает: количество испарившейся влаги больше при смешанном типе снеготаяния, по сравнению с солярным, что обусловлено, в значительной мере, большей продолжительностью первого.

На рис. 4 приведен ход испарения за период снеготаяния с 5 по 30 апреля 1966 г. по наблюдениям на БГИ. Если в начальный период снеготаяния суточная величина испарения была равна всего 0,07 мм, то на конечном этапе она достигла 2,15—2,52 мм/сут. За весь период снеготаяния испарение составило 15,6 мм. В 1961 г. (с 21 марта по 30 апреля) данная величина достигла 34,2 мм. Это свидетельствует о значительной изменчивости величин испарения при снеготаянии за многолетний период наблюдений.

На рис. 5 приведены результаты измерения суточного хода испарения при снеготаянии по показаниям БГИ за период с 24 по 30 апреля 1966 г. Суточный ход характерен тем, что в 7—8 ч утра начинает возрастать испарение. Наибольшие величины наблюдаются в основном от 12 до 14—15 ч и далее, до 17—19 ч, интенсивность испарения уменьшается. В остальное время суток (от 19 до 7—8 ч следующих суток) испарение либо отсутствует, или же наблюдается незначительная конденсация, не превышающая 0,025 мм/час.

Особенностью процесса формирования испарения в период снеготаяния является то обстоятельство, что на поверхности снега образуется квазижидкая пленка воды, уменьшается отражательная способность снега и, как следствие, возрастает поглощенная солнечная радиация. При этом дефицит влажности воздуха возрастает с увеличением суммарной солнечной радиации и оказывает непосредственное влияние на интенсивность испарения.

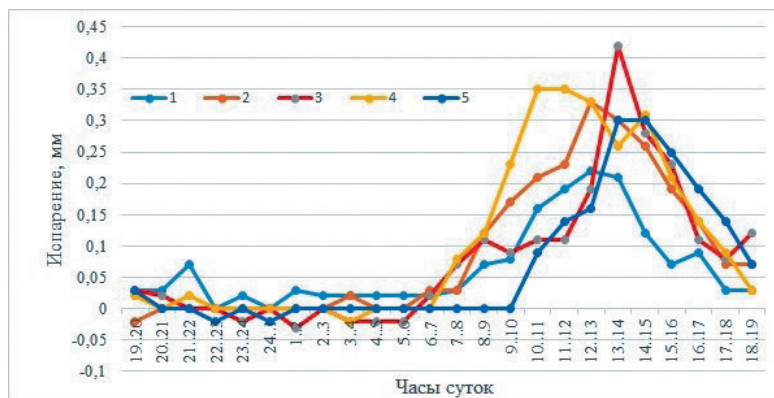


Рис. 5. Суточный ход испарения по показаниям БГИ с 24 по 30 апреля 1966 г.

Условные обозначения: 1—5 — 24—30 апреля.

Fig. 5. Evolution of daily evaporation according to the BGI readings from April 24 to April 30, 1966.

Legend: 1—5 — 24—30 April.

Зависимость интенсивности дневных величин испарения от суммарной солнечной радиации (Q_c) получена на основе осреднения декадных величин испарения (E_d), по результатам наблюдений В. А. Шутова, в зимние периоды 1981 и 1982 гг. с использованием испарителей ГГИ 500-6. Зависимость имеет вид:

$$E_d = 5 \times 10^{-6} Q_c^2 - 0,0005 Q_c - 0,026 \text{ (мм/сут)}, \quad (4)$$

при коэффициенте корреляции 0,955.

Линейный тренд зависимости определяется уравнением:

$$E_d = 0,0016 Q_c - 0,1844 \text{ (мм/сут)}, \quad (5)$$

но коэффициент корреляции несколько уменьшается до $-0,922$.

Зависимость интенсивности испарения со снега от поглощенной солнечной радиации ($Q_{\text{пог}}$) принимает выражение:

$$E_d = 0,0043 Q_{\text{пог}} - 0,0842 \text{ (мм/сут)}, \quad (6)$$

при котором $R = 0,972$.

Приведенные зависимости $E_d = f(Q)$ позволяют использовать актинометрическую информацию для оценки интенсивности испарения со снежного покрова.

Усовершенствование методики определения и расчета величин испарения в зимний период года на основе инструментальных наблюдений

Применение испарителей ГГИ 500-6 не обеспечивает получение непрерывной информации из-за неблагоприятных условий текущей погоды: снегопадов, метелей, сдува или наноса снега на испаряющую поверхность. Согласно [10], наблюдения за испарением со снега производится в ночной и дневной периоды суток, каждый из которых продолжительностью по 12 ч. Если наблюдатель произвел наблюдение только в интервале времени менее 12 ч, то методом интерполяции приближенно определяют испарение за все 12 ч. Для этого определяют

интенсивность испарения (мм/час) за промежуток времени, при котором было проведено наблюдение и умножают на период времени, соответствующий полусуткам (т. е. на 12 ч), в которых производилось наблюдение.

Далее, используя срочные данные метеорологических наблюдений, рассчитывают испарение, согласно [11], по упрощенной формуле П. П. Кузьмина:

$$E = (0,24 + 0,05 U_{10}) d_2, \quad (7)$$

где E — испарение за расчетный период, мм; d_2 — дефицит влажности воздуха на уровне 2 м в миллибарах; U_{10} — скорость ветра на высоте 10 м, м/с.

В разработанных в Гидрофизической лаборатории ГГИ рекомендациях [10] для восстановления пропусков наблюдений приведена формула, учитывающая региональные особенности климата:

$$E = (\alpha + \beta U_{10}) (e_n - e_2), \quad (8)$$

где $(e_n - e_2)$ — разность между давлением насыщенного водяного пара (e_n), вычисленного по данным срочных наблюдений за температурой поверхности снега, и парциальным давлением водяного пара (e_2) на уровне 2,0 м.

Параметры α и β определяют по суточным данным испарения и среднесуточным значениям U_{10} , e_n и e_2 , вычисленным по данным срочных наблюдений. На основании расчетов по ряду станций параметр α задается постоянным и равным 0,18. Параметр β вычисляется по формуле:

$$\beta = [(E / \Delta e)_{\text{cp}} - \alpha], \quad (9)$$

где $(E / \Delta e)_{\text{cp}}$ и U_{10} — средние значения соотношений $E / (e_n - e_2)$ и скорости ветра, вычисленные из всей совокупности принятых для определения суточных значений.

В качестве примера в табл. 1 приведены значения региональных параметров для ряда метеорологических станций. При фиксированном значении параметра α (0,17—0,18) параметр β , в зависимости от местных условий, изменяется в широких пределах от 0,05 до 0,28.

В зимний сезон (включая снегонакопление и снеготаяние) количество пропусков наблюдений колеблется в значительных пределах. На Нижнедевицкой водно-балансовой станции, за период с 2010 по 2019 г., число пропусков полных суточных наблюдений изменяется от 3 до 28 случаев (в среднем 11), что составляет от 4 до 33 % при среднем периоде наблюдений 85 суток за сезон.

Таблица 1

Значения параметров α и β в формуле (8)Values of parameters α and β in formula (8)

Станция	Длина ряда наблюдений	α	β
Нижнедевицкая	98	0,18	0,05
Каменная степь	92	0,17	0,07
Ройка	45	0,18	0,14
Омск	93	0,18	0,16
Тара	52	0,18	0,10
Тулун	64	0,18	0,27
Колымская	50	0,18	0,28
Сосновка	54	0,18	0,13

В качестве примера в табл. 2, приведены результаты измеренных и восстановленных пропусков наблюдений за испарением со снежного покрова.

Таблица 2

Измеренные и восстановленные величины наблюдения за испарением со снежного покрова на Нижнедевицкой ВБС за период с 2010 по 2019 г.

Measured and reconstructed values of evaporation from snow cover at the Nizhnedevitskaya water balance station for the period from 2010 to 2019

Зима, годы	Измеренные оценки испарения		Сумма измеренных и восстановленных значений испарения, мм	
	За зимний сезон, мм	Интенсивность за сутки, мм/сутки	За зимний сезон, мм	Интенсивность за сутки, мм/сутки
2009—2010	5,58	0,112	8,40	0,162
2010—2011	5,35	0,111	11,20	0,197
2011—2012	4,80	0,130	7,45	0,194
2012—2013	7,53	0,196	13,20	0,307
2013—2014	0,44	0,042	0,92	0,084
2014—2015	6,31	0,156	14,95	0,249
2015—2016	4,68	0,204	15,60	0,420
2016—2017	3,72	0,090	7,71	0,166
2017—2018	7,32	0,198	10,40	0,270
2018—2019	4,90	0,022	7,14	0,159
2009—2019	5,06	0,136	9,70	0,221

Анализ таблицы показывает, что в среднем при восстановлении пропусков наблюдений за испарением сумма измеренных и восстановленных величин возрастает практически до двух раз по сравнению с измеренными оценками.

По наблюдениям на Подмосковной ВБС за зиму 1979—1980 гг. сумма суточных наблюденных величин испарения равна 8,23 мм (сумма ночных величин — 0,47 мм, дневных — 7,76 мм). За этот период сумма наблюденных и восстановленных величин равна 26,8 мм. Восстановленные величины (18,6 мм) в два раза превышают наблюденные за тот же зимний период — 124 суток.

В конечный период снеготаяния (период пестрого ландшафта) для оценки величины испарения наиболее целесообразно использовать методику расчета А. Н. Постникова [12], с учетом изменения климатических характеристик [13—15].

Выводы

Испарение со снежного покрова в основном определяется величиной и направлением притока энергии к испаряющей поверхности и диффузионным переносом водяного пара в толще снега. Интенсивность потока водяного пара зависит от градиента температур в снежной толще. Экспериментальным путем в Гидрофизической лаборатории ГГИ, посредством применения кристаллизаторов оптимальной высоты, в полости которых не может происходить конвективное движение водяного пара, установлена зависимость коэффициента диффузии (D)

в снежном покрове от средней температуры снега. Наибольшие его значения наблюдаются при температурах около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и равны $(8-9) \times 10^{-5}\text{ м}^2/\text{с}$ при $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. С понижением температуры до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ он уменьшается примерно до $3 \times 10^{-5}\text{ м}^2/\text{с}$. Зная D и среднюю температуру снега, возможно оценить диффузионный поток водяного пара. В холодный период года диффузионный поток водяного пара из снега в атмосферу уменьшается с увеличением толщины снежного покрова. При его толщине 30 см и больше, он не выходит за пределы 0,01 мм/сутки и может принимать нулевые значения. Эта зависимость обусловлена тем, что при малых высотах снега наблюдается в снежной толще большой градиент температуры, а при большой высоте — он значительно меньше. Отсюда происходит уменьшение диффузии пара.

В весенний период в снежной толще наблюдается изотермия. Градиент ее в этот период равен нулю и диффузионный вынос водяного пара отсутствует. Это подтверждают наши опыты на Валдае с 12 по 22 марта 1983 г. При температуре поверхности снега около $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ диффузионный поток был равен нулю. Наибольшие величины испарения наблюдаются в условиях снеготаяния. В этот период интенсивно испаряется квазижидкая пленка воды, образующаяся на кристаллах льда. Интенсивность ее испарения в основном зависит от величины поглощенной солнечной радиации. Установлена зависимость величины испарения со снега от поглощенной солнечной радиации, коэффициент корреляции которой $-0,972$. В период снеготаяния испаряется от 5—10 до 20—25 мм и больше, что составляет до 85—95% от испарения за зиму и зависит от характера типа снеготаяния.

Зависимости величин испарения от суммарной или поглощенной солнечной радиации могут быть использованы как универсальные в пределах достаточно больших регионов. Наблюдения за испарением со снега посредством сетевых испарителей не обеспечивают получение непрерывной информации из-за неблагоприятных условий текущей погоды (снегопадов, метелей, сдува или наноса снега). Приведены простейшие методики восстановления пропусков наблюдений по характеристикам текущей метеорологической обстановки. На примере наблюдений за испарением со снега на водно-балансовых станциях показано, что в среднем при восстановлении пропусков наблюдений сумма измеренных и восстановленных величин возрастает практически до двух раз по сравнению с измеренными оценками.

Список источников

1. Дюнин А. И. Испарение снега. Новосибирск: Изд-во АН СССР, 1961. 119 с.
2. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
3. Николенко А. В. Лабораторные определения характеристик диффузии водяного пара в снежном покрове // МГИ. 1988. Т. 62. С. 90—96.
4. Деларов Д. А., Каложный И. Л. Оценка диффузии водяного пара (на примере полевых исследований в Северном Казахстане) // Труды ГГИ. 1991. Вып. 346. С. 46—56.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1953. С. 260—263.
6. Коломыйц Э. Г. Структура снега и ландшафтная индикация. М.: Наука, 1976. 206 с.
7. Морозов Г. А. Расчет изменения плотности снежного покрова под действием диффузии, конвекции, возгонки и сублимации водяного пара в нем // Метеорология и гидрология. 1967. № 6. С. 98—103

8. Коломыц Э. Г. Структура и режим снежной толщи западносибирской тайги. Л.: Наука, 1971. 172 с.
9. Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. 250 с.
10. Методические рекомендации по производству наблюдений за испарением с почвы и снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 234 с.
11. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 96 с.
12. Постников А. Н. Схема расчета испарения с поверхности почвы в лесостепной и степной зонах ЕТС // Труды ГГИ. 1977. Вып. 233. С. 87—96.
13. Постников А. Н. Об изменении и испарения с суши и водной поверхности на территории России за последние десятилетия // Ученые записки РГГМУ. 2018. Вып. 50. С. 88—96.
14. Калюжный И. Л., Лавров С. А. Изменчивость глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга и ее влияние на процессы формирования зимнего и весеннего стока при изменении климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С.58—71.
15. Groot Zwaaftink C. D., Mott R., Lehning M. Seasonal simulation of drifting snow sublimation in Alpine terrain // *Water Resour. Res.* 2013. No. 49. P. 1581—1590. doi: 10.1002/wrcr.20137.

References

1. Dyunin A. I. *Ispareniye snega = Snow evaporation*. Novosibirsk: USSR Academy of Sciences, 1961: 119 p. (In Russ.).
2. Pavlov A. V. *Teplofizika landshaftov = Landscape thermophysics*. Novosibirsk: Nauka, 1979: 286 p. (In Russ.).
3. Nikolenko A. V. Laboratory determinations of water vapor diffusion characteristics in snow cover. *MGI*. 1988;(62):90—96. (In Russ.).
4. Delarov D. A., Kalyuzhnyy I. L. Assessment of water vapor diffusion (on the example of field studies in Northern Kazakhstan). *Trudy GGI = Proceedings of State Hydrology Institute*. 1991;(346):46—56. (In Russ.).
5. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Mekhanika sploshnykh sred = Continuum mechanics*. Moscow: Nauka, 1953: 260—263. (In Russ.).
6. Kolomyts E. G. *Struktura snega i landshaftnaya indikatsiya = Snow structure and landscape indication*. Moscow: Nauka, 1976: 206 p. (In Russ.).
7. Morozov G. A. Computation of the change in the density of snow cover under the influence of water vapour diffusion, Convection, Sublimation and Condensation in it. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1967;(6):98—103. (In Russ.).
8. Kolomyts E. G. *Struktura i rezhim snezhnoy tolshchi zapadnosibirskoy taygi*. Structure and regime of the snow mass of the West Siberian taiga. Nauka. Leningrad, 1971: 172 p. (In Russ.).
9. Uryvaev V. A. *Eksperimental'nyye gidrologicheskiye issledovaniya na Valdai = Experimental hydrological studies in Valdai*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1953: 250 p. (In Russ.).
10. Methodological recommendations for the production of observations of evaporation from soil and snow cover. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991: 234 p. (In Russ.).
11. *Rekomendatsii po raschetu ispareniya s poverkhnosti sush = Guidelines for Calculating Evaporation from the Land Surface*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 96 p. (In Russ.).
12. Postnikov A. N. Scheme for calculating evaporation from the soil surface in the forest-steppe and steppe zones of the European territory of Russia. *Trudy GGI = Proceedings of State Hydrology Institute*. 1977;(233):87—96. (In Russ.).
13. Postnikov A. N. About evaporation change from land and water surface on the territory of Russia for the last decades. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018;(50):88—96. (In Russ.).
14. Kalyuzhnyi I. L., Lavrov S. A. Variability of frost depth in the Volga river basin and its impact on the winter and spring runoff formation process under climate change. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2016;(7):58—71. (In Russ.).
15. Groot Zwaaftink C. D., Mott R., Lehning M. Seasonal simulation of drifting snow sublimation in Alpine terrain. *Water Resour. Res.* 2013;(49):1581—1590. doi: 10.1002/wrcr.20137.

Информация об авторе

Калюжный Игорь Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, зав. Лабораторией гидрофизики, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 8-960-254-06-42; (812) 433-95-10, hfl@mail.ru.

Information about author

Igor L. Kalyuzhny, PhD (Tech. Sci.), senior research scientist, Chief of Hydrophysical Department. State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.08.2022.

Принята к публикации 27.08.2022.

The article was received on 07.08.2022.

The article was accepted 27.08.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 435—452.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):435—452.

Научная статья
УДК [556.535:551.583](282.247.11)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452

Влияние изменения климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры

Владимир Алексеевич Лобанов¹, Наталия Ивановна Горошкова², Анастасия Владимировна Стриженок², Дарья Артемиевна Семенова²

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

² Государственный гидрологический институт, goroshnat@yandex.ru

Аннотация. Многолетние ряды высших и низших уровней воды и характеристик ледового режима рек бассейна Печоры аппроксимируются моделями нестационарного среднего с целью выявления влияния современного изменения климата. Разработана методика оценки эффективности и устойчивости моделей нестационарного среднего. Установлено, что высшие уровни воды весеннего половодья (высшие в году, высшие периода ледохода, высшие заторные уровни) пока еще не подвержены этим изменениям в виду высокой естественной изменчивости и большой зависимости от локальных факторов. Характеристики ледовых явлений, такие как максимальная толщина льда, даты начала, окончания, продолжительность ледостава, а также минимальные уровни воды открытого русла уже имеют другие средние значения в 1990—2000-х годах в связи с влиянием климатических изменений.

Ключевые слова: опасные гидрологические характеристики, уровни воды, ледовые явления, многолетние ряды, бассейн Печоры, изменение климата, статистические модели.

Для цитирования: Лобанов В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В., Семенова Д. А. Влияние изменения климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 435—452. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452.

Original article

Impact of climate change on extreme hydrological characteristics in the Pechora river basin

Vladimir A. Lobanov¹, Natalia I. Goroshkova², Anastasia V. Strizhenok², Darja A. Semenova²

¹ Russian State Hydrometeorological University, lobanov@EL6309.spb.edu

² State Hydrological Institute, goroshnat@yandex.ru

Summary. Long-term time series of the highest and lowest water levels and characteristics of the ice regime of the rivers in the Pechora basin are approximated by non-stationary average models (linear trend and mean step change model) in order to identify the impact of modern climate change. On the Pechora River

© Лобанов В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В., Семенова Д. А., 2022

and its main tributaries (the rivers Usa, Kolva, Izhma, Tsilva, Pizhma, Sula), 21 hydrological gauged sites were selected with different catchment areas and observation periods. The following were considered as the highest water levels: the highest annual water levels, which were always observed during the snowmelt period; the highest levels of spring ice drift and higher jam levels, which did not occur every year. In the second group of «slow inertial» characteristics, selected were the low water levels of the open low water channel, attributed to the summer-autumn period, and such characteristics of the ice regime as maximum ice thickness, dates of the beginning, the end and the duration of freeze-up. A method for estimating the efficiency and stability of the parameters of non-stationary mean models has been developed. It has been obtained that the highest water levels of the spring flood (maximum in the year, the period of ice drift, jam levels) are not yet subject to these changes due to high natural variability and great dependence on local factors. More inertial characteristics of ice events, such as maximum ice thickness, dates of beginning, end and duration of freeze-up, as well as minimum open channel water levels, have already changed their average values in the 1990—2000s due to the impact of climate change. The greatest changes took place in the maximum ice thickness, which is well related to such a climatic factor as the sum of negative temperatures, in half of the cases these changes exceeding the standard deviation of natural variability and the decrease in the maximum ice thickness ranging from 7—8 to 22—28 cm in different sites. The dates of the beginning of freeze-up shifted towards the end of the year and became later by an average of 8 days, the dates of the end of the ice period on the rivers starting earlier by an average of 3 days, which as a result reduced the duration of freeze-up by 11 days. Even though these changes account for 5—8% of the total duration of the ice period on rivers, they are statistically significant in most cases.

Keywords: hazardous hydrological characteristics, water levels, ice phenomena, long-term series, Pechora basin, climate change, statistical models.

For citation: Lobanov V. A., Goroshkova N. I., Strizhenok A. V., Semenova D. A. Impact of climate change on extreme hydrological characteristics in the Pechora river basin. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):435—452. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-435-452.

Введение

Основную опасность в бассейне р. Печоры представляют мощные заторы льда, высшие уровни воды которых одновременно являются и высшими годовыми. Происходящие при заторах затопления пойм, расположенных на них населенных пунктов и объектов инфраструктуры приводят к большим материальным ущербам. Исследованию характеристик ледовых явлений на реках севера Европейской территории России (ЕТР), влиянию на них изменений климата и методикам их прогнозов посвящены многочисленные работы российских ученых [1—6].

Экстремальные гидрологические характеристики, такие как высшие и низшие уровни воды, а также характеристики ледовых явлений (даты начала, окончания, продолжительность ледостава и наибольшая толщина льда) влияют на водоснабжение, затопление территорий, функционирование гидротехнических сооружений, зимников и многие другие виды жизненной и хозяйственной деятельности.

По генезису формирования и инерционности процессов их можно разделить на два класса:

— «быстрые», к которым относятся высшие уровни воды весеннего половодья, дождевых паводков, заторные уровни, наблюдающиеся, как правило, в течение короткого времени;

— «медленные инерционные» — это характеристики ледовых явлений: продолжительность ледостава, даты его начала и окончания, максимальные толщины

льда, а также низшие летние и зимние уровни воды, как предельные значения многодневных кривых истощения стока в эти сезоны.

Можно априори предположить, что влияние современного изменения климата на эти две разные группы опасных явлений будет также разным. Высшие уровни в большей степени зависят от местных или локальных факторов (особенности пропускной способности русла на участке и в створе, кинематические свойства потока и т.д.), чем от более инерционных, климатических. Это проявляется и в более высоких коэффициентах вариации и асимметрии эмпирических распределений высших расходов и уровней воды по сравнению, например, со среднегодовыми и среднемесячными аналогичными характеристиками [7—10]. Также в национальных оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации отмечается, что существенные изменения имеют место в минимальном и годовом стоке, а в максимальных расходах воды они практически отсутствуют [11—15].

Отклик характеристик ледового режима на изменения климата обусловлен в основном инерционностью данного вида криосферы, и поэтому изменения происходят не сразу, а с некоторым запаздыванием. И этот период запаздывания в проявлении влияния изменения климата зависит от локальных особенностей створа и конкретного участка русла. Поэтому годы начала реакции на климатические изменения в характеристиках ледового режима в разных пунктах наблюдений могут отличаться. Аналогичная ситуация имеет место также в низших расходах и уровнях воды, где год начала их изменений зависит от инерционности процесса истощения поверхностных и подземных вод, связанного с особенностями конкретного водосбора.

Если рассматривать общую концепцию совместного влияния зональных и азональных факторов [16,17], то на высшие уровни воды оказывают преимущественное влияние азональные факторы, а на характеристики ледового режима и низшие уровни влияют как зональные (климатические), так и азональные факторы.

Еще одна особенность изменений в гидрологических характеристиках — это ступенчатый или резкий переход от одних стационарных условий к другим, что наглядно иллюстрируется в работах [11, 12]. Аналогичные резкие изменения в метеорологических характеристиках обусловлены ростом интенсивности индекса Северо-Атлантического колебания в конце 1980-х годов [18, 19]. Поэтому помимо наиболее распространенных в настоящее время моделей трендов при аппроксимации временных рядов следует применять и модель ступенчатых изменений.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы оценить, как современное изменение климата приводит к изменению средних значений многолетних рядов экстремальных характеристик уровня режима в пунктах наблюдений на р. Печоре и ее основных притоках.

Исходные данные

На р. Печоре и ее основных притоках (реки Уса, Колва, Ижма, Цильма, Пижма, Сула) был выбран 21 гидрологический пост с различными площадями водосборов



Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений в бассейне р. Печоры.

Fig.1. Scheme of location of observation sites in the basin of the Pechora River.

и периодами наблюдений. Схема размещения пунктов наблюдений с кодами ГВК (Государственного водного кадастра) приведена на рис. 1.

Основные характеристики пунктов и водосборов (F — площадь водосбора в км^2 ; $L_{\text{уст.}}$, $L_{\text{ист.}}$ в км — расстояние пункта от устья и истока реки), а также периоды и продолжительности наблюдений (n в годах) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики пунктов и периодов наблюдений в бассейне Печоры
 Characteristics of sites and observation periods in the Pechora basin

Код ГВК	Река — пункт	F , км^2	$L_{\text{уст.}}$, км	$L_{\text{ист.}}$, км	Период	n , лет
70410	р. Печора — д. Якша	9620	1506	303	1914—2019	106
70414	р. Печора — с. Троицко-Печорск	35600	1359	450	1936—2019	84
70570	р. Печора — пос. Шедрино	42500	1201	608	1978—2019	42
70421	р. Печора — с. Усть-Шугор	67500	1036	773	1914—2019	103

Код ГВК	Река — пункт	F , км ²	$L_{уст.}$, км	$L_{ист.}$, км	Период	n , лет
70425	р. Печора — д. Усть-Ковжа	74600	872	937	1914—2019	96
70427	р. Печора — с. Усть-Уса	188000	754	1055	1948—2019	72
70429	р. Печора — д. Мутный Материк	205000	610	1199	1933—2019	86
70432	р. Печора — д. Шельяюр	212000	479	1330	1934—2019	86
70850	р. Печора — с. Усть-Цильма	248000	425	1384	1932—2019	88
70436	р. Печора — с. Ермицы	295000	236	1573	1935—2019	87
70827	р. Печора — с. Оксино	312000	141	1668	1917—2019	90
70466	р. Уса — с. Петрунь	27500	259	306	1916—2019	100
70494	р. Адзъва — д. Харуга	8700	46	288	1960—2019	60
70499	р. Колва — с. Хорей-Вер	5470	326	239	1959—2019	60
70503	р. Колва — с. Усть-Колва	18000	6.1	558	1998—2019	21
70509	р. Ижма — с. Усть-Ухта	15000	316	215	1914—2019	90
70514	р.Ижма — с. Ижма	28700	79	452	1930—2019	90
70522	р. Ухта — г. Ухта	4290	13	186	1934—2019	86
70531	р. Пижма — д. Боровая	4890	53	230	1937—2019	82
70533	р. Цильма — с. Трусово	20900	54	320	1958—2019	62
70540	р. Сула — д. Коткино	8500	101	252	1929—2019	91

Как следует из данных табл. 1, площади водосборов варьируются в очень широких пределах от 4290 км², для р. Ухты — г. Ухта, до 312 000 км², для р. Печоры — с. Оксино, причем половина пунктов находится на р. Печоре, а половина на ее притоках. Периоды наблюдений также существенно разнятся: от 21 года (на р. Колве у с. Усть-Колва) до 106 лет (на р. Печоре у д. Якша), но последний год наблюдений во всех пунктах — 2019.

В качестве высших уровней воды рассматривались: высшие в году уровни воды (H_{\max} в см над «0» поста), которые всегда наблюдались в период весеннего половодья; высшие уровни весеннего ледохода ($H_{\text{лдж}}$ в см над «0» поста), а также высшие заторные уровни ($H_{\text{затоп}}$ в см над «0» поста), которые имели место не каждый год. Высшие уровни при заторе могут наблюдаться как при наибольшем уровне весеннего ледохода, так и за несколько дней до его наступления, что зависит от условий формирования весеннего половодья конкретного года. Иногда вскрытие реки проходит без образования заторов льда.

Во второй группе «медленных инерционных» характеристик были выбраны низшие уровни воды открытого русла (H_{\min} в см над «0» поста), которые приходились на летне-осеннюю межень, и такие характеристики ледового режима как: максимальная толщина льда (h_{\max} в см), даты начала ($T_{\text{нач}}$ в днях от начала года), окончания ($T_{\text{кон}}$ в днях от начала года) и продолжительность ледостава ($T_{\text{лед}}$ в днях).

В связи с тем, что коэффициенты корреляции между многолетними рядами одних и тех же характеристик были низкими (менее 0,5—0,6), приведение непродолжительных рядов и восстановление пропусков наблюдений в соответствии с методикой, основанной на регрессионных зависимостях с продолжительными

рядами в пунктах — аналогах, осуществить не удалось [20]. Поэтому весь анализ и моделирование основано только на наблюдаемых данных.

Для сформированных баз данных многолетних рядов рассматриваемых гидрологических характеристик осуществлена оценка однородности экстремумов эмпирических распределений по статистическим критериям Диксона и Смирнова—Граббса [21, 22], и неоднородные экстремумы были исключены из рядов наблюдений.

Методика исследований

В соответствии с поставленной целью по выявлению проявления современных изменений климата в многолетних рядах опасных гидрологических характеристик были применены методы статистического оценивания и моделирования [21—23]. Проверялась гипотеза о том, какая из моделей является наиболее эффективной: модель стационарного среднего или модель нестационарного среднего, которая была представлена линейным трендом и моделью ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому. Очевидно, что если значимых статистических различий между стационарной и нестационарной моделями при аппроксимации временного ряда нет, то современное изменение климата пока не проявляется в динамике рассматриваемой гидрологической характеристики.

Описание моделей нестационарного среднего, параметров их эффективности и многочисленные примеры применения приведены, например, в работах [18, 19, 24—27]. В качестве основных показателей нестационарных моделей используются: r — коэффициент корреляции рассматриваемой гидрологической характеристики со временем и Δ — относительная разность средних квадратических отклонений остатков моделей стационарного среднего (σ_y), равного СКО (среднее квадратическое отклонение) и нестационарного (σ_e) среднего (в %), определяемая по формуле:

$$\Delta = (\sigma_y - \sigma_e) / \sigma_y \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\Delta = \Delta_{\text{тр}}$ или $\Delta = \Delta_{\text{ст}}$ — соответствующие относительные разности или показатели эффективности для моделей линейного тренда и ступенчатых изменений; σ_y — среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений.

При аппроксимации временного ряда моделью ступенчатых изменений итерациями определяется год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{ст}}$) при достижении минимума суммы квадратов отклонений от каждого стационарного среднего двух частей временного ряда [19, 24].

В данном исследовании применяется методика оценки не только эффективности статистических моделей нестационарного среднего, но устойчивости во времени вида модели и года перехода от одних стационарных условий к другим. Алгоритм оценки эффективности и устойчивости параметров нестационарных моделей состоит в следующем:

— моделями нестационарного среднего аппроксимируется временной ряд за весь период наблюдений и предварительно оценивается их эффективность и год перехода от одних стационарных условий к другим;

— если показатели модели нестационарного среднего эффективны, то оценивается, какая из двух моделей лучше (имеет большее отличие от стационарной модели): линейного тренда или ступенчатых изменений путем сравнения $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$;

— для оценки устойчивости показателей эффективности нестационарных моделей (r , $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$) и года перехода ($T_{\text{ст}}$) временной ряд аппроксимируется моделями тренда и ступенчатых изменений за разные интервалы времени при постепенном сдвиге года начала ряда от прошлого к настоящему;

— выбирается наиболее часто повторяющийся год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{стр}}$) и временной ряд по этому году делится на две части;

— оценивается статистическая значимость коэффициента корреляции (r) со временем для каждой части временного ряда (до и после года перехода $T_{\text{ст}}$) с целью оценки вида модели для каждой части временного ряда (стационарная или тренд);

— рассчитываются средние значения для каждой части временного ряда ($x_{\text{ср1}}$ и $x_{\text{ср2}}$) и оценивается их стационарность на основе статистического критерия Стьюдента [21];

— для количественной оценки влияния изменений климата рассчитывается разность между средними значениями ($\Delta x_{\text{ср}} = x_{\text{ср2}} - x_{\text{ср1}}$) и сопоставляется со средним квадратическим отклонением всего ряда (σ), которое характеризует естественную климатическую изменчивость.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера всю последовательность моделирования и оценки устойчивости во времени показателей нестационарности продемонстрируем для низших в году уровней воды летне-осеннего периода ($H_{\text{мин}}$).

Результаты расчетов показателей эффективности моделей нестационарного среднего (r , $\Delta_{\text{тр}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$) и года перехода ($T_{\text{ст}}$) приведены в табл. 2 для разных лет начала временных рядов: весь период с года начала наблюдений (В), с 1960-го г. (1960), с 1980-го (1980) и с 2000-го (2000), а также отдельно рассмотрен период с начала наблюдений по 1960 г. (до 1960), коды постов даны в виде последних трех цифр. В этой таблице жирным шрифтом выделены эффективные нестационарные модели при $\Delta > 10\%$ и статистически значимые коэффициенты корреляции r при уровне значимости $\alpha = 5\%$. Также приведены наиболее вероятные годы начала нестационарности $T_{\text{стр}}$ для эффективных нестационарных моделей. В последней строке табл. 2 даны средние значения («сред») по всем рядам.

Таблица 2

Оценка устойчивости во времени показателей эффективности нестационарных моделей низших уровней воды летне-осенней межени рек бассейна Печоры

Estimation of stability in time of efficiency indicators of non-stationary models of low water levels in summer-autumn period of rivers in the Pechora basin

код	$\Delta_{\text{тр}}$, %				$\Delta_{\text{ст}}$, %			r				$T_{\text{ст}}$				
	В	1960	1980	2000	В	1960	1980	В	До 1960	1960	1980	2000	В	1960	1980	$T_{\text{стр}}$
425	15,0	1,2	7,7	0,3	18,3	6,9	15,3	-0,50	-0,20	-0,20	0,38	0,07	70	72	94	94
427	0,1	0,1	0,4	2,0	1,1	1,4	2,4	0,04	-0,22	0,05	0,09	0,20	00	00	00	—

код	$\Delta_{\text{тр}}, \%$				$\Delta_{\text{ст}}, \%$			r				$T_{\text{ст}}$				
	В	1960	1980	2000	В	1960	1980	В	До 1960	1960	1980	2000	В	1960	1980	$T_{\text{ст}}$
410	2,4	0,7	0,0	0,8	3,9	2,6	1,5	0,22	-0,08	0,12	0,02	0,13	78	78	03	—
436	6,5	3,3	0,8	2,5	7,2	5,0	4,3	0,35	0,08	0,25	0,12	-0,20	79	79	94	94
414	6,5	0,4	0,1	3,9	10,6	1,6	1,5	0,35	0,09	0,09	0,03	0,28	65	73	97	65
432	0,0	0,2	0,1	0,0	0,6	0,9	4,6	0,02	0,05	0,07	0,05	0,02	09	09	94	94
570	0,6	0,6	3,5	0,8	5,0	5,0	10,5	0,11		0,11	0,26	0,12	94	94	94	94
421	0,6	0,0	0,2	0,0	1,8	1,6	2,9	0,11	-0,14	0,02	0,06	0,03	62	09	09	—
429	1,2	0,2	11,5	3,5	2,6	2,4	12,8	0,16	0,02	0,06	0,46	0,26	02	02	94	94
466	1,7	0,4	1,1	0,0	3,3	1,7	1,0	-0,20	-0,15	0,09	0,15	0,0	53	87	00	—
494	0,2	0,2	0,1	0,6	0,9	0,9	0,9	0,07	-0,15	0,07	0,15	0,11	84	84	09	—
499	4,8	4,5	5,6	0,1	6,7	6,5	7,7	0,30		0,30	0,33	0,04	95	95	02	95
509	5,0	5,3	1,6	0,0	7,0	7,3	3,8	0,31	-0,15	0,32	0,18	0,02	78	78	94	94
514	12,1	6,8	7,1	2,3	11,3	9,8	10,8	0,48	0,31	0,36	0,37	0,21	94	94	94	94
522	11,9	40,9	29,4	16,0	22,0	32,0	22,6	0,47	-0,50	0,81	0,71	0,54	93	93	93	93
531	1,0	0,0	0,5	0,8	2,0	0,9	1,1	0,14	0,22	0,00	0,10	0,12	56	72	94	—
533	0,6	0,4	0,9	1,0	2,0	1,9	2,9	0,11		0,09	0,13	0,14	07	07	07	—
540	1,0	0,1	10,0	4,1	4,0	6,3	13,7	0,14	-0,10	0,06	-0,40	-0,30	78	09	09	78
827	7,4	1,5	2,2	1,7	7,4	3,0	4,1	0,38	0,13	0,17	0,21	0,18	62	95	95	—
850	2,0	0,0	0,0	0,0	3,7	1,2	2,4	0,20	0,15	0,01	0,03	0,02	62	09	09	—
сред	3,9	3,2	4,0	2,0	5,8	4,7	6,0	0,16	0,12	0,14	0,17	0,10				

Как следует из результатов табл. 2, из 20 анализируемых рядов наблюдений за низшими уровнями воды летне-осенней межени эффективные нестационарные модели имеют место почти для половины рядов или от трех до восьми рядов в зависимости от рассматриваемого показателя эффективности нестационарности и периода наблюдений. Среднее значение $\Delta_{\text{тр}} = 3,3 \%$ и $\Delta_{\text{ст}} = 5,5 \%$ для всех рядов и $\Delta_{\text{тр}} = 11,5 \%$ и $\Delta_{\text{ст}} = 14,3 \%$ для шести рядов с эффективными нестационарными моделями при начале наблюдений с 1980 г. В обоих случаях модель ступенчатых изменений эффективнее, чем модель линейного тренда для аппроксимации временных рядов. Хотя для двух случаев (пункты 80425 и 80522) эффективнее или сопоставима по эффективности модель линейного тренда.

Еще один интересный результат состоит в том, что число эффективных нестационарных моделей по показателю $\Delta_{\text{ст}} > 10\%$ возрастает при сдвиге начала ряда от начального года наблюдений к 1980 г. Так, при аппроксимации рядов моделью ступенчатых изменений за весь период наблюдений эффективными являются четыре случая, а при начале рядов с 1980 г. эффективные нестационарные модели имеют место уже для шести рядов. Поэтому можно считать, что основные изменения средних значений произошли после 1980 г. Об этом свидетельствует и наиболее повторяющийся год начала нестационарности $T_{\text{ст}}$, который в основном находится в диапазоне 1993—95 гг.

На основе анализа коэффициентов r также можно сделать два интересных вывода: за период с начала наблюдений по 1960 г. статистически значимая связь минимальных уровней со временем имеет место только в двух случаях (80514 и 80522), а за последний период с 2000 г. — только в одном случае (80522). Это результат также подтверждает вывод, что практически все изменения средних имели место во второй половине XX века [28]. Кроме того, практически все r , за исключением двух случаев, > 0 , что свидетельствует о росте H_{\min} .

Временные графики всех восьми рядов H_{\min} , для которых выявлена нестационарность средних значений и их аппроксимация наиболее подходящими моделями, приведены на рис. 2.

Как следует из графиков рис. 2, в основном наблюдается резкий ступенчатый переход от одних стационарных условий к другим в середине 1990-х, что вполне может быть обусловлено влиянием современного изменения климата, т. к. имеет место одинаковое проявление изменений в разных створах. Интересно отметить, что если разделить все ряды наблюдений на две части: до 1994 г. и после него (первый год наблюдений — 1993 г., 1994 г. — последний год наблюдений), то для шести рядов (70436 р. Печора — с. Ермицы, 70499 р. Колва — с. Хорей-Вер, 70509 р. Ижма — с. Усть-Ухта, 70514 р. Ижма — с. Ижма, 70522 р. Ухта — г. Ухта, 70827 р. Печора — с. Оксина), гипотеза о статистическом равенстве средних значений по критерию Стьюдента отклоняется при уровне значимости $\alpha < 1\%$, т. е. с вероятностью более 99 %.

Вместе с тем, есть и индивидуальные особенности изменений. Так, на р. Печоре — д. Усть-Ковжа (70425) до 1994 г. имел место не стационарный режим, а монотонное падение уровней. Также особенные изменения средних значений уровней в виде трендов разной направленности имеют место на р. Ухте — г. Ухта (70522), где в первую часть ряда до конца 1960-х имело место монотонное падение уровней, а с 1980-х — устойчивый и продолжающийся их рост. Возможно, это связано с относительно небольшой площадью водосбора реки и усиливающимся антропогенным воздействием города Ухта. В створе р. Сулы — д. Коткино (70540) с 2010 г. имеет место резкое падение минимальных уровней, однако, продолжительность этого падения пока короткая, чтобы делать вывод о его статистической значимости.

Выполненные аналогичные исследования для трех видов высших уровней воды (H_{\max} , $H_{\text{лдж}}$, $H_{\text{затор}}$) показали, что эффективные нестационарные модели для аппроксимации этих временных рядов практически отсутствуют. Так, в рядах высших в году уровней воды H_{\max} при разных задаваемых годах начала ряда не было ни одного случая статистически значимых r или $\Delta > 10\%$.

Итоговая информация по оценке установленных климатических изменений в рядах экстремальных уровней воды и максимальных толщин льда приведена в табл. 3, где $K\sigma$ — знак и величина установленных изменений в долях от естественной изменчивости (σ), St — результат оценки стационарности средних значений двух частей временного ряда по критерию Стьюдента при годе разбивки ряда $T_{\text{стр}}$ и знак «+», если гипотеза стационарности или статистического равенства двух средних принимается при уровне значимости $\alpha = 5\%$ и знак «-», если отклоняется. Кроме того, рядом со знаком приведены численные значения уровня значимости (в %), соответствующие расчетному значению статистики критерия

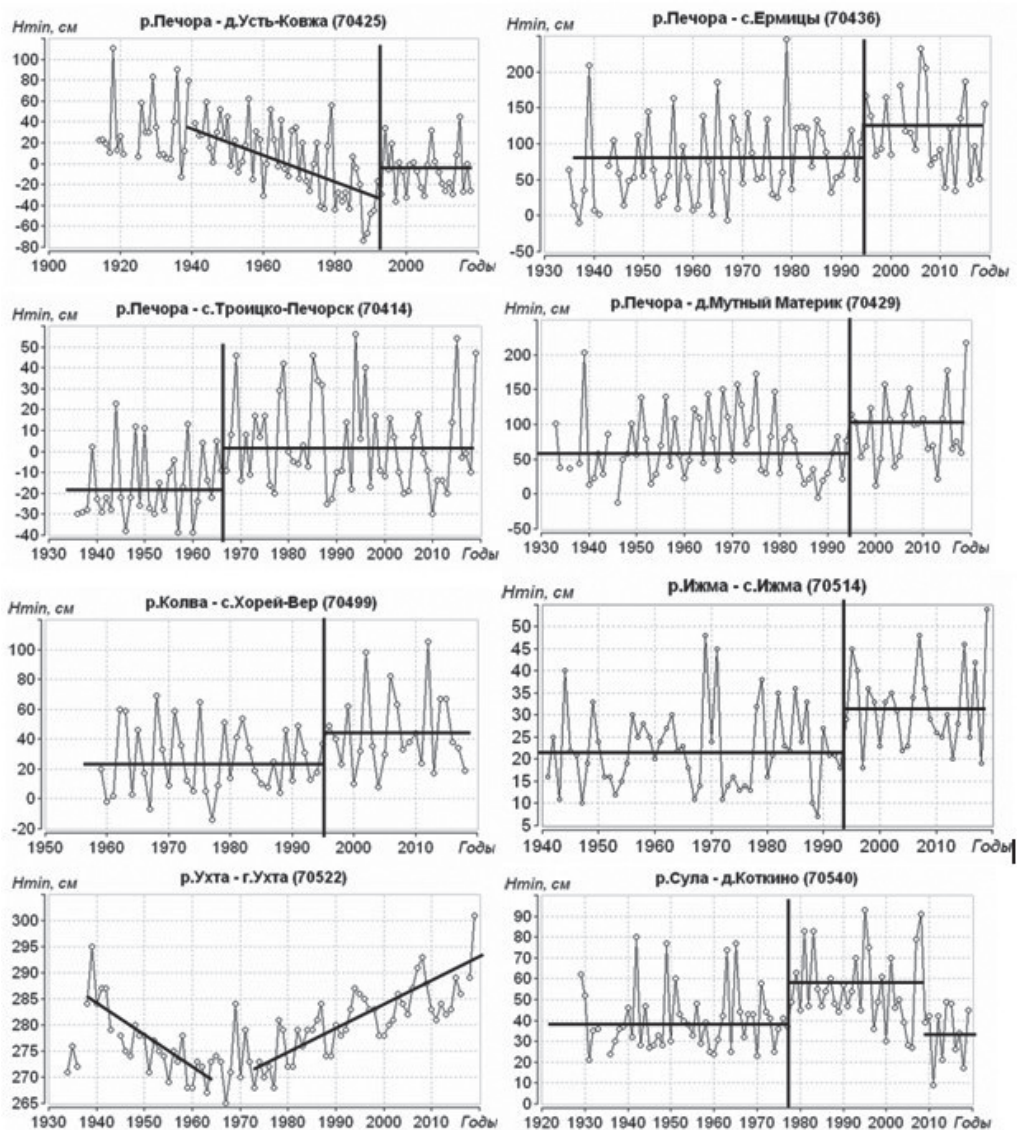


Рис. 2. Нестационарные ряды низших в году уровней воды.

Fig. 2. Non-stationary time series of annual low water levels.

Стьюдента (α_p), если он находился в пределах $1\% < \alpha < 10\%$ [21]. Если же численные значения отсутствуют и знак «+», то гипотеза стационарности принимается при $\alpha > 10\%$, а если знак «-», то гипотеза стационарности отклоняется при $\alpha < 1\%$. Также следует отметить, что статистически значимых изменений в дисперсиях рядов при проверке по критерию Фишера не установлено.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности и статистической значимости различий средних значений двух частей временного ряда для экстремальных уровней воды и максимальных толщин льда в створах рек бассейна Печоры

Results of assessment the efficiency and statistical significance of differences in the mean values of the two parts of the time series for extreme water levels and maximum ice thickness in the river gauges of the Pechora basin

Код	H_{\max}		H_{\min}		$H_{\text{лдж}}$		$H_{\text{затоп}}$		h_{\max}	
	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St
70425	+0,25	+	+1,00	-1,8	+0,13	+	+0,70	-2,6	-0,64	-1,1
70427	+0,18	+	-0,33	+	0	+	-0,60	+	+0,57	-
70410	-0,18	+	+0,49	-1,6	0	+	+0,77	+	-0,81	-
70436	-0,24	+	+0,72	-	-0,40	-4,2	-0,33	+	-1,33	-
70414	+0,40	+7,4	+0,90	-	+0,65	-	-0,04	+	-0,68	+6,0
70432	-0,05	+	-0,08	+	-0,48	-2,3			-0,72	-3,8
70570	-0,42	+	+0,63	+8,2	-0,37	+	-0,73	+	+0,46	+
70421	+0,08	+	-0,01	+	-0,30	+	-0,06	+	-0,77	-
70429	+0,11	+	+0,41	+9,1	+0,14	+			-1,27	-
70466	+0,24	+	-0,42	+6,1	+0,13	+	-0,63	+	-1,03	-
70494	-0,12	+	-0,07	+	-0,12	+	-0,18	+	-1,31	-
70499	+0,11	+	+0,73	-	+0,07	+			-1,44	-
70509	+0,42	-4,5	+0,69	-	+0,50	-3,5				
70514	-0,13	+	+1,02	-	-0,18	+	+0,18	+	-1,64	-
70522	+0,38	+	+1,43	-	+0,26	+	-0,30	+	-0,69	+5,6
70531	-0,06	+	+0,12	+	-0,15	+	-0,23	+	-1,04	-
70533	+0,03	+	+0,33	+	-0,04	+			-0,58	-1,4
70540	+0,27	+	+0,56	-1,8	-0,11	+	-0,39	+	-0,72	-
70827	+0,32	+	+0,74	-	-0,01	+	-0,02	+	-1,25	-
70850	+0,24	+	+0,28	-2,0	-0,51	-2,6			-0,62	-4,8

По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы:

— изменения средних значений высших в году уровней воды (H_{\max}) статистически не значимы (для пункта 70509 $\alpha_p = 4,5$ и близок к 5 %) и достигают в долях от σ максимум 0,40—0,42;

— для высших уровней весеннего ледохода ($H_{\text{лдж}}$) статистически значимые изменения средних имеют место в пяти случаях, причем в трех случаях средний уровень воды упал, а в двух — вырос, хотя α_p в четырех случаях > 1 %, и максимальное изменение средних значений для статистически значимого отличия составляет всего 0,65 σ ;

— высшие заторные уровни ($H_{\text{затоп}}$) имеют место не во всех пунктах и не в каждый год, поэтому из полученных 14 рядов, которые содержали не менее 15 случаев $H_{\text{затоп}}$ за многолетний период, установлен только один статистически значимый случай роста при $\alpha_p = 2,6$ % и при 0,70 σ ;

— для низших в году уровней воды, как более инерционной характеристики, нестационарные статистически значимые средние значения имеют место в половине случаев, что ранее следовало из данных табл. 2, причем во всех этих случаях

средние H_{\min} выросли, а наибольшие отличия в долях от естественной изменчивости достигают $0,9—1,07\sigma$;

— многолетние ряды максимальных толщин льда (h_{\max}) являются наиболее нестационарными и для них гипотеза о стационарности средних значений двух частей временного ряда отклоняется в 89 % случаев, причем толщины льда практически во всех случаях уменьшились (за исключением одного случая, когда толщина льда увеличилась, видимо, из-за локальных особенностей) и это уменьшение в половине случаев превышает естественную изменчивость и достигает $1,44—1,64$ от σ .

Отдельно было осуществлено моделирование и анализ изменений средних значений для дат начала ($T_{\text{нач}}$), окончания ($T_{\text{кон}}$) и продолжительности ($T_{\text{пер}}$) ледостава. Наглядные примеры нестационарных временных рядов приведены на рис. 3.

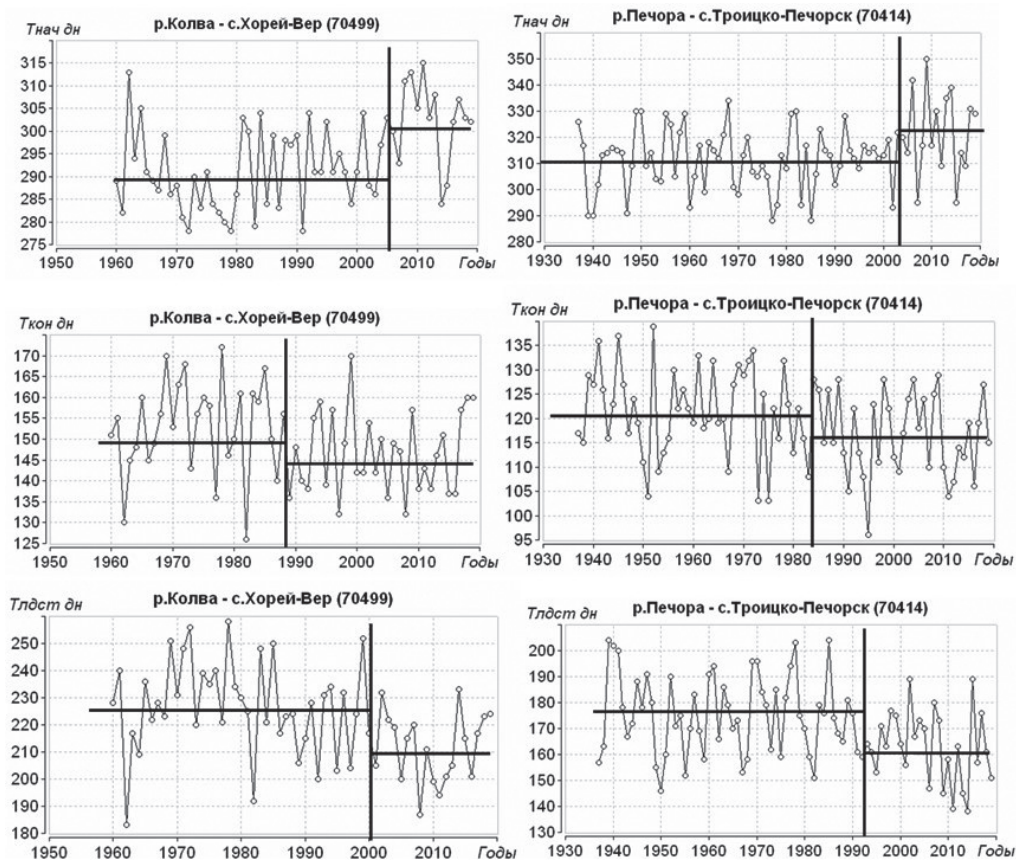


Рис. 3. Нестационарные ряды дат начала ($T_{\text{нач}}$), окончания ($T_{\text{кон}}$) и продолжительности ($T_{\text{пер}}$) ледостава.

Fig. 3. Non-stationary time series of dates of the beginning (T_{beg}), end (T_{end}) and duration (T_{per}) of freeze-up.

Выполненное моделирование временных рядов и оценка устойчивости параметров моделей показало, что эти характеристики существенно более нестационарны по средним значениям, чем высшие уровни воды и максимальные толщины льда. При этом в рядах $T_{\text{нач}}$, $T_{\text{кон}}$ и $T_{\text{пер}}$, как и видно из рис. 3, имеют место взаимосвязанные изменения: даты начала ледостава увеличиваются, т. е. сдвигаются к концу года, даты окончания ледостава уменьшаются, т. е. сдвигаются к началу года, и от этого продолжительность ледостава закономерно уменьшается.

Результаты моделирования при задании разного года начала временного ряда позволили установить, что показатели нестационарности увеличиваются при сдвиге начала ряда от прошлого к настоящему при максимумах для периода с 1980 г. для $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{пер}}$. Модели ступенчатых изменений во всех случаях эффективнее, чем модели линейного тренда и год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{\text{стр}}$) обычно относится к началу 2000-х гг. для $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{пер}}$ и к 1970—1980-м гг. для $T_{\text{кон}}$. Окончательные результаты количественной оценки полученных изменений в датах и продолжительностях ледостава приведены в табл. 4, где ΔT — дни изменения средних значений дат и периодов.

Таблица 4

Результаты оценки эффективности и статистической значимости различий средних значений двух частей временного ряда для дат начала, окончания и продолжительности ледостава в створах рек бассейна Печоры

The results of estimation the effectiveness and statistical significance of the differences in the average values of the two parts of the time series for the dates of the beginning, end and duration of freeze-up in the river gauges of the Pechora basin

Код	$T_{\text{нач}}$		$T_{\text{кон}}$		$T_{\text{пер}}$		ΔT дни		
	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$T_{\text{нач}}$	$T_{\text{кон}}$	$T_{\text{пер}}$
70425	0,44	–	0,31	+	0,52	–3,4	5	3	8
70427	0,44	–4,2	0,19	+	0,46	+	6	2	8
70410	0,81	–	0,37	+5,4	0,90	–	10	3	13
70436	0,59	+5,6	0,47	–3,4	0,71	–1,0	8	5	13
70414	0,76	–	0,44	–1,1	0,89	–	10	4	14
70432	0,62	–4,0	0,48	–4,4	0,73	–4,3	8	5	13
70570	0,83	–	0,34	+	0,95	–	11	3	14
70421	0,57	–1,1	0,59	–	0,82	–	7	6	13
70429	0,66	–	0,37	–2,9	0,73	–2,5	9	4	13
70466	0,67	–2,4	0,17	+7,5	0,56	–2,2	7	2	9
70494	0,63	–	0,42	–4,3			8	5	13
70499	1,11	–	0,46	–2,4	0,93	–	11	5	16
70509		–3,6		+					
70514	0,92	–	0,21	+	0,80	–	11	2	13
70522	0,66	–2,4	0,24	+	0,63	+9,3	8	2	10
70531	0,52	–4,5	0,29	+	0,58	+	6	3	9
70533	0,56	+7,6	0,50	+	0,71	+6,0	7	5	12
70540	0,74	–1,9	0,18	+	0,69	–1,6	9	2	11

Код	$T_{\text{нач}}$		$T_{\text{кон}}$		$T_{\text{пер}}$		ΔT дни		
	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$K\sigma$	St	$T_{\text{нач}}$	$T_{\text{кон}}$	$T_{\text{пер}}$
70827	0,50	+5,1	0,11	+	0,41	-4,5	6	1	7
70850	0,63	-	0,29	+	0,65	-3,8	8	3	11

Из результатов табл. 4 следует, что даты начала ледостава наблюдаются позже для всех пунктов, а статистически значимое различие средних двух частей ряда по критерию Стьюдента имеет место в 17 рядах из 20 (85 %), и в долях от естественной изменчивости достигая 1,11 σ . При этом начало ледостава отмечается позже на 5—11 дней (в среднем 8 дней), а дата окончания ледостава раньше всего на 1—6 дней (в среднем 3 дня) для створов в бассейне Печоры. Поэтому модели нестационарного среднего для рядов дат окончания ледостава эффективны только в 6 случаях (30%), причем в двух случаях $\alpha_p = 4,3$ — 4,4 %, т. е. близко к заданному $\alpha = 5$ %.

Низкая эффективность нестационарных моделей для рядов $T_{\text{кон}}$ приводит и к большим ошибкам определения года ступенчатых изменений, который часто относится к 1970-м гг., а не к началу 2000-х, как для $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{пер}}$. Отсюда и небольшие значения изменений средних в долях естественной изменчивости максимально достигающие всего 0,5 σ для $T_{\text{кон}}$.

Число случаев статистически значимых нестационарных рядов по средним значениям для продолжительности ледостава при оценке по критерию Стьюдента при $\alpha = 5$ % составляет 78 %, примерно такое же, как и для дат начала ледостава. При этом $K\sigma$ достигает 0,9—0,95, продолжительность ледостава уменьшилась в среднем на 11 дней при вариации от 7 до 16 дней.

Заключение

Выполненные детальные исследования многолетних рядов экстремальных уровней и показателей ледового режима в бассейне р. Печоры позволяют сделать следующие выводы.

1. Изменение климата, а возможно и антропогенное воздействие, по-разному влияют на разные по инерционности гидрологические характеристики. Так, в высших уровнях весеннего половодья (максимальных в году, весеннего ледохода, заторных высших уровнях) изменения практически не проявляются и многолетние колебания пока еще соответствуют модели стационарной выборки. Для инерционных характеристик, таких как показатели ледового режима рек и низшие уровни воды открытого русла, влияние изменения климата имеет место, и в большинстве случаев оно статистически значимо.

2. Оценка устойчивости показателей нестационарных моделей во времени позволила установить, что изменения средних значений начались только в 1970—1980-х гг., но наибольшее их проявление наблюдалось в конце 1990-х — начале 2000-х гг. в основном в виде ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому.

3. Наибольшие изменения имели место в максимальной толщине льда, которая хорошо связана с таким климатическим фактором, как суммы отрицательных температур, и эти изменения в половине случаев превысили СКО, а уменьшение максимальной толщины льда составило от 7—8 до 22—28 см в разных створах.

4. Даты начала ледостава сместились в сторону более поздних и стали позже в среднем на восемь дней, а даты окончания ледового периода на реках отмечаются раньше в среднем на три дня, что в результате уменьшило продолжительность ледостава на 11 дней. Даже, несмотря на то, что эти изменения составляют 5—8 % от общей продолжительности ледового периода на реках, они являются в большинстве случаев статистически значимыми.

5. Низшие уровни летне-осенней межени, сформированные истощением поверхностных и подземных вод, в основном выросли, и этот рост примерно в половине случаев является статистически значимым, хотя пока еще не превышает стандарт естественной изменчивости.

Список источников

1. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 247 с.
2. Нежиховский Р. А., Бузин В. А. Условия образования и прогнозы заторов льда на реках // Метеорология и гидрология. 1977. № 5. С. 70—75.
3. Бузин В. А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб., 2015. 240 с.
4. Бузин В. А., Горошкова Н. И., Стриженок А. В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55—61.
5. Терский П. Н., Панченко Е. Д., Горин С. Л., Агафонова С. А., Василенко А. Н., Куликова Ж. М., Попрядухин А. А., Алабян А. М. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017—2020 гг. // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 1006—1008. doi: 10.31857/S0030157421060162.
6. Стриженок А. В. Методика прогноза максимальных заторных уровней воды на реке Печора в условиях изменения климата // Труды V всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». М.: Издательство РГАУ—МСХА, 2016. С. 404—410.
7. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
8. Методы гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 167 с.
9. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
10. Лобанов В. А., Беликов В. Е. Определение расчетных гидрологических характеристик с учетом исторических максимумов // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 89—99.
11. ОД РФ-1 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М., Росгидромет, 2008. 227 с.; Т. 2. 288 с.
12. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. 1009 с.
13. Борщ С. В., Асарин А. Е., Болгов М. В., Полушин А. Я. Наводнения // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 87—125.
14. Гуревич Е. В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метеорология и гидрология. 2009. № 9. С. 92—99.
15. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата // Труды VI Всесоюзного гидрологического съезда. Секция 3 «Водный баланс, ресурсы поверхностных и подземных вод, гидрологические последствия хозяйственной деятельности и изменений климата: уязвимость и адаптация социально-экономической сферы». М.: Метеоагентство Росгидромета, 2007. С. 159—163.

16. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. М.: Наука, 1982. 271 с.
17. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 540 с.
18. Лобанов В. А., Тошакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 79—89. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-79-89.
19. Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
20. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 64 с.
21. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
22. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
23. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
24. Лобанов В. А., Кириллина К. С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография. СПб.: РГГМУ, 2019. 157 с.
25. Лобанов В. А., Горошкова Н. И. Характеристики ледового режима рек Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 86—98. doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
26. Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
27. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
28. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Когда наступит безледный режим регионов Арктики? // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 98—109. doi: 10.24412/2658-4255-2022-1-08-23.

References

1. Donchenko R. V. *Ledoviy rezhim rek SSSR = Ice regime of the rivers of the USSR*. Gidrometeoizdat, 1987: 247 p. (In Russ.).
2. Nezhovskiy R. A., Buzin V. A. Conditions for the formation and forecasts of ice jams on rivers. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1977;(5):70—75. (In Russ.).
3. Buzin V. A. *Zazhory i zatory l'da na rekakh Rossii = Ice jams and ice jams on the rivers of Russia*. St.Petersburg, 2015: 240 p. (In Russ.).
4. Buzin V. A., Goroshkova N. I., Strizhenok A. V. Maximum jam water levels in the northern rivers of Russia under conditions of climate change and anthropogenic impact on the process of jam formation. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2014;(12):55—61. (In Russ.).
5. Tersky P. N., Panchenko E. D., Gorin S. L., Agafonova S. A., Vasilenko A. N., Kulikova Zh. M., Popryadukhin A. A., Alabyan A. M. Studies of the winter regime of the mouths of the White Sea in 2017—2020. *Okeanologiya = Oceanology*. 2021; 61(6):1006—1008. (In Russ.).
6. Strizhenok A. V. Methodology for forecasting maximum water jam levels on the Pechora River under climate change. *Trudy V sserossiiskoi konferentsii «Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii» = Proceedings of the V All-Russian Conference "Ice and Thermal Processes in Water Bodies of Russia"*. Moscow: Publishing house of RGAU — MSHA, 2016: 404—410. (In Russ.).
7. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitel'stvu = Opredele niye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. SP 33-101-2003. A set of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics*. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004: 73 p. (In Russ.).
8. *Metody gidrologicheskikh raschetov pri vodokhozyaystvennom proyektirovanii. Methods of hydrological calculations in water management design*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 167 p. (In Russ.).
9. Rozhdestvenskiy A. V., Chebotarev A. I. *Statisticheskiye metody v gidrologii = Statistical methods in hydrology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 424 p. (In Russ.).
10. Lobanov V. A., Belikov V. Ye. Determination of calculated hydrological characteristics taking into account historical maximums. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2007;(2):89—99. (In Russ.).

11. *OD RF-1 Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. T. 1. Izmeneniya klimata = OD RF-1 Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. V. 1. Climate change.* Moscow: Roshydromet, 2008: 227 p. V. 2: 288 p. (In Russ.).
12. *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii = The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation.* Moscow, 2014: 1009 p. (In Russ.).
13. Borshch S. V., Asarin A. Ye., Bolgov M. V., Polunin A. Ya. *Navodneniya. Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem = Floods. Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems.* Moscow: Rosgidromet, 2012: 87—125. (In Russ.).
14. Gurevich Ye. V. Influence of air temperature on the winter runoff of rivers (on the example of the Aldan river basin). *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2009;(9):92—99. (In Russ.).
15. Shiklomanov I. A., Georgiyevskiy V. Yu. Changes in the runoff of Russian rivers under global climate warming. *Trudy VI Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s'yezda. Sektsiya 3 «Vodnyy balans, resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, gidrologicheskiye posledstviya khozyaystvennoy deyatel'nosti i izmeneniya klimata: uyazvimost' i adaptatsiya sotsial'no-ekonomicheskoy sfery» = Proceedings of the VI All-Union Hydrological Congress. Section 3 "Water balance, surface and groundwater resources, hydrological consequences of economic activities and climate change: vulnerability and adaptation of the socio-economic sphere".* Moscow: Meteorological Agency of Roshydromet, 2007: 159—163. (In Russ.).
16. Kritsky S. N., Menkel M. F. *Gidrologicheskiye osnovy upravleniya vodokhozyaystvennymi sistemami = Hydrological bases of management of water management systems.* Moscow: Nauka, 1982: 271 p. (In Russ.).
17. Sokolovsky D. L. *Rechnoy stok = River runoff.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968: 540 p. (In Russ.).
18. Lobanov V. A., Toshchakova G. G. Features and causes of modern climate change in Russia. *Geograficheskii vestnik = Geographic Bulletin.* 2016;3(38):79—89. (In Russ.).
19. Lobanov V. A., Shadurskiy A. Ye. *Vydeleniye zon klimaticheskogo riska na territorii Rossii pri sovremennom izmenenii klimata. Monografiya = Identification of climatic risk zones on the territory of Russia under current climate change. Monograph.* St. Petersburg: Russian State Humanitarian University, 2013: 123 p. (In Russ.).
20. *Rekomendatsii po privedeniyu ryadov rechnogo stoka i ikh parametrov k mnogoletnemu periodu = Recommendations for bringing river runoff series and their parameters to a multi-year period.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979: 64 p. [In Russian].
21. Zaks L. *Statisticheskoe otcenivanie = Statistical Evaluation.* Moscow: Statistica, 1976: 598 p. (In Russ.).
22. *Rekomendatsii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vremennykh kolebaniy rechnogo stoka = Recommendations on statistical methods for analyzing the homogeneity of spatial and temporal fluctuations in river runoff.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 78 p. (In Russ.).
23. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information.* St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
24. Lobanov V. A., Kirilina K. S. *Sovremennyye i budushie izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya) = Current and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia).* Monograph. St. Petersburg, RSHU. 2019: 157p. [In Russian].
25. Lobanov V.A., Goroshkova N.I. Characteristics of the ice regime of the rivers Sakha (Yakutia) and their climatic changes. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU.* 2019;(55):86—98. (In Russ.).
26. Shukri O. A. A., Lobanov V. A., Khamid M. S. *Sovremennyye i budushiy klimat Araviyskogo poluostrova = The current and future climate of the Arabian Peninsula.* Monograph. St. Petersburg, RSHU, 2018: 190 p. (In Russ.).
27. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. *Vliyaniye izmeneniya klimata na ledovyy rezhim Severnogo Kaspiya = Influence of climate change on the ice regime of the Northern Caspian.* Saint-Petersburg, Publishing House of the Russian State Humanitarian University, 2021: 140 p. (In Russ.).

28. Malinin V. N., Vainovsky P. A. When will the icefree regime of the Arctic regions come? *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2019;(56):98—109. (In Russ.).

Информация об авторах

Лобанов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. кафедры МКОА РГГМУ, (8)905-259-56-41, lobanov@EL6309.spb.edu.

Горошкова Наталья Ивановна — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГГИ, (8)911-769-47-08, goroshnat@yandex.ru.

Стриженок Анастасия Владимировна — мл. науч. сотр., ГГИ, (8)950-035-88-53, anastasiastrizhenok@mail.ru.

Семенова Дарья Артемиевна — ведущий инженер, ГГИ, (8)931-356-62-90, darya.dsa@yandex.ru.

Information about authors

Vladimir A. Lobanov, D-r of Sci. (Tech.), Senior Scientist, Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Natalia I. Goroshkova, PhD (Tech. Sci.), Senior Scientist, State Hydrological Institute (SHI).

Anastasia V. Strizhonok, junior researcher, State Hydrological Institute (SHI).

Darja A. Semionova, leading engineer, State Hydrological Institute (SHI).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 17.04.2022.

Принята к публикации после доработки 26.07.2022.

The article was received on 17.04.2022.

The article was accepted after revision on 26.07.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 452—462.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):452—462.

Научная статья
УДК 556.535.3(282.247.44)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-453-462

Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков рек Азербайджана

Айтан Руфат гызы Магеррамова

Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан,
meherremova.ayten@inbox.ru

Аннотация. Статья посвящена расчету максимальных расходов воды дождевых паводков рек Азербайджана по формуле предельной интенсивности. Уточнены все основные параметры данной формулы. Построена новая карта максимальных суточных осадков 1%-ной обеспеченности с использованием данных наблюдений за последние годы. Установлено, что время склонового добега для рассмотренных малых рек изменяется в пределах 52—200 мин. Значения сборного коэффициента стока составляет 0,20—0,40. Показано, что в результате уточнения параметров формулы предельной интенсивности медианное значение погрешностей расчета уменьшилось на 9 %.

Ключевые слова: дождевой паводок, максимальный расход воды, формула предельной интенсивности, коэффициент стока, время добега.

Для цитирования: Магеррамова А. Р. Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков рек Азербайджана // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 452—462. doi: doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-453-462.

Original article

Calculation of the maximum water discharges of flood in Azerbaijan rivers

Ayten Rufat Maharramova

Baku State University, Baku, Azerbaijan, meherremova.ayten@inbox.ru

Summary. The article is devoted to the calculation of the maximum water discharges of rain floods in the rivers of Azerbaijan, according to the formula of maximum intensity, which has been used by the country's design institutes for many years. It is noted that, as in all mountainous countries, the conditions for the formation of the maximum flow of river in Azerbaijan change depending on the altitudinal position of the river catchment. The maximum water discharges of rivers originating in the middle and high mountains (2000 m and more) are formed as a result of snow melting. With a decrease in the height of the catchment area, the role of rainwater increases, and the maxima of rain origin predominate in the regime of rivers. The article uses information on the maximum instantaneous water discharges of 19 rivers, the basins of which are located in different regions of Azerbaijan, morphometric indicators of these rivers and their watersheds, daily precipitation maxima, as well as a soil map at a scale of 1:500,000. All the main parameters of the maximum intensity formula have been refined: the values of the daily maximum precipitation of 1 %

exceedance probability, the runoff coefficient and the relative maximum runoff modulus of 1 % exceedance probability. Using data from 75 meteorological stations, a new map of maximum daily precipitation with 1 % exceedance probability was built. It has been established that the slope travel time for the considered small rivers varies within 52—200 minutes. The value of the runoff coefficient is 0.20—0.40. It is shown that by refining the main parameters of the maximum intensity formula, it was possible to improve the accuracy of calculations of the maximum water discharges of rain floods in the rivers of Azerbaijan. For the considered rivers, the calculation errors vary within 1—238 %. The median value of these errors is 38 %. For comparison, according to earlier calculations, these figures were 4—128 % and 47 %, respectively. Thus, as a result of refinement of the parameters of the maximum intensity formula, the median value of the calculation errors decreased by 9 %.

Keywords: rain flood, maximum water discharge, limiting intensity formula, runoff coefficient, travel time.

For citation: Maharramova A. R. Calculation of the maximum water discharges of flood in Azerbaijan rivers. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):452—462. (In Russ.). doi: doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-453-462.

Введение

В настоящее время в Азербайджане строятся новые автомобильные и железные дороги, возводятся мосты, проектируются солнечные и ветряные электростанции, в засушливых районах, подверженных наводнениям, расширяются посевные площади. Для реализации этих проектов требуется расчет максимальных расходов рек. В то же время на максимальный расход воды рек и временных водотоков влияют и антропогенные факторы (чрезмерный выпас скота в летних пастбищах, вырубка лесов и др.). Территория страны также очень чувствительна к изменению климата, и, несмотря на снижение годового количества осадков, увеличиваются частота паводков и максимальные расходы воды.

Как и во всех горных странах, условия формирования максимального расхода воды рек в Азербайджане изменяются в зависимости от высотного положения речного водосбора. Максимальные расходы воды рек, берущих начало в среднегорье и высокогорье (2000 м и более), образуются в результате таяния снега. С уменьшением высоты водосбора возрастает роль дождевых вод, и в режиме рек преобладают максимумы дождевого происхождения [1].

В ранее выполненных исследованиях, посвященных изучению дождевых паводков на реках Азербайджана, были выявлены особенности формирования паводков и составлена карта максимального стока [2], проанализировано количество паводков в течение года, время их прохождения, коэффициент паводочности [1], на стоковых площадках экспериментально изучены факторы максимального стока [3], установлены закономерности многолетних колебаний максимальных расходов воды [4].

Средний максимальный модуль стока рек по высотным поясам изменяется в пределах 5—500 л/с×км². В годы экстремальной водности максимальные расходы бывают в несколько раз больше (4870 л/с×км² на р. Тангерю, 3690 л/с×км² на р. Вешарю) [1].

Для расчета максимального расхода воды дождевых паводков неизученных рек Азербайджана предлагались зависимости максимального модуля стока от средней высоты водосбора [1, 5], иногда редуцированные формулы [6]. Формула предельной интенсивности использовалась лишь в нескольких работах [1, 7, 8]. Эту формулу в практических расчетах применяют и проектные институты страны.

Известно несколько типизаций расчетных формул максимального стока дождевых паводков. В бывшем СССР, а теперь и в России эти методы делятся на три основные группы: редуционные формулы, формулы предельной интенсивности стока и объемные формулы [9]. В методических указаниях Всемирной метеорологической организации по гидрологической практике выделяют две основные группы: эмпирические методы и методы, основанные на моделях «осадки—сток» [10].

Основой *эмпирических методов* являются экспериментальные связи между определенным показателем максимального стока (средняя многолетняя величина или расход воды определенной обеспеченности) и различными физико-географическими параметрами (площадь и средняя высота водосбора и т.д.). К этой группе относятся редуционные формулы, зависимости максимального модуля стока от средней высоты водосбора для однородных гидрологических районов, уравнения множественной регрессии. Геологическая служба США (USGS), Федеральное дорожное управление (FHWA) и Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям (FEMA) составили 2065 регрессионных уравнений для 289 однородных гидрологических районов. Из-за того, что ряды наблюдений часто бывают короткими, погрешности расчетов по этим уравнениям составляют 15—100 % [11].

В *группу методов, основанных на моделях «осадки—сток»*, входят рациональный метод и методы единичного гидрографа.

Известно, что, исходя из рационального метода, максимальный расход воды рассчитывается по интенсивности дождей редкой повторяемости. Этот метод, широко используемый в США и в других западных странах, соответствует методу предельной интенсивности. Основные недостатки метода предельной интенсивности (неточное определение скорости стекания воды и времени добегания, предельной интенсивности осадков и коэффициента стока) характерны и для рационального метода [12]. Несмотря на эти недостатки, рациональный метод считается простым и надежным, поэтому широко используется в гидрологических расчетах с 1850 г. [13].

Основная идея метода единичного гидрографа заключается в том, что при продолжительности эффективной части осадков, близкой к суткам, продолжительность вызываемых ими паводков примерно одинакова. После вычитания грунтовых вод ординаты таких гидрографов паводка пропорциональны слою паводочного стока. Позднее метод единого гидрографа был усовершенствован, и из гидрографов, рассчитанных по суточным максимальным осадкам, были получены единичные гидрографы, соответствующие дождям различной продолжительности. Для этого был разработан метод «S-гидрограф». Для построения как единичного гидрографа, так и S-гидрографа требуются данные о дожде и расходов воды, вызванного им паводка. Позже была выявлена взаимосвязь между параметрами единичного гидрографа и морфометрическими параметрами речного бассейна, и таким образом разработан метод синтетического единичного гидрографа [13].

Д.Л. Соколовский отмечал, что в ближайшей перспективе вместо разработки новых формул для расчета максимальных расходов воды следует уточнять странственные параметры, входящие в существующие формулы [12].

Действительно, приведенный выше краткий обзор существующих методов расчета максимального стока дождевых паводков показывает, что они были разработаны в середине XIX века (рациональный метод, редуционные формулы), в начале XX века (метод единичного гидрографа, формула предельной интенсивности) и до сих пор используются в мировой практике [14, 15].

Основная задача статьи — уточнение параметров формулы предельной интенсивности с целью повышения точности расчета максимальных расходов дождевых паводков на реках Азербайджана.

Материалы и методы исследования

В работе использована информация о максимальных мгновенных расходах воды 19 рек, бассейны которых расположены в разных регионах Азербайджана. Собраны данные по морфометрическим показателям этих рек и их водосборов. Выполнен анализ суточных максимумов осадков, а также почвенной карты масштаба 1:500000. В настоящее время в проектных институтах Азербайджана максимальные расходы дождевых паводков рассчитывается по формуле предельной интенсивности стока [16]. Уточнены основные параметры этой формулы, составлена новая карта суточного максимума осадков 1%-ной обеспеченности. Выполнена оценка погрешности вычислений.

Обсуждение результатов

До сих пор проектные организации Азербайджана для расчета максимального расхода дождевых паводков рек и временных водотоков используют нормативные документы, принятые в бывшем СССР [16]. Эти документы содержат два типа формул для расчета максимального расхода: формулы редуционного типа (эмпирические формулы) и формулы предельной интенсивности (полуэмпирические формулы). Учитывая, что зависимости $Q_{\max} = f(F)$ в Азербайджане выявлены для всех гидрологических районов [1, 6] и их применение не вызывает трудностей, в данном исследовании редуционные формулы не рассматривались.

В соответствии с вышеуказанными документами формула предельной интенсивности используется для расчета максимального расхода малых рек ($F < 100 \text{ км}^2$) со средней высотой водосбора в пределах 500—2000 м [16]:

$$Q_{p\%} = A_{1\%} \varphi H_{1\%} F \delta \lambda_{p\%}, \quad (1)$$

где $Q_{p\%}$ — максимальный мгновенный расход воды P %-ной обеспеченности; $A_{1\%}$ — максимальный модуль стока 1%-ной обеспеченности, выраженный в долях произведения $\varphi H_{1\%}$, т. е., $A_{1\%} = \frac{q_{1\%}}{\varphi H_{1\%}}$; φ — сборный коэффициент стока; $H_{1\%}$ —

максимальный суточный слой осадков 1%-ной обеспеченности; F — площадь водосбора; δ — коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды проточными озерами; $\lambda_{p\%}$ — переходный коэффициент от максимальных мгновенных расходов воды 1%-ной обеспеченности к максимальным расходам воды другой вероятности превышения.

Формула предельной интенсивности уже много лет используется в практике гидрологических расчетов. В 1970 г. эта формула была усовершенствована в Государственном гидрологическом институте и включена в нормативный документ, вступивший в силу в 1972 г. В справочной книге по поверхностным водным ресурсам Азербайджана также использовалась формула предельной интенсивности, но в другой форме записи [7].

Принципиальным положительным моментом формулы (1) является то, что коэффициент стока, включенный в предыдущий вариант формулы предельной интенсивности, был учтен с помощью «сборного коэффициента стока». Помимо выполнения роли коэффициента стока «сборный коэффициент стока» имеет также функцию привязки вычисленных значений максимального модуля стока к фактическим данным. «Сборный коэффициент стока» для равнинных рек рассчитывается отдельно для каждой реки по данным наблюдений в рассматриваемом гидрологическом районе, а полученные значения обобщаются по району. В связи со сложностью условий формирования максимального стока в горных районах отсутствует связь между «сборным коэффициентом стока» и средним уклоном водосбора [17]. По этой причине значения этого коэффициента даны по горным странам (Кавказ, Средняя Азия, Карпаты) и типам почв. Значения его для рек Кавказа колеблются от 0,10 (полупустынно-степные почвы) до 0,80 (бурые горно-лесные почвы) [16].

Сравнительный анализ значений максимальных расходов воды для 19 рек Азербайджана, рассчитанных по формуле предельной интенсивности и полученных в результате наблюдений, показал, что для большинства рек (16 рек) значения максимальных расходов воды, рассчитанные по формуле предельной интенсивности значительно выше рассчитанных величин (в среднем 58 %, максимум 128 %) [7]. Это связано с тем, что наблюдаемый (фактический) максимальный расход в бассейнах малых рек не в полной мере отражает их реальные значения.

М. А. Мамедов также применил формулу предельной интенсивности и пришел к выводу, что полученные результаты приемлемы с точки зрения практических расчетов [1]. Однако значения максимального расхода, рассчитанные по формуле (1) в 20 % случаев отличаются на 100 % и более от фактических данных наблюдений [17].

Для рек Азербайджана коэффициент δ , учитывающий снижение максимального расхода проточными озерами в формуле (1), принят за единицу, поскольку лишь в бассейнах нескольких рек (Агсучай, Шамкирчай) имеются такие озера. Для расчета максимального расхода воды 1 %-обеспеченности переходные коэффициенты ($\lambda_{p\%}$) также не требуются. С учетом вышесказанного, для модуля максимального стока 1%-ной обеспеченности ($q_{1\%}$) формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$q_{1\%} = A_{1\%} \varphi H_{1\%}. \quad (2)$$

Таким образом, основными параметрами формулы предельной интенсивности являются значения суточного максимального слоя осадков 1%-ной обеспеченности ($H_{1\%}$), коэффициент стока (φ) и относительный максимальный модуль стока 1%-ной обеспеченности ($A_{1\%}$).

Относительный максимальный модуль стока 1%-ной обеспеченности ($A_{1\%}$) определяется по гидроморфометрической характеристике русла и времени склонового добега. Для горных рек время склонового добега рекомендуется принимать равным примерно 10 мин, при этом отмечается, что этот параметр может быть уточнен по гидроморфометрической характеристике склона и номеру района, к которому относятся кривые редуции осадков [16].

Для каждой рассматриваемой реки пересчитано время склонового добега (табл. 1).

Таблица 1

Расчет максимальных расходов воды по формуле предельной интенсивности стока
Calculation of the maximum water discharges using the formula of maximum intensity

№	Река — пункт	F , км ²	$q_{1\%}$, л/с×км ²	Склоновое время добега, мин	$H_{1\%}$, мм	φ	$Q_{\text{макс}, 1\%}$, м ³ /с		Разница максимальных расходов воды	
							Набл.	Рассч.	м ³ /с	%
1	Чигаджугчай — Рустов	71,5	1,61	77	95	0,20	115	204	88,7	77
2	Дивичичай — Халфалар	132	1,29	74	95	0,20	170	401	231	136
3	Зоголовойчай — Мейсары	31,8	2,83	87	90	0,25	90	93	3	3
4	Дастафюрчай — Карагуллар	27,9	1,46	122	70	0,20	40,7	35,2	5,5	14
5	Дастафюрчай — Дастафюр	68,4	0,88	181	60	0,25	59,8	61,6	1,7	3
6	Гераньчай — Юхары Агджа-кенд	144	0,73	77	95	0,20	105	356	250	238
7	Инчай — Гюлистан	63	1,48	75	70	0,20	93,2	115	21,5	23
8	Турагайчай — Магавуз	162	0,87	126	75	0,20	140	207	66,5	47
9	Ахчай — Фильфили	99	1,49	75	75	0,20	148	223	75,3	51
10	Бумчай — Бум	96	1,20	76	75	0,20	115	216	101	88
11	Дамирапаранчай — Кутгашен (Габала)	126	1,11	97	70	0,20	140	212	71,8	51
12	Ахочай — Ханагя	66,4	1,96	138	75	0,25	130	112	18	14
13	Баллуджа — Баллуджа	77,1	0,91	128	70	0,20	70,2	97,1	26,9	38
14	Питикет — Бадара	24	1,79	119	70	0,30	43	45,4	2,4	6
15	Геоктепе — Пришиб	126	0,56	200	90	0,20	70,7	90,7	20	28
16	Маталачай — Халфалар	79,3	0,79	193	100	0,20	63	63,4	0,4	1
17	Вешарю — Даштатук	167	3,65	52	110	0,40	609	284	326	53
18	Тангерю — Ваго	153	4,83	87	130	0,30	739	716	23	3
19	Истисучай — Алаша	60	3,08	85	130	0,20	185	187	2,4	1

Как видно из табл. 1, расчетные значения времени склонового добега колеблются в пределах 52—200 мин. Следует отметить, что ранее при расчете максимального расхода воды время добега для всех 19 рек принималось равным 60 мин [7].

Таким образом, значения относительного максимального модуля стока 1%-ной обеспеченности были определены по уточненным значениям гидроморфометрической характеристики русла и времени склонового добега (табл. 1).

Для неизученных речных бассейнов очень сложно рассматривать трансформацию дождевых вод в речной сток на склонах водосбора и в русле по отдельности. Поэтому в формулах предельной интенсивности трансформация интенсивности формирования стока учитывается для всего бассейна, не выделяя его составляющих: коэффициент стока определяется как отношение слоя паводочного стока к слою дождя, выпавшего за период, равный времени склонового добега стока.

Значения «сборного коэффициента стока» для всего Кавказа даны для 11 типов почв, и они изменяются от 0,10 (для полупустынных почв) до 0,80 (для тяжелых глинистых бурых горно-лесных почв) [16]. Для рассматриваемых рек оценки данного коэффициента были определены по преобладающему типу почвы на водосборе. Эти значения изменяются в пределах 0,20—0,40 (табл. 1).

Определение *суточного количества осадков 1%-ной обеспеченности* является одним из наиболее важных этапов в расчете максимального расхода дождевых паводков. Самый надежный способ решить эту проблему — составить карту слоя осадков указанной обеспеченности. Используя данные по 75 метеорологическим станциям, были рассчитаны суточные слои осадков 1%-ной обеспеченности [18] и составлена новая карта для территории Азербайджана (рис. 1).

По этой карте для каждого речного водосбора были определены суточные максимумы осадков 1%-ной обеспеченности.

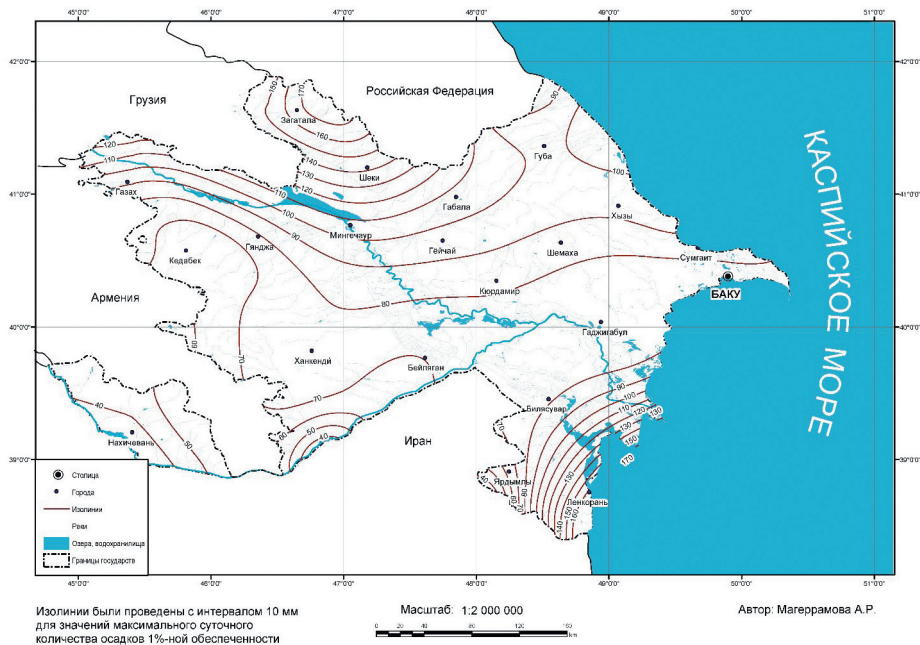


Рис. 1. Карта суточных максимумов жидких осадков 1%-ной обеспеченности.

Fig. 1. Map of daily maximum of liquid precipitation 1% probability.

По уточненным параметрам ($A_{1\%}$, ϕ и $H_{1\%}$) рассчитаны максимальные расходы рассматриваемых рек (табл. 1). Погрешности расчета максимальных расходов воды колеблются в пределах 1—238 %, а медианное значение погрешностей составляет 38 %. Для сравнения с ранее выполненными расчетами, укажем, что эти цифры составляли соответственно 4—128 и 47 % [7].

Выводы

Путем уточнения основных параметров формулы предельной интенсивности удалось повысить точность расчетов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Азербайджана. Для 19 рассмотренных рек погрешности расчета изменяются в пределах 1—238 %. Медианное значение этих погрешностей составляет 38 %. Эта на 9 % меньше по сравнению с результатами расчетов с использованием формулы с неуточненными параметрами.

Список источников

1. Мамедов М. А. Расчеты максимальных расходов воды горных рек. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 184 с.
2. Рустамов С. Г. Карта максимального стока рек Азербайджана // Атлас Азербайджанской ССР. Баку—Москва, 1963. С. 73.
3. Махмудов Р. Н. Прогноз дождевых паводков горных рек Азербайджана. Баку: Зия, 2001. 230 с.
4. Иманов Ф. А., Гасанова Н. И. Многолетние колебания максимального стока горных рек // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 9. С. 40—45.
5. Гаджиева Н. Н. Паводковые реки Азербайджана и роль дождевых вод в их питании // Новости Бакинского университета. Серия естественных наук. 2004. № 4. С. 196—202.
6. Гумбатова Ш. Ю. Расчет максимального стока рек Гобустана // Труды Азербайджанского географического общества. Том XIV. Баку, 2009. С. 366—370.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 9, Вып. 4. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 228 с.
8. Мансимов М. Р., Мусаева М. А. Методика расчета гидрологических характеристик неизученных рек южного склона Большого Кавказа (на примере бассейна реки Балаканчай) // Водные проблемы, наука и технологии. Баку, 2021. № 2 (18). С. 44—57.
9. Владимирова А. М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 265 с.
10. ВМО-№ 168. Руководство по гидрологической практике. Том II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. 2012. 324 с.
11. Jennings M. E., Thomas W. O., Riggs H. C. Nationwide summary of U.S. Geological Survey regional regression equations for estimating magnitude and frequency of floods for ungaged sites. Water-Resources Investigations Report 94-4002, United States Geological Survey, Reston, VA, 1994.
12. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 539 с.
13. David A. Chin. Water-resources Engineering (Second edition). Pearson education International. USA, New Jersey, 2006. 572 p.
14. Белоногова Н. А., Виноградов А. Ю., Виноградова Т. А., Догановский Д. А., Кондратьев А. Н., Марков М. Л., Минаев А. Н., Мотовилов Б. Л., Никитина И. С., Салминен Э. О. О времени добега и гидроморфометрических характеристиках водотоков при расчетах ливневых паводков на малых неизученных реках лесной зоны // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 91—107.
15. Дускаев К. К., Чигринцев А. Г., Мусина А. К., Жанабаева Ж. А., Ахметова С. Т., Ермаш Е. К. Оценка максимальных расходов воды рек города Алматы // Гидрометеорология и экология. 2019. № 2. С. 96—110.

16. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 447 с.
17. Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 340 с.
18. Магеррамова А. П. Анализ распределения максимальных суточных осадков на территории Азербайджана // Известия Бакинского университета. Серия естественных наук. 2017. № 2. С. 131—142.

References

1. Mamedov M. A. *Raschety maksimal'nykh raskhodov vody gornyykh rek = Calculations of the maximum water flow in mountain rivers*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 184 p. (In Russ.).
2. Rustamov S. G. Map of the maximum runoff of the rivers of Azerbaijan. *Atlas Azerbaidzhanskoi SSR = Atlas of the Azerbaijan SSR*. Baku—Moscow, 1963: 73. (In Russ.).
3. Makhmudov R. N. *Prognoz dozhdevykh pavodkov gornyykh rek Azerbaidzhana = Forecast of rain floods in the mountain rivers of Azerbaijan*. Baku: Ziya, 2001: 230 p. (In Russ.).
4. Imanov F. A., Gasanova N. I. Long-term fluctuations of the maximum runoff of mountain rivers. *Uchenye zapiski Rossiiskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2009;(9):40—45. (In Russ.).
5. Gadzhieva N. N. Flood rivers of Azerbaijan and the role of rainwater in their nutrition. *Novosti Bakinskogo Universiteta. Seriya po estestvennym naukam = News of the Baku University. Natural Sciences Series*. 2004;4:196—202. (In Azerb.).
6. Gumbatova Sh. Yu. Calculation of the maximum runoff of the rivers of Gobustan. *Trudy Azerbaidzhanskogo geograficheskogo obshchestva. Tom XIV = Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society. Volume XIV*. Baku, 2009:366—370. (In Azerb.).
7. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 9, Vyp. 4 = Resources of surface waters of the USSR. Vol. 9, Issue 4*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971: 228 p. (In Russ.).
8. Mansimov M. R., Musaeva M. A. Method for calculating the hydrological characteristics of unexplored rivers of the southern slope of the Greater Caucasus (on the example of the Balakanchay river basin). *Vodnye problemy, nauka i tekhnologii = Water problems, science and technology*. Baku, 2021; 2(18):44—57. (In Russ.).
9. Vladimirov A. M. *Gidrologicheskie raschety = Hydrological calculations*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990: 265 p. (In Russ.).
10. *VMO-№ 168. Rukovodstvo po gidrologicheskoi praktike. Tom II. Upravlenie vodnymi resursami i praktika primeneniia gidrologicheskikh metodov = WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Water resources management and practice of application of hydrological methods*. 2012: 324 p. (In Russ.).
11. Jennings M. E., Thomas W. O., Riggs H. C. Nationwide summary of U.S. Geological Survey regional regression equations for estimating magnitude and frequency of floods for ungaged sites. *Water-Resources Investigations Report 94-4002*, United States Geological Survey, Reston, VA, 1994.
12. Sokolovskii D. L. *Rechnoi stok = River runoff*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968: 539 p. (In Russ.).
13. David A. Chin. *Water-resources Engineering (Second edition)*. Pearson education International. USA, New Jersey, 2006: 572 p.
14. Belonogova N. A., Vinogradov A. Y., Vinogradova T. A., Doganovskiy D. A., Kondratyev A. N., Markov M. L., Minayev A. N., Motovilov B. L., Nikitina I. S., Salminen E. O. On the travel time and hydromorphometric characteristics of watercourses in the calculation of flash floods on small unexplored rivers in the forest zone. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii = Bulletin of the St. Petersburg Forestry Engineering Academy*. 2016;(217):91—107. (In Russ.).
15. Duskayev K. K., Chigrinets A. G., Musina A. K., Janabaeva J. A., Axmerova S. T., Yermash E. K. Estimation of the maximum water flow of the rivers of the city of Almaty. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2019; (2):96—110. (In Russ.).
16. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik = Manual for the determination of calculated hydrological characteristics*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 447 p.

17. Evstigneev V. M. *Rechnoi stok i gidrologicheskie raschety = River flow and hydrological calculations*. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1990: 340 p.
18. Magerramova A. R. Analysis of the distribution of maximum daily precipitation in the territory of Azerbaijan. *Izvestiia Bakinskogo Universiteta. Seriya estestvennykh nauk = Bulletin of the Baku University. Series of Natural Sciences*. 2017;(2):131—142.

Информация об авторе

Магеррамова Айтан Руфат гызы — преподаватель кафедры гидрометеорологии, Бакинский государственный университет, meherremova.ayten@inbox.ru.

Information about the author

Aytan Rufat Maharramova — Lecturer of the Department of Hydrometeorology, Baku State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.05.2022.

Принята к публикации после доработки 28.07.2022.

The article was received on 20.05.2022.

The article was accepted after revision on 28.07.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 463—477.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):463—477.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.461.25:[551.465.7:551.513](265)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477

Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание

Валерий Николаевич Малинин, Максим Алексеевич Смирнов

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
malinin@rshu.ru

Аннотация. В статье обсуждаются особенности межгодовых колебаний уровня океана в экваториальной зоне Тихого океана по спутниковой альтиметрии за период 1993—2019 гг. с использованием базы данных AVISO (Франция). Выполнен расчет линейных трендов уровня океана в узлах сетки архива AVISO и показано, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают +5,2 мм/год. Показано, что во время Эль-Ниньо уровень в восточной части экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья отмечается обратная картина. При этом разница высот уровня океана между его западной и восточной частью составляет 350 мм. В центрах наибольших аномалий уровня выбрано 2 разреза. Повышение уровня в западном разрезе характеризует Южное колебание в фазе Ла-Нинья (SL_{SO}), в восточном — Эль-Ниньо (SL_{EN}). Их разность $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$ представляет явление Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) в целом. Показана высокая корреляция этих индексов с индексами ЭНЮК.

Ключевые слова: Эль-Ниньо, Южное колебание, уровень океана, тренды, индексы уровня.

Для цитирования: Малинин В. Н., Смирнов М. А. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 463—477. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477.

OCEANOLOGY

Original article

Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean

Valerii N. Malinin, Maksim A. Smirnov

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, malinin@rshu.ru

Summary. The article discusses the features of interannual sea level fluctuations in the near-equatorial zone of the Pacific Ocean based on satellite altimetry for the 1993—2019 period using the AVISO database (France). The calculation of the linear trends of the sea level at the grid nodes of the AVISO archive has

been performed, showing that the source with the highest trend estimates is located near the southern coast of Indonesia, where its estimates reach 5.2 mm/year. During El Niño the level is shown to rise in the central and eastern parts of the equatorial zone of the ocean, while in the western part it decreases. During La Niña, the picture is reversed. In this case, the spatial gradient in the sea level is 350 mm. Noticeable positive and negative centers of level anomalies have been revealed in most of the Pacific Ocean.

Two meridional sections for the centers of the sources were selected by seven points of level anomalies. The western one characterizes the southern oscillation in the form of the La Niña phenomenon (SL_{SO}), the eastern one characterizing El Niño (SL_{EN}). Their difference $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$ represents the ENSO phenomenon as a whole. A high correlation of these indices with the ENSO indices was shown. Then, a 14×27 matrix with anomalies of the annual level was formed, followed by its decomposition using the method of principal components (PC). The first principal component describes over 80 % of the initial field dispersion and is almost functionally ($r = 0.99$) related to SL_{ENSO} . The advantage of the first PC of the interannual level variability in the ENSO domain over SL_{ENSO} is that it is less affected by the random errors in sea level estimates that prevail in the younger PCs. Therefore, the first PC can be considered as an index that adequately characterizes the interannual sea level variability in the ENSO region.

Keywords: El Niño, Southern Oscillation, sea level, trends, level indices.

For citation: Malinin V. N., Smirnov M. A. Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of 4 Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):463—477. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477.

Введение

Приэкваториальная область Тихого океана, в которой наблюдаются события Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК), является уникальным гидрометеорологическим объектом. Она представляет собой самую крупную и наиболее мощную энергоактивную зону Мирового океана, которая имеет исключительно важное влияние на формирование долгопериодных колебаний погоды и короткопериодные колебания климата [1]. При этом посредством атмосферных дальних связей ЭНЮК может в значительной степени влиять на климатическую изменчивость далеко за пределами Тихого океана. Подробный анализ дальних связей ЭНЮК с климатическими процессами за его пределами обсуждается в работе [2].

Несмотря на длительную историю исследований ЭНЮК, механизм формирования и особенно прогноз Эль-Ниньо и обратного ему явления Ла-Нинья остается одной из важнейших современных научных задач, которая не решена до сих пор [3—8 и др.]. Однако, не вызывает сомнений, что основной причиной формирования ЭНЮК являются пассаты в экваториальной циркуляционной ячейке Уокера [9]. Интенсивность пассатов характеризует Южное колебание, для оценки которого используется индекс SOI (South Oscillation Index). Данный индекс рассчитывается как разность атмосферного давления между о. Таити и г. Дарвин (север Австралии). При больших положительных значениях SOI (явление Ла-Нинья) пассаты усиливаются, что приводит к значительному нагону более теплых поверхностных вод к побережью Индонезии и понижению здесь атмосферного давления. В это время у восточного побережья океана происходит сгон вод, усиление Перуанского апвеллинга, охлаждение поверхностных вод и повышение атмосферного давления в районе экватора (рис. 1 б). При отрицательных значениях SOI (явление Эль-Ниньо) наблюдается обратная ситуация. Пассаты резко ослабевают, давление над Индонезией повышается, огромные массы теплой воды в виде волны Кельвина устремляются на восток. В результате ТПО в центральной и

восточной части экваториальной зоны повышается на несколько градусов. У восточного побережья океана большая часть этих вод поворачивает на юг и покрывает область апвеллинга (рис. 1 а). Поэтому поверхностная температура здесь повышается на 3—5 °С, что приводит к понижению биологической продуктивности, гибели планктона, рыб, особенно наиболее массового вида – анчоуса, птиц и т.п.

Понятно, что при нагоне вод к Индонезии (явление Ла-Нинья) и уменьшении атмосферного давления уровень моря должен здесь повышаться (принцип обратного барометра). У побережья Америки и в восточной части экваториальной зоны океана при сгоне вод и повышении атмосферного давления уровень, наоборот, должен уменьшаться. При явлении Эль-Ниньо уровень моря ведет себя

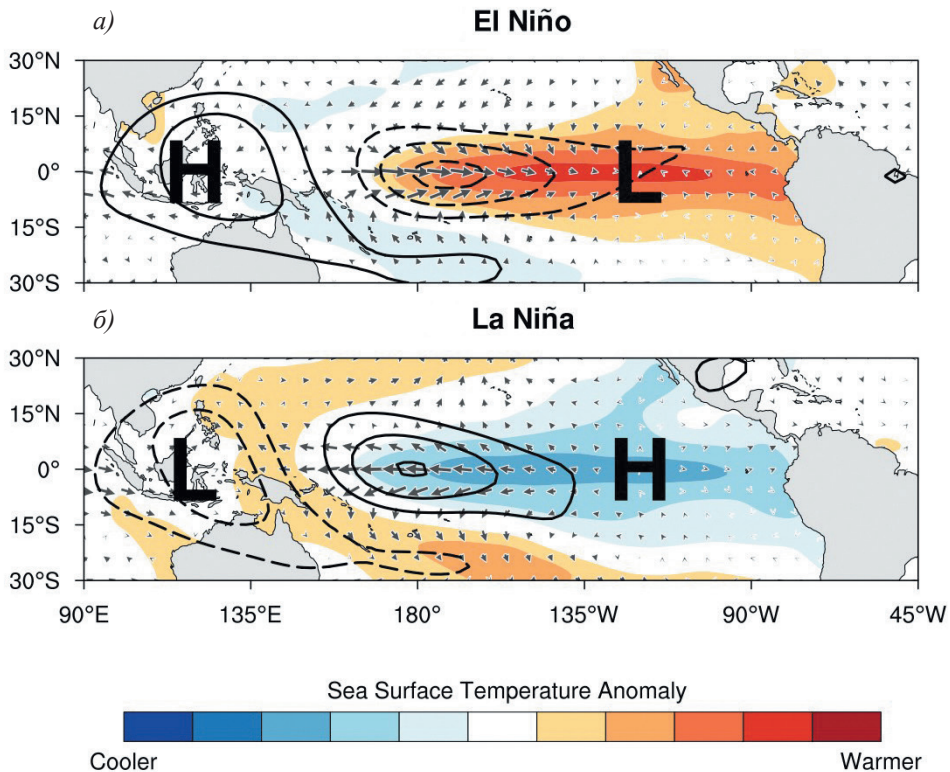


Рис. 1. Схематическая диаграмма, показывающая физические механизмы формирования явлений Эль-Ниньо (а) и Ла-Нинья (б).

Стрелки показывают направление ветра в приводном слое,
H и *L* – центры высокого и низкого атмосферного давления [15], <https://psl.noaa.gov/enso/mei>.

Fig. 1. Schematic diagram showing the physical mechanisms of the formation of the El Niño (a) and La Niña (b) phenomena.

The arrows show the wind direction in the near-water layer,
H and *L* are the centers of high and low atmospheric pressure [15], <https://psl.noaa.gov/enso/mei>.

противоположным образом. К сожалению, количественные оценки взаимосвязи морского уровня с явлениями Эль-Ниньо / Ла-Нинья малоизучены. Можно упомянуть лишь работу [10], в которой на основании расчетов по альтиметрическим данным за 1993—2010 гг. указывается, что в периоды интенсивного Эль-Ниньо абсолютная величина уровня моря на востоке достигает плюс 35 см, а на западе минус 25 см. В зарубежных исследованиях в основном рассматриваются десятилетние изменения уровня, его тренды и факторы их обуславливающие [11—14 и др.].

Целью данной работы являлось выявление закономерностей межгодовой изменчивости уровня океана в тропической зоне Тихого океана (20° с.ш. — 20° ю.ш.) по архиву спутниковой альтиметрии AVISO за период 1993—2019 гг. и оценке их взаимосвязи с явлениями Эль-Ниньо / Ла-Нинья.

Материалы и методы

Основой для выполнения расчетов послужила информация из трех баз данных, две из которых содержат натурные альтиметрические наблюдения за уровнем моря, а третья представляет каталог индексов, характеризующих ЭНЮК. База спутниковой лаборатории NOAA/NESDIS/STAR (Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Level Rise) [16] включает среднемесячные альтиметрические оценки уровня 6 морей Тихого океана (Берингово, Охотское, Японское, Желтое, Южно-Китайское и Индонезийское), а также для района N_{3+4} за период с 1992 г. по настоящее время.

База AVISO [17] позволяет использовать оценки аномалий уровенной поверхности океана относительно их среднемноголетних значений в каждом узле с пространственным разрешением $0,25^\circ$ по широте и долготе. Исходные альтиметрические данные покрывают океан от 66° с.ш. до 65° ю.ш., имеют дискретность примерно 9,9 сут и точность расчета — 4,2 см. Неопределенности оценок морского уровня обусловлены методическими аспектами преобразования необработанных спутниковых измерений в реальные оценки морского уровня, необходимостью учета атмосферных условий, ветровых волн и приливов, а также гляциоизостатического приспособления, в результате чего происходит некоторое увеличение площади океанских бассейнов из-за отступления суши в конце последнего ледникового периода. Приблизительно скорость их увеличения оценивается в $-0,3$ мм/год с ошибкой не менее 50 % [18]. В работе использовались данные по уровню акватории Тихого океана от 100° в.д. до 70° з.д. и от 80° ю.ш. до 80° с.ш. с 1993 г. по 2019 г.

Сопоставление годовых значений уровня двух указанных выше архивов для района N_{3+4} за период 1993—2019 гг. показало определенное отличие в оценках тренда. Согласно AVISO тренд составляет 2,11 мм/год, а по данным NOAA/NESDIS/STAR — 3,07 мм/год. Межгодовая изменчивость уровня по коэффициенту вариации почти одинакова, а корреляция между временными рядами составляет $r = 0,74$.

Дополнительно к работе привлекался архив NOAA, Physical Sciences Laboratory [19], который содержит каталог из 16 индексов, описывающих с различными

сторон явление ЭНЮК (*MEI.v.2*; N_4 ; N_{3+4} ; N_3 ; N_{1+2} ; ONI; BEST; *SOI*; TNI; PDO; PNA; OLR; Heat Content; 850 mb Zonal Winds; 200 mb Zonal Winds; ESPI Precip Index).

Из указанных индексов наиболее универсальным очевидно считается MEI (multivariate ENSO index) [20]. Это комплексный индекс, представляющий собой первую главную компоненту из шести метеорологических и океанологических параметров: давление на уровне моря, зональные и меридиональные компоненты поверхностного ветра, температура поверхности моря, температура поверхностного воздуха и облачность, среднемесячные значения которых выбираются из архива ICOADS с 1950 г. В последующем была разработана его 2 версия (*MEI.v.2*), в которой вместо температуры воздуха и облачности использовано исходящее длинноволновое излучение [15] <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>. Значения *MEI.v.2* рассчитываются по архиву реанализа JRA-55 с 1980 г. Отметим, что хотя указанные выше индексы основаны на большом числе различных параметров взаимодействия в системе океан—атмосфера, однако ни один из них не учитывает аномалии уровня океана. Как показано выше, уровень океана имеет значение при формировании явлений Эль-Ниньо / Ла-Нинья.

Основой для расчетов служит аддитивная модель межгодовых изменений временного ряда в следующем виде:

$$X(t) = Tr(t) + C(t) + P(t), \quad (1)$$

где $Tr(t)$ — трендовая составляющая; $C(t)$ — циклическая компонента, характеризующая регулярные (циклические) межгодовые колебания; $P(t)$ — остаточная часть, характеризующая нерегулярные (случайные) межгодовые колебания. Сумма трендовой и циклической компонент означает детерминированную часть разложения (1), которая поддается интерпретации и строго описывается статистическими методами. Методы расчета и оценивания указанных компонент приводятся в работе [21].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приводится пространственное распределение среднегодовых аномалий уровня поверхности (УП) и их тренда в широтной зоне 20° с.ш. — 20° ю.ш. Тихого океана за период 1993—2019 гг. Как видно из рис. 2 а, различия в оценках УП прослеживаются в основном в широтном направлении, но они невелики. Максимальное расхождение составляет 24 мм, при этом максимальное значение УП отмечается в районе N_{3+4} (47 мм), а минимальное около побережья Индонезии (23 мм).

Из распределения трендов (рис. 2 б) видно, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают $+5,2$ мм/год. В центральной и восточной части рассматриваемой акватории оценки тренда практически одинаковы и равны примерно $+2,2$ мм/год. Отметим, что карта на рис. 2 б принципиально близка к аналогичным картам распределения тренда уровня, полученными другими авторами [22—25 и др.], однако абсолютные оценки тренда на рис. 2 б несколько занижены. Отметим, что при сохранении

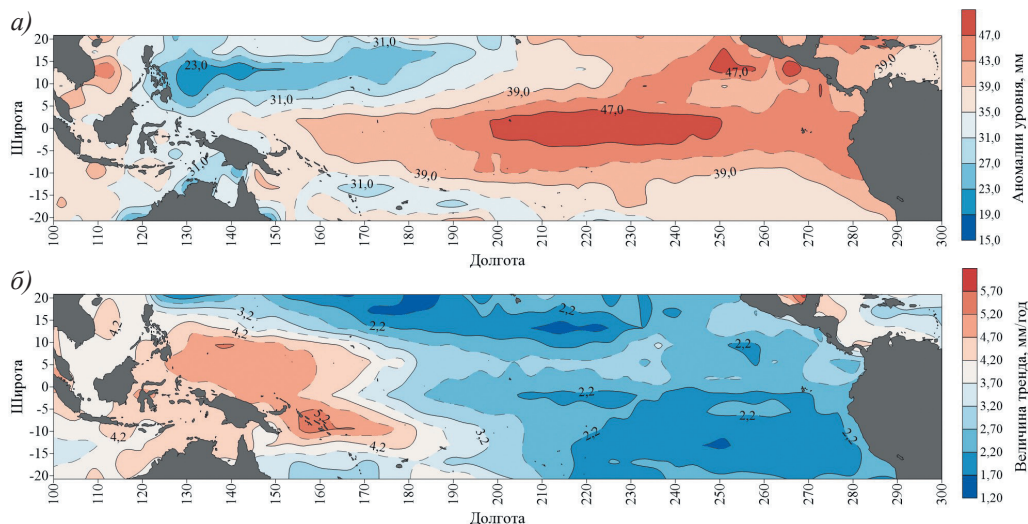


Рис. 2. Пространственное распределение среднегодовых аномалий уровня поверхности (а) и их тренда (б) в широтной зоне 20° с.ш. — 20° ю.ш. Тихого океана за период 1993—2019 гг. по данным архива AVISO.

Fig. 2. Spatial distribution of the average annual anomalies of the sea level surface (a) and their trend (b) in the latitudinal zone 20° N — 20° S of the Pacific Ocean for 1993—2019 according to the AVISO archive.

современных темпов роста уровня уже через 10 лет аномалии УП на всей акватории широтной зоны 20° с.ш. — 20° ю.ш. станут примерно одинаковыми.

Можно отметить наличие высокой корреляции годовых значений уровня океана в районе N_{3+4} после удаления линейного тренда с ТПО в данном районе ($r = 0,80$), а также с другими индексами ЭНЮК ($MEI.v.2$; $Nino_4$; $Nino_3$; $Nino_{1+2}$; ONI ; SOI). При этом экстремальные положительные оценки уровня совпадают с максимумами Эль-Ниньо, а отрицательные — с Ла-Нинья. Из временного ряда $MEI.v.2$ было выделено 3 года с наибольшими оценками Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2007, 2010). Для этих 6 лет строились карты аномалий УП Тихого океана. Далее выполнялось осреднение аномалий УП за 3 года для Эль-Ниньо и Ла-Нинья. После этого из оценок УП для Эль-Ниньо вычитались аналогичные оценки для Ла-Нинья.

На рис. 3 представлена карта пространственного распределения разности аномалий годовых значений уровня Тихого океана для 3 лет наибольших значений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. По сути, данная карта характеризует диапазон межгодовых изменений уровня между указанными явлениями. Во время Эль-Ниньо УП в центральной и восточной части экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья картина обратная. Как видно из рис. 3, пространственный градиент в аномалиях уровня океана является огромным и составляет 330 мм (> 150 мм в центре зоны и < -180 мм на ее западе).

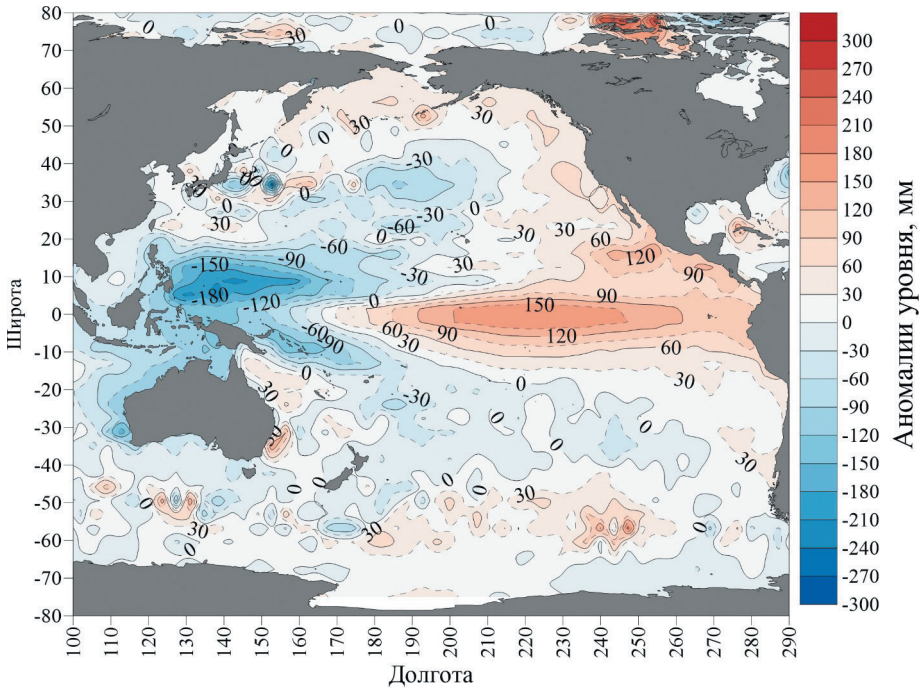


Рис. 3. Пространственное распределение разности аномалий годовых значений уровня при Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2007, 2010) для Тихого океана.

Fig. 3. Spatial distribution of the difference of anomalies of annual level values at El Niño (1997, 2009, 2015) and La Niña (2000, 2007, 2010) for the Pacific Ocean.

Можно отметить также вытянутый в меридиональном направлении очаг положительных аномалий уровня вдоль побережья Америки от Аляски до Мексики, где отмечается их максимум (≈ 120 мм). Кроме того, локальные очаги аномалий УП (30—60 мм) свойственны и другим районам океана, особенно в северном полушарии. В южном полушарии подобные очаги выражены слабее. В Перуанском апвеллинге аномалии уровня составляют примерно 30 мм. Таким образом, влияние ЭНЮК распространяется на УП большей части Тихого океана.

Исходя из полученных результатов, в центрах очагов аномалий УП было выбрано 2 разреза. Западный разрез имеет координаты 137° в.д. и $5\text{--}10^\circ$ с.ш., а центрально-восточный — 221° з.д. и $2,5^\circ$ с.ш. — $2,5^\circ$ ю.ш. На западном разрезе повышение уровня океана происходит при событиях Ла-Нинья (SL_{LA}), а в восточном — при Эль-Ниньо (SL_{EN}). При этом экстремальные оценки уровня отмечаются в основном через месяц экстремумов Ла-Нинья и Эль-Ниньо. Для указанных разрезов были сформированы временные ряды аномалий среднемесячных значений уровня за период 1993—2019 гг., а также ряд их разности $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{LA}$, который представляет явление ЭНЮК (ENSO) в целом.

В табл. 1 приводятся оценки коэффициентов корреляции среднемесячных и годовых значений этих рядов с индексами ЭНЮК, которые являются значимыми при $\alpha = 0,05$. Как и следовало ожидать, наиболее высокая корреляция с индексами ЭНЮК имеет SL_{ENSO} . Максимальная корреляция отмечается с основным индексом ЭНЮК N_{3+4} ($r = 0,91$). Во всех случаях, корреляция для годовых значений выше, чем для среднемесячных значений. Уровненный индекс SL_{LA} имеет самую высокую корреляцию с SOI ($r = 0,85$), а SL_{EN} — с N_{3+4} ($r = 0,89$). Для среднемесячных значений уровненных индексов были рассчитаны оценки взаимнокорреляционной функции с индексами SOI и $N_{3,4}$. Выявлено, что максимальная корреляция отмечается при запаздывании на 1 месяц SL_{EN} и SL_{ENSO} от $N_{3,4}$, а SL_{SO} от SOI . Отсюда следует, что индексы SL_{ENSO} , SL_{EN} и SL_{SO} можно рассматривать как реакцию уровневой поверхности океана на явление ЭНЮК.

Таблица 1

Оценки коэффициентов корреляции среднемесячных и среднегодовых значений временных рядов SL_{ENSO} , SL_{EN} и SL_{SO} с индексами ЭНЮК за 1993—2019 гг.

Estimates of correlation coefficients of the average monthly and annual values of the SL_{ENSO} , SL_{EN} and SL_{SO} time series with ENSO indices for 1993—2019

Индекс	Среднегодовые значения			Среднемесячные значения		
	SL_{ENSO}	SL_{EN}	SL_{SO}	SL_{ENSO}	SL_{EN}	SL_{SO}
SL_{ENSO}	1,00	0,88	-0,94	1,00	0,86	-0,92
SL_{EN}	0,88	1,00	-0,66	0,86	1,00	-0,59
SL_{SO}	-0,94	-0,66	1,00	-0,92	-0,59	1,00
$MEI.v2$	0,87	0,73	-0,83	0,79	0,70	-0,72
SOI	-0,84	-0,67	0,85	-0,66	-0,58	0,60
N_{3+4}	0,91	0,89	-0,78	0,84	0,83	-0,70
N_3	0,80	0,83	-0,66	0,76	0,76	-0,61
N_4	0,87	0,84	-0,76	0,80	0,76	-0,67
N_{1+2}	0,49	0,53	-0,38	0,47	0,48	-0,37
<i>Oceanic Nino Index</i>	0,92	0,87	-0,81	0,85	0,80	-0,74

Обратимся к табл. 2, в которой представлены первичные статистические характеристики среднегодовых и среднемесячных индексов уровня за период 1993—2019 гг. Градиент средних аномалий уровня между восточным (SL_{EN}) и западным (SL_{SO}) разрезами составляет 13,5 мм. Наибольшая межгодовая изменчивость свойственна среднегодовым и среднемесячным значениям индекса SL_{ENSO} , а наименьшая — индекса SL_{EN} . Амплитуда колебаний индексов также максимальна для SL_{ENSO} . При этом для годовых значений наибольшее значение SL_{ENSO} (385 мм) отмечалась в 2015 г., а наименьшее (-206,1 мм) — в 1999 г. (рис. 4). Что касается оценки трендов, то даже максимальный тренд в SL_{SO} по критерию Стьюдента [21] находится на грани значимости при уровне $\alpha = 0,05$ ($R^2 = 0,14$). Кстати, все приведенные в табл. 1 индексы ЭНЮК также характеризуются отсутствием значимых трендов. Амплитуда колебаний среднемесячных значений для SL_{ENSO} составляет 927,3 мм, т. е. лишь немного меньше 1 м. При этом наибольший уровень (590 мм)

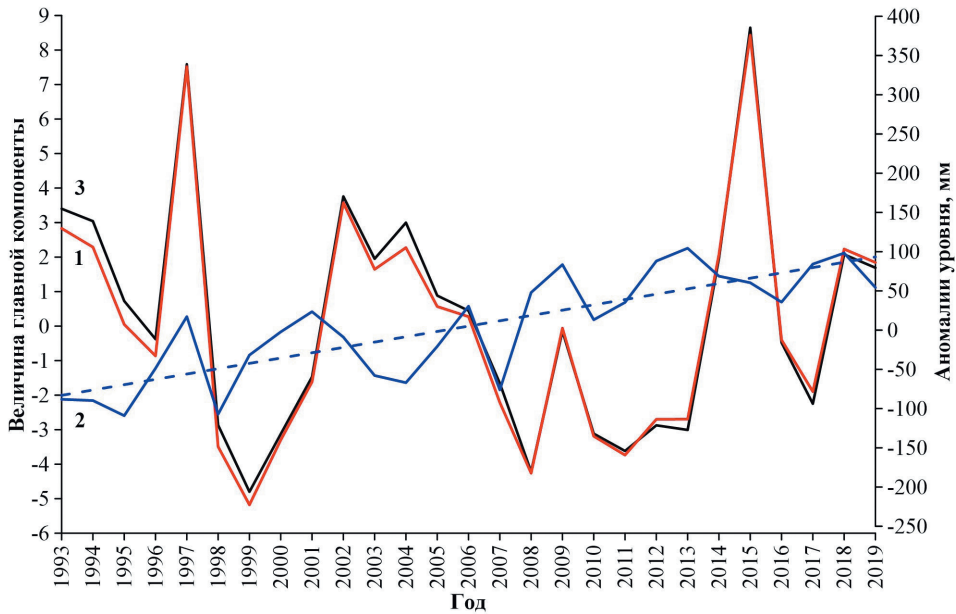


Рис. 4. Межгодовой ход годовых значений SL_{ENSO} и первых двух главных компонент уровня океана в области ЭНЮК:

1 – 1 ГК уровня океана; 2 – 2 ГК уровня океана; 3 – индекс SL_{ENSO} .

Fig. 4. The interannual variation of the annual values of SL_{ENSO} and the first two main components of the sea level in the ENSO region:

1 — the 1st PC of sea level; 2 — the 2nd PC of sea level; 3 — SL_{ENSO} index.

наблюдался в ноябре 1997 г., а наименьший (–337,1) — в июне 1998 г., т. е. всего лишь через 9 месяцев!

Таблица 2

Статистические характеристики временных рядов SL_{ENSO} , SL_{EN} и SL_{SO} за 1993—2019 гг.

Statistical characteristics of the SL_{ENSO} , SL_{EN} and SL_{SO} time series for 1993—2019.

Характеристика	Среднегодовые значения			Среднемесячные значения		
	SL_{ENSO}	SL_{EN}	SL_{SO}	SL_{ENSO}	SL_{EN}	SL_{SO}
Среднее, мм	13,5	44,2	30,6	13,5	44,2	30,6
Стандартное отклонение, мм	149,7	68,8	95,2	189,1	89,8	121,5
Амплитуда, мм	591,5	291,7	322,5	927,3	561,3	514,1
Оценка тренда, мм/год	–1,79	2,58	4,38	–1,78	2,59	4,40
Вклад тренда в дисперсию ряда	0,009	0,089	0,143	0,009	0,089	0,143

На восточном и западном разрезах в области ЭНЮК выделено по 7 точек с годовыми значениями уровня океана и за период 1993—2019 гг. составлена матрица размером 14×27 . Для данной матрицы выполнено разложение методом главных

компонент. Первое собственное число описывает 80,6 % дисперсии исходного поля, второе — 16,5 %, остальные — пренебрежимо малы. Первая главная компонента (ГК) почти функционально ($r = 0,99$) связана с SL_{ENSO} (рис. 4). Отметим также, что 1 ГК имеет более высокую корреляцию с SL_{EN} и SL_{SO} (соответственно 0,92 и $-0,90$) чем SL_{ENSO} . Вторая ГК имеет значимый положительный тренд и описывает короткопериодные случайные колебания (рис. 4). Преимущество 1 ГК межгодовой изменчивости уровня в области ЭНЮК ($SL_{ENSO}^{1ГК}$) перед SL_{ENSO} состоит в том, что она менее подвержена влиянию случайных ошибок на оценки уровня океана, которые аккумулируются в младших ГК. Очевидно, значения $SL_{ENSO}^{1ГК}$ можно рассматривать как индекс, адекватно характеризующий межгодовую изменчивость уровня в области ЭНЮК.

Кроме того, $SL_{ENSO}^{1ГК}$ в общем характеризует межгодовую изменчивость поля уровня большей части Тихого океана (рис. 5 а). Действительно, нетрудно видеть, что пояс значимой положительной корреляции простирается вдоль Северной Америки от Алеутских островов до Южной Америки. При этом очаг максимальной корреляции ($r > 0,90$) находится в районе N_{3+4} . Значимая отрицательная корреляция $SL_{ENSO}^{1ГК}$ с уровнем отмечается в приэкваториальных широтах западной части Тихого океана. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между 2 ГК ЭНЮК ($SL_{ENSO}^{2ГК}$) и годовыми значениями уровня океана представлено на рис. 5 б, из которого видно о существовании значимой положительной корреляции ($r \geq 0,40$) на значительной части акватории Тихого океана. Межгодовой ход 2 ГК в основном отражает наличие значимых положительных трендов в уровне океана. Локальные очаги с максимальной корреляцией ($r > 0,80$) отмечаются в Южно-Китайском море и южнее Новой Зеландии. В межгодовом ходе уровня в этих районах отмечается наличие хорошо выраженных трендов и соответствие короткопериодных циклов с периодами 3—5 лет циклам в 2 ГК ЭНЮК.

Заключение

В работе обсуждаются особенности межгодовых колебаний уровня океана в экваториальной зоне Тихого океана по спутниковой альтиметрии за период 1993—2019 гг. С этой целью использовались базы данных спутниковой лаборатории США NOAA/NESDIS/STAR и Франции AVISO. Сопоставление годовых значений уровня двух указанных баз данных для района ЭНЮК N_{3+4} за период 1993—2019 гг. показало, что AVISO несколько занижает оценку тренда по сравнению с NOAA/NESDIS/STAR (2,11 и 3,07 мм/год соответственно). Межгодовая изменчивость уровня по коэффициенту вариации временных рядов уровня почти одинакова, а корреляция между ними составляет $r = 0,74$.

Выполнен расчет линейных трендов уровня океана в узлах сетки для зоны 20° с.ш. — 20° ю.ш. с разрешением $0,25^\circ$ по широте и долготе. Показано, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают 5,2 мм/год. В центральной и восточной части рассматриваемой акватории оценки тренда практически одинаковы и равны примерно 2,2 мм/год.

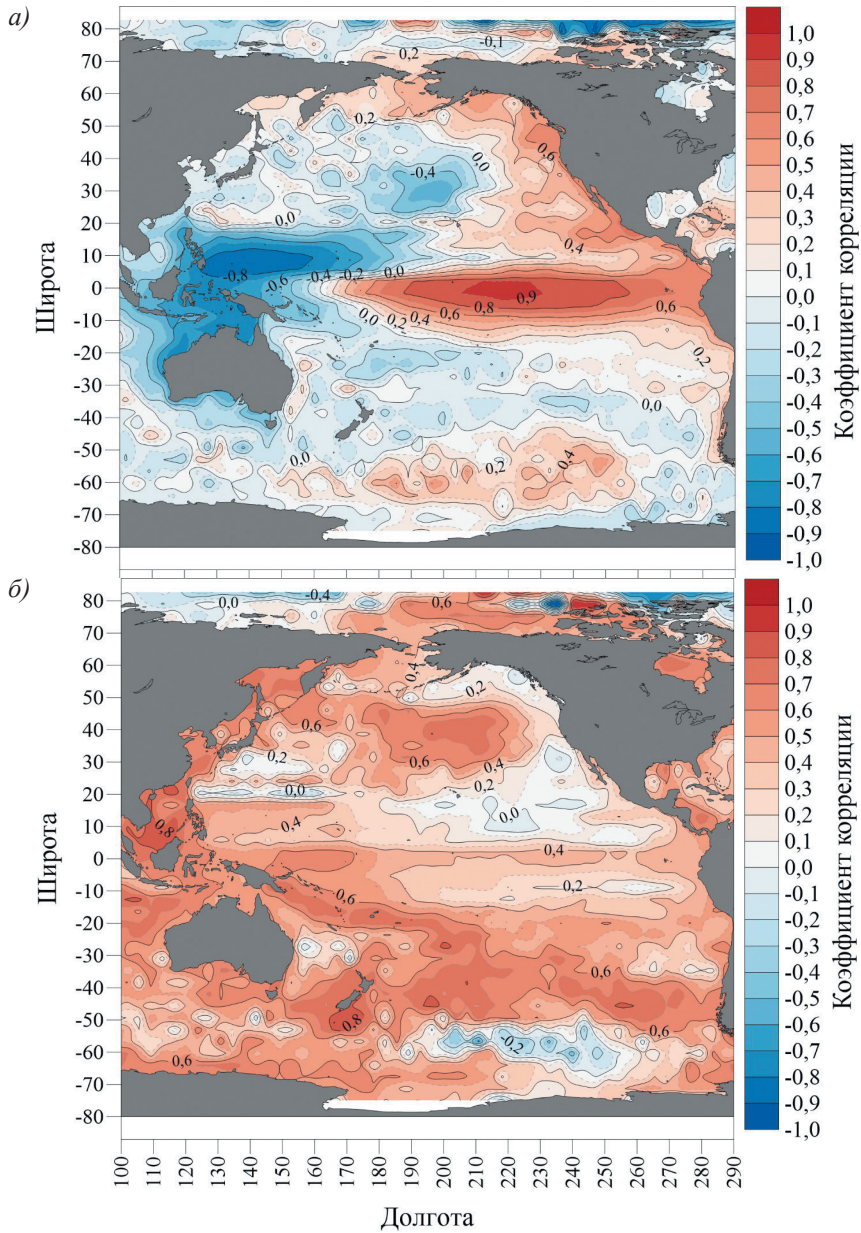


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов корреляции по акватории Тихого океана годовых значений уровня океана с 1 ГК (а) и 2 ГК (б).

Fig. 5. Spatial distribution of correlation coefficients of annual sea level values with the 1st PC (a) and the 2nd PC (б) over the Pacific Ocean area.

Для 3 лет с наибольшими оценками Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2007, 2010) строились карты аномалий уровенной поверхности Тихого океана. Далее выполнялось осреднение аномалий УП за 3 года для Эль-Ниньо и Ла-Нинья. После этого из оценок УП для Эль-Ниньо вычитались аналогичные оценки для Ла-Нинья, что позволило построить карту пространственного распределения разности аномалий годовых значений уровня Тихого океана. Показано, что во время Эль-Ниньо уровень в центральной и восточной части экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья картина обратная. При этом пространственный перекосяк в уровне океана является огромным и составляет 350 мм (> 150 мм в центре зоны ЭНЮК и < -180 мм на ее западе). Выявлены заметные положительные и отрицательные очаги аномалий уровня на большей части акватории Тихого океана.

В центрах указанных очагов было выбрано 2 меридиональных разреза по 7 точкам аномалий уровня. Западный разрез имеет координаты 137° в.д. и $5\text{--}10^\circ$ с.ш., а восточный — 221° з.д. и $2,5^\circ$ с.ш. — $2,5^\circ$ ю.ш. Первый разрез характеризует преимущественно южное колебание в виде явления Ла-Нинья (SL_{SO}), а восточный — Эль-Ниньо (SL_{EN}). Для этих разрезов были сформированы осредненные по 7 точкам временные ряды аномалий среднемесячных значений уровня за период 1993—2019 гг., а также ряд их разности $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$, который представляет явление ЭНЮК (ENSO) в целом. Для указанных индексов уровня выполнена корреляция их среднемесячных и годовых значений с индексами ЭНЮК. Показано наличие высокой корреляции между ними, причем для годовых значений она выше, чем для среднемесячных значений. Анализ взаимнокорреляционных функций среднемесячных значений уровенных индексов с индексами ЭНЮК показал, что максимальная корреляция отмечается при их запаздывании на 1 месяц. Это означает, что индексы SL_{ENSO} , SL_{EN} и SL_{SO} можно рассматривать как реакцию уровенной поверхности океана на явление ЭНЮК.

Дополнительно для указанных разрезов была сформирована матрица годовых значений уровня размером 14×27 , которая подвергнута разложению методом главных компонент. Первое собственное число описывает 80,6 % дисперсии исходного поля, второе — 16,5 %, остальные — пренебрежимо малы. Первая главная компонента (ГК) почти функционально ($r = 0,99$) связана с SL_{ENSO} . Преимущество 1 ГК межгодовой изменчивости уровня в области ЭНЮК ($SL_{ENSO}^{1ГК}$) перед SL_{ENSO} состоит в том, что она менее подвержена влиянию случайных ошибок на оценки уровня океана, которые доминируют в младших ГК. Очевидно, значения $SL_{ENSO}^{1ГК}$ можно рассматривать как индекс, адекватно характеризующий межгодовую изменчивость уровня океана в области ЭНЮК.

Список источников

1. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов источников и стока CO_2 в океане на основе данных наблюдений // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 51—70. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
2. Серых И. В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329—370.

3. Осипов А. М., Гущина Д. Ю. Эль-Ниньо 2015—2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 3. С. 54—81. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81.
4. Бондаренко А. Л., Серых И. В. О формировании явления Эль-Ниньо — Ла-Нинья Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 57—63.
5. Philander S. G. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA, 1990. 293 p.
6. Yeh S. W., Cai W., Min S. K., McPhaden M. J., Dommenget D., Dewitte B., Collins M., Ashok K., An S. I., Yim B. Y., Kug J. S. ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56, No. 1. P. 185—206.
7. Diaz H. F., Hoerling M. P., Eischeid J. K. ENSO variability, teleconnections and climate change. *Int. J. Climatol.* 2001. Vol. 21. P. 1845—1862.
8. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Влагообмен между океаном и атмосферой во внутритропической зоне конвергенции // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 63. С. 255—278. doi: 10.33933/2074-2762-2021-63-255-278.
9. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific // *Mon. Wea. Rev.* 1969. Vol. 97. P. 163—172.
10. Скларов В. Е. Бышев В. И. Наблюдение из космоса за явлением Эль-Ниньо в Мировом океане // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 105—110.
11. Nidheesh A. G., Lengaigne M., Vialard J., Unnikrishnan A. S., Dayan H. Decadal and long-term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean // *Clim Dyn.* 2012. doi: 10.1007/s00382-012-1463-4.
12. Han W., Meehl G. A., Hu A., Alexander M. A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B. D. et al. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades // *Clim. Dyn.* 2014. Vol. 43. P. 1357—1379. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.
13. Wu Q. X., Zhang J., Church A., Hu J. Variability and change of sea level and its components in the Indo-Pacific region during the altimetry era // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 1862—1881. doi: 10.1002/2016JC012345.
14. Moon J.-H., Song Y. T., Bromirski P. D., Miller A. J. Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958—2008 // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013. Vol. 118. P. 7024—7035, doi: 10.1002/2013JC009297.
15. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). URL: <https://psl.noaa.gov/enso/mei>.
16. NOAA/NESDIS/STAR. Laboratory for Satellite Altimetry. URL: https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php.
17. AVISO. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>.
18. Curry J. *Sea Level and Climate Change: Special Report*. Climate Forecast Applications Network, 2018. 79 p. URL: <https://curryja.files.wordpress.com/2018/11/special-report-sea-level-rise3.pdf>.
19. NOAA, Physical Sciences Laboratory. URL: <https://psl.noaa.gov/enso/dashboard.lanina.html>.
20. Wolter K., and M. S. Timlin. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Intl. J. Climatology*, 2011. 31, 1074-1087. doi: 10.1002/joc.2336.
21. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
22. Cazenave A. *Climate Change and Sea Level Rise // Spatium*. 2020. No. 46. 16 p.
23. Zhang X., Church J.A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2012, 39, L21701.
24. Merrifield M.A., Maltrud M.E. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophys. Res. Lett.* 2011, 38, L21605.
25. Han W., Meehl G.A., Hu A., Alexander M.A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B.D., Quan X.-W., Leben R.R. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades // *Clim Dyn.* 2013. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.

References

1. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO₂ in the ocean based on observational data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(66):(51—70). doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
2. Serykh I.V. On the influence of El Niño — Global Atmospheric Oscillation on the interannual variability of hydrometeorological parameters. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2021;(63):(329—370). doi: 10.33933/2074-2762-2021-63-329-370. (In Russ.).
3. Osipov A. M., Gushchina D. Yu. El Niño 2015-2016: evolution, mechanisms, accompanying remote anomalies. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya — Fundamental and applied climatology*. 2018;(3):54—81. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81. (In Russ.).
4. Bondarenko A. L., Serykh I. V. On the formation of the phenomenon of El Niño — La Niña of the Pacific Ocean. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(2):57—63. (In Russ.).
5. Philander S. G. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, CA, 1990: 293 p.
6. Yeh S. W., Cai W., Min S. K., McPhaden M. J., Dommengot D., Dewitte B., Collins M., Ashok K., An S. I., Yim B. Y., Kug J. S. ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*. 2018;56(1):185—206.
7. Diaz H. F., Hoerling M. P., Eischeid J. K. ENSO variability, teleconnections and climate change. *Int. J. Climatol*. 2001;21:1845—1862.
8. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Moisture exchange between the ocean and the atmosphere in the intertropical convergence zone. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021;63:255—278. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-255-278. (In Russ.).
9. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.* 1969;97:163—172.
10. Sklyarov V. E., Byshev V. I. Observation from space of the El Niño phenomenon in the World Ocean. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(2):105—110. (In Russ.).
11. Nidheesh A. G., Lengaigne M., Vialard J., Unnikrishnan A. S., Dayan H. Decadal and long-term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean. *Clim. Dyn.* 2012. doi: 10.1007/s00382-012-1463-4.
12. Han W., Meehl G. A., Hu A., Alexander M. A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B. D. et al. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades. *Clim. Dyn.* 2014;(43):1357—1379. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.
13. Wu Q. X., Zhang J., Church A., Hu J. Variability and change of sea level and its components in the Indo-Pacific region during the altimetry era. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017;(122):1862—1881. doi: 10.1002/2016JC012345.
14. Moon J.-H., Song Y. T., Bromirski P. D., Miller A. J. Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958—2008. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013;(118):7024—7035. doi: 10.1002/2013JC009297.
15. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>
16. NOAA/NESDIS/STAR. Laboratory for Satellite Altimetry. https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php
17. AVISO. Available at <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>.
18. Curry J. Sea Level and Climate Change: Special Report. Climate Forecast Applications Network, 2018: 79 p. Available at: <https://curryja.files.wordpress.com/2018/11/special-report-sea-level-rise3.pdf>.
19. NOAA, Physical Sciences Laboratory. Available at: <https://psl.noaa.gov/enso/dashboard.lanina.html>.
20. Wolter K., Timlin M. S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Intl. J. Climatology*, 2011;(31):1074—1087. doi: 10.1002/joc.2336.
21. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
22. Cazenave A. Climate Change and Sea Level Rise // *Spatium*. 2020;(46):16 p.
23. Zhang X., Church J. A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2012; 39, L21701.

24. Merrifield M. A., Maltrud M. E. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophys. Res. Lett.* 2011; 38. L21605.
25. Han W., Meehl G. A., Hu A., Alexander M. A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B. D., Quan X-W., Leben R. R. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades. *Clim Dyn.* 2013. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.

Информация об авторах

Малинин Валерий Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО—МОК и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Смирнов Максим Алексеевич, магистрант Российского государственного гидрометеорологического университета.

Information about authors

Valery N. Malinin, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, UNESCO—IOC Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

Maksim A. Smirnov, magistrant, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 29.06.2022.

Принята к публикации после доработки 28.08.2022.

The article was received on 29.06.2022.

The article was accepted after revision on 28.08.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 478—493.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):478—493.

Научная статья
УДК 551.465.4:551.465.5 (267.2)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-478-493

Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс

*Алина Анатольевна Малышева, Татьяна Васильевна Белоненко,
Диана Андреевна Яковлева*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
alinamalysheva97@mail.ru

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ кинематических и динамических характеристик мезомасштабных вихрей течения Агульяс. Основой исследования являются данные океанического реанализа GLORYS12v1. В работе анализируются два вихря разной полярности: их треки движения, термохалинные и общие характеристики. Антициклон является более устойчивым, чем циклон, распространяется почти прямолинейно на северо-запад и пересекает Южную Атлантику. В отличие от других исследований мы не выявляем уменьшения энергии вихрей в течение их жизни. Построены и исследованы вертикальные и горизонтальные разрезы относительной и потенциальной завихренности, а также частоты Вайсяля—Брента. На основе анализа средних параметров этих вихрей и термохалинных характеристик были оценены свойства рассматриваемых вихрей.

Ключевые слова: Агульяс, мезомасштабные вихри, GLORYS12v1, потенциальная завихренность, вихри Агульяс.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-27-00004.

Для цитирования: Малышева А. А., Белоненко Т. В., Яковлева Д. А. Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 478—493. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-478-493.

Original article

Characteristics of two eddies of different polarity in the Agulhas Current

Alina A. Malysheva, Tat'iana V. Belonenko, Diana A. Iakovleva

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, alinamalysheva97@mail.ru

Summary. Agulhas eddies are the vortices generating in the southwest Indian Ocean. These eddies are the dominant structures that carry the warm tropical Indian Ocean water into the Atlantic. The article presents a comparative analysis of the kinematic and dynamic characteristics of the Agulhas eddies. The research is based on the oceanic reanalysis GLORYS12v1 data and the product «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH». The paper analyzes two eddies of different polarity: their tracks, thermo-

© Малышева А. А., Белоненко Т. В., Яковлева Д. А., 2022

haline and general characteristics. The anticyclone is shown to be the only long-lived eddy and to propagate almost rectilinearly to the northwest, crossing the South Atlantic. In contrast to other studies, we do not find a decrease in the energy of eddies over time, that is, there is no decrease in the values of speed and the radius of the eddies. Additionally, vertical and horizontal sections of relative and potential vorticity (PV) were built and studied by the Rossby and Ertel formulas, as well as the Brunt-Vaisala frequency. It is shown that there is practically no stratification in the center of the anticyclone, which contributes to small values of Ertel's PV, large values of the Brunt—Vaisala frequency contributing to large values of Ertel's PV in the center of the cyclone. Minimum (negative) values of Rossby's potential vorticity are observed in the anticyclone core, the maximum values being located in the cyclone core. Based on the analysis of the average parameters of these eddies and thermohaline characteristics, the properties of the considered eddies were estimated.

Keywords: Agulhas, mesoscale eddies, GLORYS12v1, potential vorticity, Agulhas eddies.

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-27-00004.

For citation: Malysheva A. A., Belonenko T. V., Iakovleva D. A. Characteristics of two eddies of different polarity in the Agulhas Current. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):478—493. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-478-493.

Введение

Мезомасштабные вихри играют заметную роль в переносе тепла, массы, биохимических характеристик и кинетической энергии. Области вихревой активности приурочены к районам крупномасштабных течений по причине наличия здесь бароклинной и баротропной неустойчивости, что является условием образования мезомасштабных вихрей. Одним из таких течений и является течение Агульяс.

Течение Агульяс — главный источник теплой и соленой воды, переносимой из Индийского океана в Атлантику. К югу от африканского побережья в районе 30—45° ю.ш., 10—35° в.д. оно совершает резкий разворот на восток, образуя петлю (разворот Агульяс) диаметром 340 км. В англоязычных источниках это явление получило название «Agulhas Retroflexion» [1, 2]. Течение является быстрым и мощным и периодически образует отдельные вихри, состоящие из теплых и соленых вод Индийского океана. Часть образованных вихрей способна преодолевать значительные расстояния, в основном на запад через Атлантический океан [3—5]. Этот поток теплых и соленых вод, переносимых из Индийского океана в Атлантический, играет значительную роль в циркуляции океанических вод Южного полушария и оказывает влияние на Атлантическую меридиональную термохалинную циркуляцию, которая, в свою очередь, является одним из главных регуляторов климата. Таким образом, вихри Агульяс опосредованно влияют на климатические изменения [6].

«Agulhas Retroflexion» периодически формирует отдельные антициклонические ринги (кольца), которые состоят из теплых и соленых вод Индийского океана. Температура в них выше на 5 °С, и соленость выше на 0,3 psu, чем температура и соленость окружающих вод равной плотности [7]. Перемещаясь со средней скоростью 12 см/с, ринги быстро распадаются, образуя вихри меньших масштабов (мезомасштабные вихри), которые сохраняют характерные свойства как минимум до 5° в.д. в западном направлении и до 46° ю.ш. в южном направлении [1].

Как правило, ринги Агульяс не являются долгоживущими и при разрушении образуют вихри, которые имеют меньшие масштабы [4]. Установлено, что донная топография существенно влияет на генерацию и распространение вихрей в данном регионе [8]. Подводный рельеф, в особенности хребты, соединяющие Африканский континент со Срединно-океаническим хребтом в Южной Атлантике, влияет на распространение вихрей таким образом, что здесь они теряют почти 70 % кинетической энергии, при этом могут разделяться на множество вихрей меньшего диаметра, большинство из которых никогда не покидает район Капской Котловины [9].

Вихри Агульяс исследовались как по альтиметрическим данным, так и с использованием различных гидродинамических моделей [9, 10]. В работе Сандалук и Белоненко [11] анализируются два основных района повышенного вихреобразования: район «Agulhas Retroflexion» и район, включающий плато Агульяс. Авторы проанализировали характеристики 2225 вихрей (1143 циклонических и 1082 антициклонических), выделенных за период 1993—2015 гг. Показано, что средняя продолжительность жизни мезомасштабных вихрей в данном регионе составила 275 дней, среднее пройденное расстояние — 657 км. Средняя продолжительность жизни антициклонических вихрей составила 140 дней, что существенно выше, чем у циклонических (110 дней). В среднем антициклонические вихри преодолели большую дистанцию, чем циклонические (682 км у антициклонических и 632 км у циклонических). Наибольшая продолжительность жизни, 1827 дней, наблюдалась у антициклонического вихря. Средний радиус вихрей (масштаб) составил 82,7 км.

Целью данной работы является анализ вертикальной структуры и оценка потенциальной завихренности двух долгоживущих вихрей — циклона и антициклона, образованных течением Агульяс. Сравнительный анализ кинематических и динамических характеристик двух разнополярных вихрей позволит получить адекватное представление о структуре и динамических параметрах мезомасштабной вихревой динамики акватории.

Данные

Океанический реанализ GLORYS12v1

Использовались данные океанического реанализа GLORYS12v1 (Global Ocean Physics Reanalysis), которые доступны на сайте Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Продукт содержит ассимилированные натурные, спутниковые и in-situ данные. Массив включает в себя среднесуточные и среднемесячные данные по скорости течений, температуре и солёности воды, а также аномалии уровня. Данные имеют пространственное разрешение $1/12^\circ$ и 50 уровней глубины. Период наблюдения: с 1993 г. по настоящее время. Использование этого массива репрезентативно благодаря наличию регулярных контактных измерений (более 5000 буев Argo за весь период наблюдений). Для расчетов использовались данные GLORYS12v1 за 13 декабря 2012 г.

Массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH»

Использовались данные массива «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» (<http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/>) с 1993 г. по настоящее время. Массив содержит мезомасштабные вихри, выделенные методом автоматической идентификации и трекинга. Для определения вихрей применялся специально разработанный алгоритм идентификации вихрей, основанный на анализе альтиметрических снимков. Более подробное описание данного алгоритма приводится в работе [12]. Алгоритм сохраняет только те вихри, срок существования которых больше 4 недель. Временная дискретность данных составляет 1 сутки. В наборе данных содержится следующий ряд параметров: координаты долготы и широты центра вихря, амплитуда, радиус, орбитальная скорость.

Результаты

Общие характеристики

Среди всех вихрей течения Агульяс для анализа нам были необходимы вихри, удовлетворяющие следующим условиям:

- образованные течением Агульяс;
- на протяжении всего цикла существования идентифицирующиеся по базе «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product»;
- имеющие различную полярность;
- расположенные на минимальном расстоянии друг от друга.

Нам удалось найти несколько пар циклонов и антициклонов Агульяса, которые удовлетворяют выбранным условиям в период с 1993 по 2022 г. Одна пара вихрей особенно привлекла наше внимание, так как антициклон оказался одним из самых долгоживущих вихрей Агульяса и просуществовал почти 3 года. Данная пара вихрей и была выбрана для дальнейшего анализа. Анализировались вертикальная структура и потенциальная завихренность циклона (C) и антициклона (AC). На момент встречи (13.12.2012) эти два вихря расположены к западу от африканского побережья на одной широте, C западнее AC , а вихри практически образуют диполь. На рис. 1 представлены аномалии уровня моря, где C характеризуется отрицательными аномалиями до $-0,4$ м, а AC — положительными, достигающими $0,6$ м в его центре. На период наблюдения и в момент встречи (13.12.2012) вихри уже покинули район формирования и начали перемещение в западном направлении.

На основе массива «Mesoscale Eddies...» сделана оценка средних параметров вихрей и их периодов жизни. Если долгоживущий AC существовал 1065 дней (с 30.10.2012 по 29.09.2015), то C имеет период жизни 123 дня (с 2.12.2012 по 3.04.2013). Видно, что период жизни AC на порядок превышает период жизни C . Причина того, что антициклоны являются более устойчивыми структурами по сравнению с циклонами, кроется в так называемой циклон-антициклонной асимметрии вихрей, которая следует из нелинейных свойств циклонов и антициклонов. У циклона ротор скорости параллелен вектору вертикальной компоненты вращения Земли, а у антициклона — антипараллелен. Это приводит к тому,

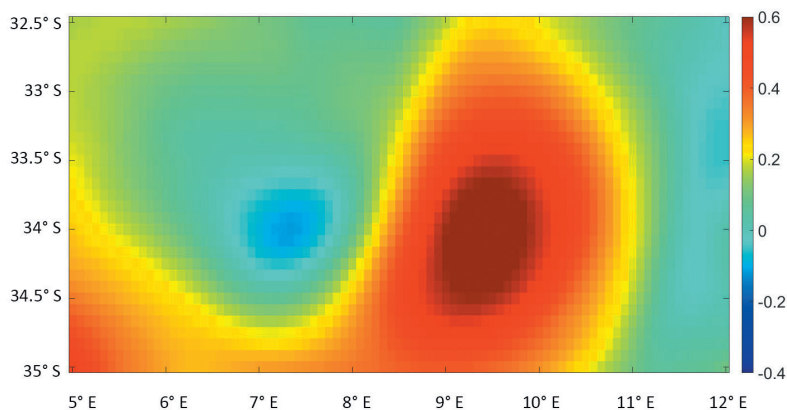


Рис. 1. Аномалии уровня моря (м) по данным GLORYS за 13.12.2012.

Fig. 1. Sea level anomalies (m) according to GLORYS data for 13.12.2012.

что только у антициклона скалярная нелинейность уравнивает дисперсию. У циклона же дисперсия и скалярная нелинейность имеют одинаковые знаки и, следовательно, не могут быть взаимно скомпенсированы [13]. Эта особенность, демонстрирующая циклон-антициклонную асимметрию вихрей, доказана как теоретически, так и экспериментально: антициклоны устойчивы и отличаются сравнительно большим временем жизни; циклоны сравнительно быстро распадаются (диспергируют). Эта особенность также характеризует вихри, представленные на рис. 1. Средние параметры вихрей, полученные по массиву «Mesoscale Eddies...», представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры циклонического (C) и антициклонического (AC) вихрей течения Агульяс
Parameters of cyclonic (C) and anticyclonic (AC) vortices of the Agulhas flow

Полярность вихря	Средний радиус вихря	Средняя амплитуда	Средняя орбитальная скорость	Путь	Время перемещения	Средняя скорость перемещения
	R , км	A , см	$V_{\text{ор}}$, см/с			
AC	74	5	79	4217	1065	5,8
C	72	6	107	438	123	5,7

Из табл. 1 видно, что средние значения орбитальной скорости существенно больше средних значений скорости перемещения вихрей. Такие вихри можно считать осесимметричными [14].

На рис. 2 показаны треки движения вихрей на основе массива «Mesoscale Eddies...».

Отметим, что при доминирующем перемещении вихрей в западном направлении наблюдается отклонение по меридиану, причем, AC отклоняется к экватору,

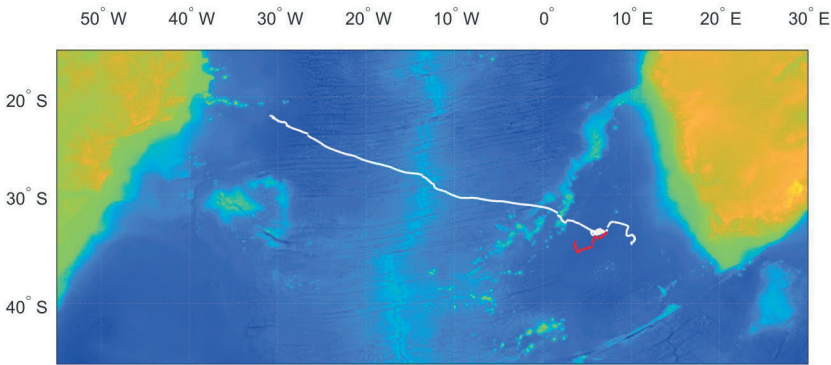


Рис. 2. Треки антициклона (белый цвет) и циклона (красный цвет) с моментов их генерации до диссипации.

Пересечение треков соответствует дате наблюдения 13.12.2012 (см. рис. 1).

Fig. 2. Tracks of an anticyclone (shown by white) and a cyclone (shown by red) from the moments of their generation to dissipation.

The intersection of the tracks corresponds to the observation date 12.13.2012 (see Fig. 1).

а C к полюсу. Теоретическое обоснование этого явления рассмотрено в работе [15]. На вихревой дрейф оказывают влияние крупные формы рельефа [16]. Хребты считаются серьезным препятствием для вихрей, вихри обычно снижают скорость движения или диссипируют при прохождении самых глубоких долин. Факт уменьшения энергии вихрей в процессе их эволюции описан Коротаяевым и Федотовым [17], а также в работе Резника [18]. Однако, как показано на рис. 3, для рассматриваемого антициклона данный факт не подтверждается, т. е. не происходит уменьшения скорости движения или радиуса вихря с течением времени. Очевидно, что на перемещение вихрей влияет множество внешних факторов, когда вихри периодически теряют или получают дополнительную энергию.

На рис. 3 а видно, что скорость перемещения AC изменяется от 3 до 10 см/с. Движение вихря не замедляется в процессе эволюции. Более того, к концу жизненного цикла вихря скорость перемещения достигает максимальных значений — 10 см/с, а затем уменьшается до 0,065 см/с, после чего вихрь диссипирует. Увеличение скоростей перемещения иногда коррелирует с увеличением радиуса вихря, однако эта зависимость наблюдается лишь в отдельные моменты времени. Очевидно, изменчивость параметров AC -вихря определяется сложным комплексом различных динамических условий — взаимодействием с фоновыми течениями, изменением термохалинной структуры среды, слиянием с другими вихрями, атмосферными воздействиями и т.д.

Для циклона C (рис. 3 б) также отмечается увеличение скорости перемещения перед диссипацией вихря. Скорость изменяется в диапазоне от 0,045 до 0,072 м/с. Однако радиус вихря к концу жизненного цикла постепенно уменьшается от 115 до 57 км.

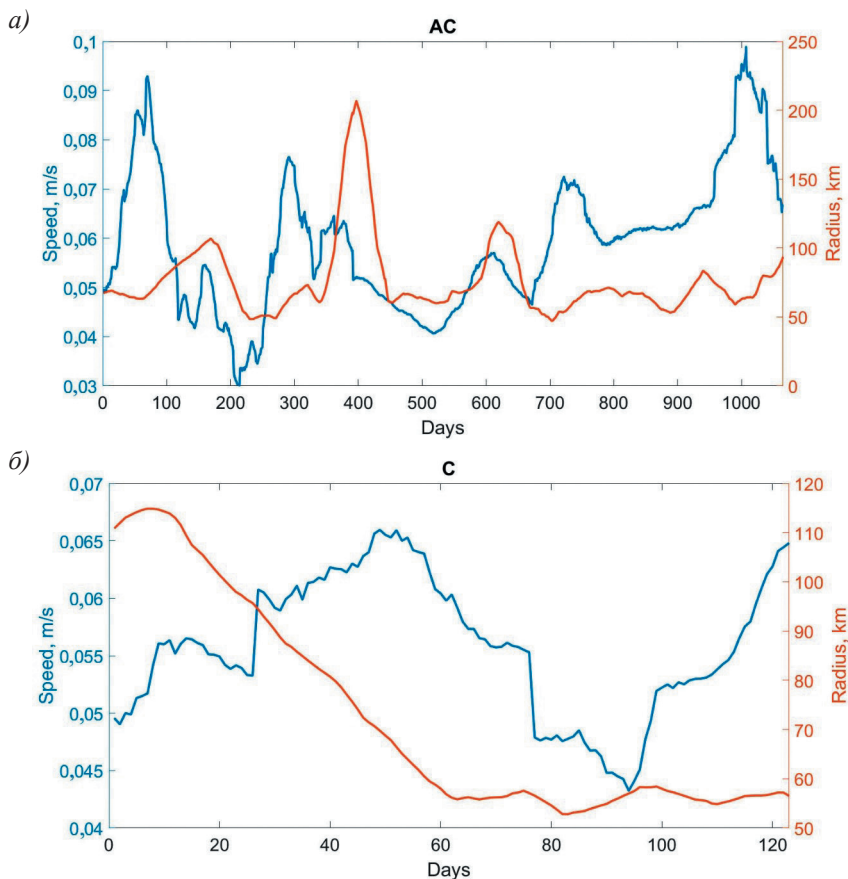


Рис. 3. Изменчивость во времени скорости перемещения (синим) и радиуса (красным) антициклона (а) и циклона (б).

Fig. 3. Time-variability of moving speed (blue) and radius (red) of the anticyclone (a) and cyclone (b).

Термохалинные характеристики вихрей

Аномалии термохалинных характеристик рассчитывались относительно среднегодовых значений в соответствующих точках (см. вертикальные разрезы по 33.5° ю.ш. на рис. 4).

На вертикальных разрезах температуры и солёности (рис. 4) хорошо видны оба вихря. Центр циклона расположен на 7.5° в.д., а антициклона – на 9° в.д. Видно, что оба вихря являются подповерхностными. Аномалии изотерм и изохалин циклона простираются до 1000 м и примерно до 1200 м для антициклона. АС представляет из себя подповерхностный вихрь в форме полуэллипсоида с ядром до глубины 800 м с повышенными значениями температуры и солёности.

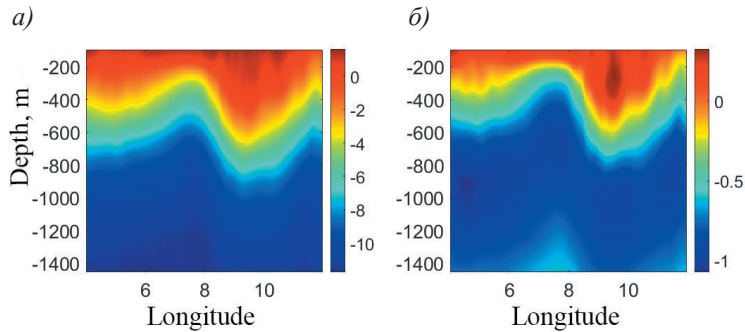


Рис. 4. Аномалии температуры ($^{\circ}\text{C}$) (а) и солёности (psu) (б) на разрезе 33.5° ю.ш. на 13.12.2012.

Fig. 4. Anomalies of temperature ($^{\circ}\text{C}$) (a) and salinity (psu) (b) on the section 33.5° S. on 13.12.2012.

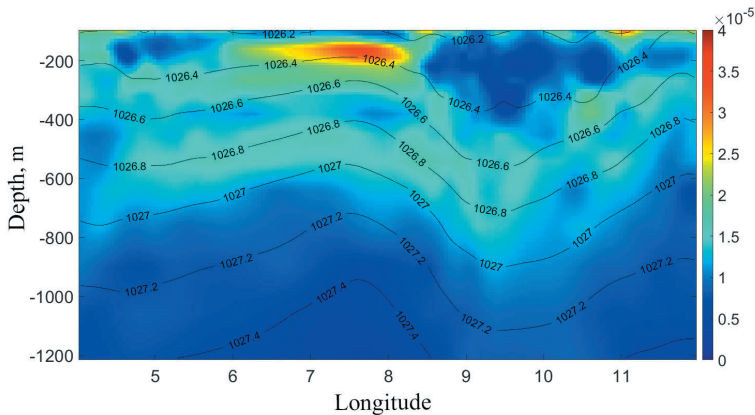


Рис. 5. Частота Вьяйсяля—Брента (с^{-1}) на разрезе 33.5° ю.ш. 13.12.2012. Черными линиями показаны изопикны.

Fig. 5. Brunt—Vaisala frequency (s^{-1}) on the section 33.5° S. on 13.12.2012. The black lines show isopycnals.

Температура и солёность в ядре антициклона выше средних фоновых значений на 2°C и $0,3$ psu соответственно. Ядро циклона располагается на глубине около 200 м, температура и солёность в ядре циклона ниже фоновых значений на 1°C и $0,2$ psu соответственно.

Частота Вьяйсяля—Брента (ЧВБ) рассчитывалась с помощью термодинамического уравнения TEOS-10 [19], реализованного в среде Matlab. Ядра вихрей хорошо выделяются на вертикальном разрезе ЧВБ (рис. 5). Максимум ЧВБ наблюдается в области ядра С и составляет $4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, в то время как в ядре АС стратификация

однородная. Ядро циклона с однородной стратификацией расположено примерно на горизонтах 100—200 м, а ядро антициклона на горизонтах 200—400 м. В то же время прогибы изопокин простираются, как минимум, до глубины 1200 м.

Относительная завихренность

Одним из основных параметров вихрей является относительная завихренность:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

где u и v — зональная и меридиональная составляющая скорости течений. Используется правая ось координат, где ось x направлена на восток, ось y — на север, z — вертикальная ось.

Помимо циклона и антициклона, представленных на рис. 1, в поле относительной завихренности выделяются другие динамические структуры (рис. 6). Максимальные по модулю значения ζ ($4 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) расположены в восточной части C , в то время как в его северной части значения близки к нулю или даже отрицательны. Это означает, что завихренность является динамической характеристикой, в то время как аномалии уровня, представленные на рис. 1, кинематической. Помимо вихрей, в поле завихренности отображаются сдвиговые течения, которые также имеют положительную или отрицательную завихренность. Для AC максимальные отрицательные значения ζ ($-2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) расположены в центре и южной части вихря.

Число Россби $Ro = \left| \frac{\zeta}{f} \right|$ (f — параметр Кориолиса) изменяется в диапазоне от 0,03 до 0,05 и является довольно малым, что говорит о большой нелинейности

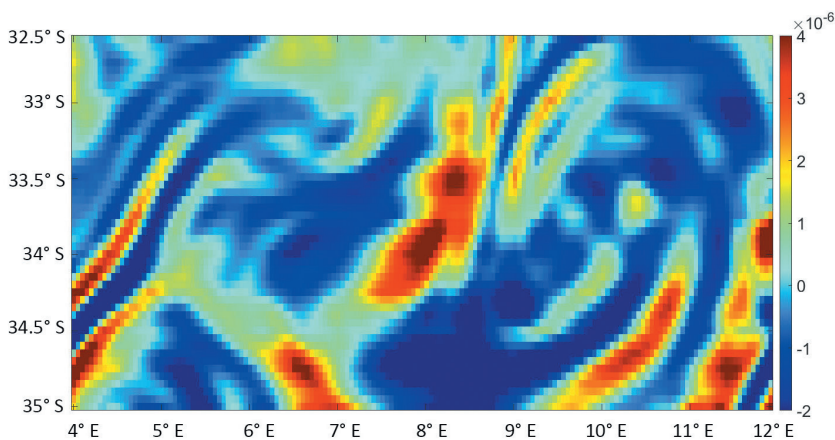


Рис. 6. Пространственное распределение относительной завихренности (c^{-1}) на поверхности на 13.12.2012.

Fig. 6. Spatial distribution of relative vorticity (s^{-1}) on the surface on 13.12.2012.

вихрей, что является одной из причин меридионального смещения при их перемещении на запад [15].

Потенциальная завихренность вихрей по формулам Эртеля и Россби

Основной динамической характеристикой вихрей является потенциальная завихренность (PV). Если бы система, в которой перемещаются вихри, была замкнутой, то выполнялся бы закон сохранения потенциальной завихренности этих вихрей. Этот закон является аналогом закона сохранения количества движения в механических процессах. Однако в реальном океане нельзя ожидать изолированности вихревых процессов от всех других, и, как следствие, система не является замкнутой, поэтому в процессе эволюции может меняться потенциальная завихренность вихрей наряду с изменениями их термохалинных и кинематических характеристик.

В работе представлены два основных подхода к расчету потенциальной завихренности вихрей: Эртеля и Россби.

Расчет потенциальной завихренности PV вихрей по формуле Эртеля

Потенциальная завихренность в подходе Эртеля рассчитывалась по формуле (12) из работы Жмур и др. [20]:

$$PV = \frac{\left(-\frac{\partial v}{\partial z}\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} - \left(-\frac{\partial u}{\partial z} + f_h\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды; $f_h = 2\omega \cos \varphi$ — меридиональная составляющая угловой скорости вращения Земли $2\Omega = (0, f_h, f)$; φ — широта. Так как вертикальные градиенты скоростей и также f_h незначительны, расчет потенциальной завихренности проводится по более простой формуле:

$$PV = \frac{(\zeta + f) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho_0}, \quad (2)$$

где ρ_0 — референтная плотность воды, принимая в расчетах $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$.

На вертикальном разрезе PV (рис. 7) хорошо выделяются ядра C и AC, окруженные изопикнами. В циклоне изопикны сжимаются, а в антициклоне — раздвигаются. Во всей исследуемой области $PV > 0$, однако в ядре AC имеет нулевые значения, чему способствует отсутствие стратификации. Минимальные значения ($0,6 \cdot 10^{-10}$ — $0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) расположены на периферии ядра AC, а максимальные ($1,8 \cdot 10^{-10}$ — $2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) — в области ядра циклона.

Расчет потенциальной завихренности σ вихрей по формуле Россби

Расчет σ в подходе Россби производился по формуле (13) из работы Жмур и др. [20]:

$$\sigma = \text{rot}_z \mathbf{V} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \nabla^2 \psi + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где ψ — функция тока; N — частота Вайсяля—Брента.

Потенциальная завихренность σ по формуле Россби (рис. 8) отличается размерностью от PV по формуле Эртеля. В отличие от оценок PV , значения σ в ядре антициклона отрицательны и достигают минимума $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. В циклоне значения σ положительны в ядре C и достигают максимума $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ на горизонте 200 м. Сравнение рисунков 7 и 8 показывает, что ядро антициклона на графике потенциальной завихренности по Россби имеет большую вертикальную протяженность,

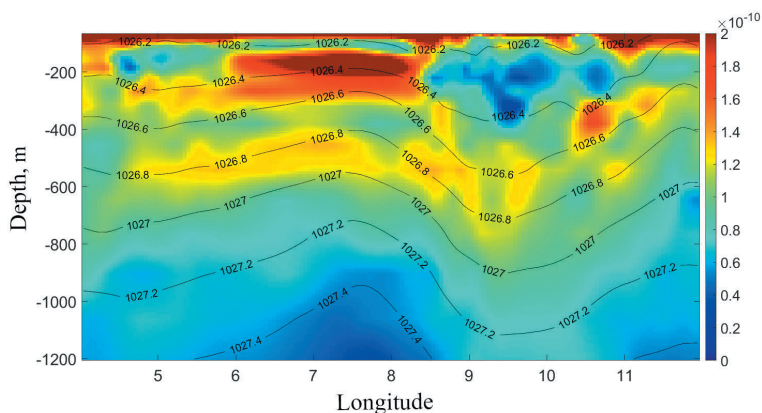


Рис. 7. Оценка PV по формуле Эртеля ($\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) для 13.12.2012 на разрезе по 33.5° ю.ш.
Черными линиями показаны изопикны.

Fig. 7. Estimation of PV by the Ertel formula ($\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) on the section 33.5° S. on 13.12.2012.
The black lines show isopycnals.

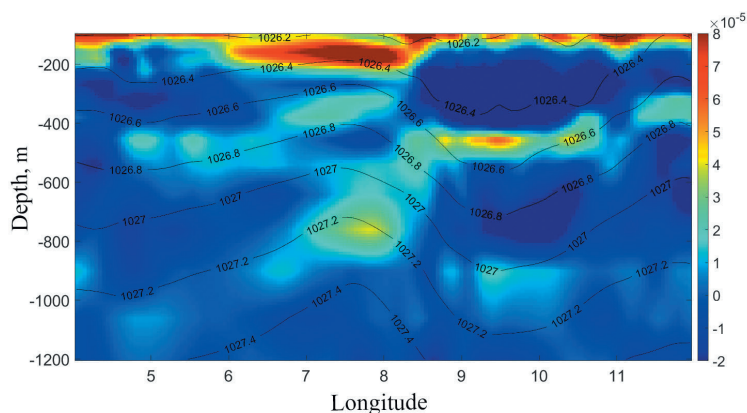


Рис. 8. Оценка PV по формуле Россби (с^{-1}) на 13.12.2012 на разрезе 33.5° ю.ш.
Черными линиями показаны изопикны.

Fig. 8. Estimation of PV by the Rossby formula (s^{-1}) on the section 33.5° S. on 13.12.2012.
The black lines show isopycnals.

чем по формуле Эртеля. Оно разделяется на две части незначительной областью с положительными значениями σ примерно на глубине 500 м, что обусловлено незначительным подъемом изопикн в этой части ядра. В слое ниже 500 и до 900 м значения PV снова отрицательны и достигают $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Ядро циклона с положительными значениями также разделяется на две части: слой до 200 м с положительными значениями. На рис. 8 видно, что области положительных и отрицательных значений σ распространяются на глубины, где расположен циклон.

Заключение

В работе изучены два вихря течения Агульяс с различной полярностью. Получены средние параметры этих вихрей, выявлены траектории их движения и построены вертикальные разрезы термохалинных характеристик. Показано, что вихри распространяются на запад, причем антициклон является более устойчивым и почти пересекает Атлантический океан в течение 1065 дней, в то время как циклон диссипирует через 123 суток после начала движения. Соответственно, антициклон прошел расстояние 4217 км, а циклон 438 км. Значения скоростей дрейфа различаются незначительно (5,8 и 5,7 см/с), как и радиусы (74 и 72 км). Средние по времени значения амплитуды у вихрей также различаются незначительно (5 и 6 см); на дату 13.12.2012 наибольшие значения амплитуды в вихрях достигают значений 11 см для AC и 5 см для C . В процессе движения вихрей не происходит ожидаемого уменьшения скорости движения вихря с течением времени; более того, скорость для AC увеличивается до максимума 10 см/с накануне диссипации, и до 6,5 см/с для C непосредственно перед диссипацией. В то же время, радиусы вихрей постепенно уменьшаются в процессе эволюции.

Проанализирована вертикальная структура вихрей. Показано, что для C аномалии изотерм и изохалин простираются до 1000 м, а для AC — до 1200 м. Ядро AC распространяется до глубины 800 м. Температура и соленость в ядре AC выше средних фоновых значений на $2 \text{ }^\circ\text{C}$ и 0,3 psu соответственно. Ядро C располагается на глубине около 200 м, температура и соленость в ядре циклона выше фоновых значений на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ и 0,2 psu соответственно.

Ядра вихрей отчетливо выделяются на разрезе ЧВБ. Ядро циклона, которому присуща однородная стратификация, характеризуется максимальными значениями ЧВБ ($4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$), в отличие от ядра антициклона, в котором значения ЧВБ преимущественно равны нулю, следовательно, стратификация отсутствует.

Относительная завихренность также наглядно прослеживается в ядрах вихрей, максимальные положительные значения ($4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$) наблюдаются в области циклона, максимальные отрицательные ($-2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$) — в области антициклона.

Представлена оценка потенциальности завихренности на основе двух подходов: по формуле Эртеля и по формуле Россби. Показано, что в центре антициклона практически отсутствует стратификация, что способствует малым значениям потенциальной завихренности по Эртелю ($0,6 \cdot 10^{-10} - 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$). А в центре циклона большие значения частоты плавучести способствуют большим значениям

$PV(1,8 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$. Кроме того, в центре антициклона, где отрицательная относительная завихренность велика, PV близка к нулю. Минимальные (отрицательные) значения потенциальной завихренности по Россби достигают $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и наблюдаются в области ядра AC . Максимальные значения $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ расположены в области ядра C .

Потенциальная завихренность — центральное понятие гидродинамики и физической океанографии, характеризующее многие процессы динамики атмосферы и океана. Потенциальная завихренность всегда сохраняется для идеальных океанических движений, когда термобарический коэффициент (зависящий от изменений давления коэффициентов теплового расширения и халинного сжатия) предполагается равным нулю, как, например, для несжимаемой морской воды. Если проводить сравнение с механическими движениями, то можно сказать, что закон сохранения PV в океане является аналогом закона сохранения момента инерции в механике. Однако в действительности морская вода — это жидкость, компонентами которой являются вода и соль, и поэтому, вообще говоря, PV не сохраняется. Термобаричность морской воды, молекулярная вязкость, соленость и коэффициент диффузии всегда изменяют потенциальную завихренность жидкой частицы. Именно термобаричность и механизмы молекулярной диссипации изменяют потенциальную завихренность при использовании различных приближений, применяемых к динамическим уравнениям [20—22]. Все это означает, что оценки PV , получаемые по формулам Эртеля или Россби, отличаются друг от друга не только размерностью, но и распределением характеристик. Это два принципиально разных подхода к описанию одного и того же динамического свойства движения жидкости, которые представлены на рисунках 7 и 8.

Список источников

1. Lutjeharms J. R. E., van Ballegooyen R. C. The retroflection of the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. V. 18. P. 1570—1583.
2. Lutjeharms J. R. E., Valentine, H. R. Eddies at the SubTropical Convergence south of Africa // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. V. 18. P. 761—774.
3. Gordon A. L., Weiss R. F., Smethie W. M., Warner M. J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 1992. V. 97, No. C5. P. 7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
4. Donners J., Drijfhout S. S., Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31 (16). L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
5. Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Generation and evolution of Natal Pulses, solitary meanders in the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. V. 29 (12). P. 3043—3055.
6. Stocker T. F. Climate changes: from the past to the future — a review // *Int. J. Earth Sci.* 1999. V. 88. P. 365—374. doi: 10.1007/s005310050271.
7. Gordon A. L. Indian—Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflection // *Science*. 1985. V. 227. P. 1030—1033. doi: 10.1126/science.227.4690.1030.
8. Hall C., Lutjeharms J. R. E. Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean // *Journal of Marine Systems*. 2011. V. 85. P. 1—10. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.10.003.

9. Schouten M. W., de Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2000. V. 105, No. C9. P. 21913—21925.
10. Doglioli A. M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C05043. doi: 10.1029/2006JC003952.
11. Сандалюк Н. В., Белоненко Т. В. Мезомасштабная вихревая динамика в районе течения Агульяс по данным спутниковой альтиметрии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 5. С. 179—190. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190.
12. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in oceanography*. 2011. V. 91, No. 2. P. 167—216. doi: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
13. Незлин М. В. Солитоны Россби // *Успехи физических наук*. 1986. Т. 150 (1). С. 1—58.
14. Коротаев Г. К. Структура и кинематика синоптических вихрей в океане: теория и современные наблюдения // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 6 (216). С. 757—780. doi: 10.22449/0233-7584-2020-6-757-780.
15. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. V. 21. ES5003. doi: 10.2205/2021ES000773.
16. Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018. V. 139. P. 104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.
17. Korotaev G., Fedotov A. Dynamics of an isolated barotropic eddy on a beta-plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994. V. 264. P. 277—301. doi: 10.1017/S0022112094000662.
18. Reznik G. M., Dewar W. K. An analytical theory of distributed axisymmetric barotropic vortices on the β -plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994. V. 69. P. 301—321. doi: 10.1017/S0022112094001576.
19. IOC, SCOR and IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO. 2010. 196 p.
20. Жмур В. В., Новоселова Е. В., Белоненко Т. В. Потенциальная завихренность в океане: подходы Эртеля и Россби с оценками для Лофотенского вихря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57, № 6. С. 721—732. doi: 10.31857/S0002351521050151.
21. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1 // *Oceanology*. 2021. Vol. 61, No. 6. P. 830—838. doi: 10.1134/S0001437021060333.
22. Жмур В. В., Новоселова Е. В., Белоненко Т. В. Особенности формирования поля плотности в мезомасштабных вихрях Лофотенской котловины. Часть 2 // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 3. С. 341—356. doi: 10.31857/S0030157422030170.

References

1. Lutjeharms J. R. E., van Ballegooyen, R. C. The retroflection of the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1988;(18):1570—1583.
2. Lutjeharms J. R. E., Valentine, H.R. Eddies at the SubTropical Convergence south of Africa // *Journal of Physical Oceanography*. 1988;(18):761—774.
3. Gordon A. L., Weiss R. F., Smethie W. M., Warner M. J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 1992;97(C5):7223—7240. doi: 10.1029/92JC00485.
4. Donners J., Drijfhout S. S., Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. 2004;31(16):L16312. doi: 10.1029/2004GL020644.
5. Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Generation and evolution of Natal Pulses, solitary meanders in the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1999;29(12):3043—3055.

6. Stocker T. F. Climate changes: from the past to the future — a review // *Int. J. Earth Sci.* 1999;(88):365—374. doi: 10.1007/s005310050271.
7. Gordon A. L. Indian—Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflexion // *Science*. 1985;(227):1030—1033. doi: 10.1126/science.227.4690.1030.
8. Hall C., Lutjeharms J. R. E. Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean // *Journal of Marine Systems*. 2011;(85):1—10. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.10.003.
9. Schouten M. W., de Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E. Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2000;105(C9):21913—21925.
10. Doglioli A. M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* 2007;(112):C05043. doi: 10.1029/2006JC003952.
11. Sandalyuk N. V., Belonenko T. V. Mesoscale eddy dynamics in the area of the Agulhas Current according to satellite altimetry data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018;15(5):179—190. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190. (In Russ.).
12. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*. 2011;91(2):167—216. doi: 10.1016/j.pocean.2011.01.002.
13. Nezlin M. V. Rossby solitons. *Uspekhi fizicheskikh nauk = successes of physical sciences*. 1986;150(1):1—58. (In Russ.).
14. Korotaev G. K. Structure and kinematics of synoptic eddies in the ocean: theory and modern observations. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal = Marine hydrophysical journal*. 2020;36(6,216):757—780. doi: 10.22449/0233-7584-2020-6-757-780. (In Russ.).
15. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021;(21):ES5003. doi: 10.2205/2021ES000773.
16. Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P. On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2018;(139):104—113. doi: 10.1016/j.dsr.2018.08.005.
17. Korotaev G., Fedotov A. Dynamics of an isolated barotropic eddy on a beta-plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;(264): 277—301. doi: 10.1017/S0022112094000662.
18. Reznik G. M., Dewar W. K. An analytical theory of distributed axisymmetric barotropic vortices on the β -plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;(69): 301—321. doi: 10.1017/S0022112094001576.
19. IOC, SCOR and IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO. 2010. 196 p.
20. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Potential vorticity in the ocean: Ertel and Rossby approaches with estimates for the Lofoten eddy. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = News RAN. Atmospheric and ocean physics*. 2021;57(6):721—732. doi: 10.1134/S0001433821050157. (In Russ.).
21. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1. *Oceanology*. 2021;61(6):830—838. doi: 10.1134/S0001437021060333.
22. Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 2. *Okeanologiya = Oceanology*. 2021;62(3):289—302. doi: 10.1134/S0001437022030171. (In Russ.).

Информация об авторах

Алина Анатольевна Малышева, инженер-исследователь, кафедра океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, alinamalysheva97@mail.ru.

Татьяна Васильевна Белоненко, д-р геогр. наук, профессор кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, t.v.belonenko@spbu.ru.

Диана Андреевна Яковлева, инженер-исследователь, кафедра океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет, d.iakovleva@spbu.ru.

Information about authors

Alina A. Malysheva, research engineer, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, alinamalysheva97@mail.ru.

Tatiana V. Belonenko, Dr. Sci. (Geogr.), professor, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, t.v.belonenko@spbu.ru.

Diana A. Iakovleva, research engineer, Department of Oceanography, Saint Petersburg State University, d.iakovleva@spbu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.06.2022.

Принята к публикации 27.07.2022.

The article was received on 24.06.2022.

The article was accepted on 27.07.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 494—507.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):494—507.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 628.316.12:577.18
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-494-507

Исследование механизма сорбции антибиотиков природными алюмосиликатами методами спектроскопии

Д. С. Гальченко, Л. И. Соколова, В. В. Ткачев, Н. П. Шапкин, В. И. Разов, Я. Ю. Блиновская

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, galchenko_ds@mail.ru

Аннотация. Применение сорбентов на основе природных алюмосиликатов для очистки сточных вод от различных загрязняющих компонентов широко распространено в различных областях промышленности. В настоящее время активно рассматривается возможность использования данных сорбентов для очистки сточных вод от остаточных количеств антибиотиков, но на данный момент не до конца исследован механизм их сорбции.

В работе исследованы физико-химические свойства сорбента на основе вермикулита Кокша-ровского месторождения (Приморский край) и цеолитов Шивертуйского и Талан-Гозагорского месторождений (Восточного Забайкалья) для извлечения антибиотиков левомецетина, тетрациклина, антибиотика класса фторхинолонов (ципрофлоксацин) и цефалоспоринов (цефазолин). Исследование сорбционных свойств для уточнения механизма сорбции проведено методами рентгенофазового анализа, позитронно-аннигиляционной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

На основании проведенных исследований установлено, что сорбция антибиотиков происходит не только за счет интеркаляции, что подтверждается данными рентгенофазового анализа, но и за счет поверхностных взаимодействий и физической сорбции.

Ключевые слова: твердофазная экстракция, сорбция, вермикулит, левомецетин, тетрациклин, цефазолин, ципрофлоксацин

Для цитирования: Гальченко Д. С., Соколова Л. И., Ткачев В. В., Шапкин Н. П., Разов В. И., Блиновская Я. Ю. Исследование механизма сорбции антибиотиков природными алюмосиликатами методами спектроскопии // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 494—507. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-494-507.

ECOLOGY

Original article

Antibiotic sorption mechanism investigation by natural aluminosilicates by spectroscopy methods

D. S. Gal'chenko, L. I. Sokolova, V. V. Tkachev, N. P. Shapkin, V. I. Razov, Ya. Yu. Blinovskaya

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, galchenko_ds@mail.ru

Summary. The use of sorbents based on natural aluminosilicates for the wastewater treatment from various contaminating components is widespread in various fields of industry. Currently, the possibility of

using these sorbents to treat waste water from residual amounts of antibiotics is being actively considered, but at the moment the mechanism of their sorption has not been fully investigated.

The work investigated the physical and chemical properties of a sorbent based on the vermiculite of the Koksharovsky field (Primorsky Territory) and zeolites of the Shivertuysky and Talan-Gozagorskoye fields (East Transbaikalia) for the extraction of antibiotics levomycetin, tetracycline, antibiotic class fluoroquinolones (ciprofloxacin) and cephalosporins (cefazoline). Analysis of sorption properties for clarification of sorption mechanism was carried out by methods of X-ray phase analysis, positron-annihilation spectroscopy and scanning electron microscopy.

Experiments have shown that vermiculites have better sorption properties compared to other aluminosilicates groups. When using them, the maximum removal of antibiotics from the solution is achieved. Studies have shown that the nature of the material will not significantly affect the absorbency. This fact should be taken into account when choosing a sorbent for the treatment of antibiotic-containing water.

Based on the studies conducted, it can be found that sorption of antibiotics occurs not only due to intercalation, which is confirmed by X-ray phase analysis, but also due to surface interactions and physical sorption.

Thus, these methods should be used to evaluate the sorption of the similar classes materials. The obtained indicators form the basis for calculating the amount of material used for the treatment of antibiotic-containing wastewater, the degree of its effectiveness for various groups with an antibiotic and the frequency of its replacement, and the obtained indicators will also form the basis for further studies of wastewater treatment systems, in which they can find practical application.

Keywords: solid phase extraction, sorption, vermiculite, levomycetine, tetracycline, cefazoline, ciprofloxacin

For citation: Gal'chenko D. S., Sokolova L. I., Tkachev V. V., Shapkin N. P., Razov V. I., Blinovskaya Ya. Yu. Antibiotic sorption mechanism investigation by natural aluminosilicates by spectroscopy methods. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):494—507. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-494-507.

Введение

Производственная деятельность, независимо от ее типа, масштабов и расположения сопровождается активным воздействием на окружающую среду. В соответствии с требованиями природоохранного законодательства предприятие обязано разрабатывать мероприятия, направленные на уменьшение негативных последствий, из которых наиболее существенными являются сточные воды. Их состав чрезвычайно разнообразен, в связи с чем выбор технологии их очистки сопряжен с определенными трудностями, обусловленными с одной стороны необходимостью достижения допустимых концентраций сбрасываемых загрязняющих веществ, с другой стороны, технико-экономическими возможностями производства.

Среди существующих решений в области очистки выделяются методы сорбции, основанные на поглощении загрязняющих веществ либо поверхностным слоем (адсорбенты), либо объемным поглощением (абсорбенты). Современный рынок сорбентов характеризуется значительным разнообразием. Однако производство специальных материалов связано с определенными затратами, включая экосистемные. В этой связи альтернативой являются натуральные сорбенты, характеризующиеся доступностью и невысокой стоимостью. Таковыми являются природные алюмосиликаты. Современные источники информации предоставляют исчерпывающую информацию о структуре этих сорбентов и их сорбционных свойствах. В качестве основного направления применения этих сорбентов следует выделить их использование в качестве агента, способствующего как очистке, так и концентрированию микроколичеств определяемых веществ [1—6]. Кроме того,

использование сорбентов на основе природных алюмосиликатов, в частности вермикулита и цеолитов, является перспективным методом очистки сточных вод от остаточных количеств антибиотиков [7].

Ранее на кафедрах аналитической и физической и аналитической химии ДВГУ и ДВФУ исследована возможность применения некоторых сорбентов на основе природных алюмосиликатов для выделения и концентрирования антибиотиков из пищевых продуктов с различными матрицами [8—15]. Однако систематического исследования сорбционных и физико-химических свойств применяемых сорбентов не проводилось.

В соответствии с этим целью работы является исследование механизма сорбции антибиотиков левомецетина, тетрациклина, цефазолина и ципрофлоксацина сорбентом на основе вермикулита, модифицированного соляной кислотой.

Материалы и методы исследования

Характеристика применяемых антибиотиков

Фармацевтические формы — цефазолин (натриевая соль)®, левомецетин (хлорамфеникол)®, тетрациклин®, ципрофлоксацин (гидрохлорида моногидрат)® — получены из аптечной сети. Им соответствуют стандартные образцы цефазолина, левомецетина, тетрациклина и ципрофлоксацина. Одна упаковка цефазолина содержит 1 г химически чистого антибиотика. Для антибиотиков левомецетина, тетрациклина и ципрофлоксацина производился пересчет на чистое вещество с учетом вспомогательных веществ в таблетке.

Сорбент

В качестве сорбента использовался вермикулит Кокшаровского месторождения (Приморский край), модифицированный 7%-ной соляной кислотой (далее — вермикулит). Сорбент перед использованием промывали дистиллированной водой до получения смывов, не поглощающих в УФ-области спектра при длинах волн 200—400 нм.

Оборудование

Навески образцов исследуемого антибиотика отбирали на электронных весах «GAS» фирмы «OHAUS Corporation» (США), точность 0,0001 г.

Растворы фотометрировали на УФ-спектрофотометре «UV-mini 1240» «Shimadzu» (Япония). Диапазон используемых длин волн — 200—400 нм. Длина кварцевой кюветы — 1 см.

Определение pH растворов проводили на pH-метре HANNA pH-211. Навески используемых сорбентов отбирали на электронных весах «GAS» фирмы «OHAUS Corporation» (США), точность 0,01 г.

Дифрактограммы регистрировали на приборе «Advance D8» («Bruker»), используя Cu K_α излучение, в диапазоне углов $2^\circ < 2\theta < 90^\circ$.

Измерения времен жизни и интенсивности аннигиляций позитронов проводились на спектрометре быстро-быстрых задержанных совпадений при помощи сцинтилляционных пластических детекторов размером $\varnothing 25 \times 15$ мм и ФЭУ 87 на базе анализатора «NOKIA LP 4840». Временное разрешение

спектрометра $2\tau_0$ составляет 270 пс для источника ^{60}Co при 30%-ной ширине энергетического «окна». Использовался циклотронный источник ^{44}Ti с активностью 10—15 $\mu\text{Ки}$.

Сканирующая электронная микроскопия и элементный анализ проводились на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss Ultra Plus с приставкой для элементного анализа X-max от Oxford instruments.

Для проведения исследования было подготовлено три серии проб. Навески модифицированного вермикулита (по 1 г) помещали в 5 конических колб объемом 100 мл. В колбу № 1 вносили 5 мл раствора левомицетина с концентрацией 0,05 мг/мл, в колбу № 2 — 5 мл раствора тетрациклина с концентрацией 0,05 мг/мл, в колбу № 3 — 5 мл раствора цефазолина с концентрацией 0,05 мг/мл, в колбу № 4 — 5 мл раствора ципрофлоксацина с концентрацией 0,05 мг/мл. Таким образом, соотношение сорбент:сорбат для исследуемых антибиотиков и сорбентов составило 4000:1. В колбу № 5 вносили 5 мл дистиллированной воды. Далее все колбы помещали на шейкер и перемешивали со скоростью 175 об/мин в течение 1 ч, затем оставляли на 24 ч для более полного поглощения антибиотиков. Сорбент отфильтровывали от раствора и высушивали на воздухе. Затем каждую серию исследовали, используя рентгенофазовый анализ, методы позитронно-аннигиляционной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

Методом сканирующей электронной микроскопии также исследованы растворы антибиотиков с концентрациями 0,02 и 0,04 мг/мл. Съемка образцов проводилась на кремниевой подложке.

Результаты исследования

Исследование сорбции антибиотиков вермикулитом методом рентгенофазового анализа (РФА).

РФА проводился для уточнения механизма сорбции антибиотиков, так как данный метод позволяет увидеть изменения в строении алюмосиликата.

При сравнении спектров РФА исходного вермикулита и вермикулита с адсорбированными на нем антибиотиками обнаруживается увеличение межслоевого расстояния на 0,12, 0,11, 0,14 и 0,17 Å для левомицетина, тетрациклина, цефазолина и ципрофлоксацина соответственно (рисунки 1 и 2). Изменение межслоевого расстояния указывает на то, что в межслоевое пространство алюмосиликата интеркалирует антибиотик, раздвигая слои алюмосиликата. Кроме того, обнаруживается появление дополнительного пика для всех исследуемых антибиотиков, кроме тетрациклина. Появление нового пика свидетельствует об изменении в кристаллической структуре алюмосиликата, что позволяет выдвинуть предположение, что сорбция идет не только за счет интеркаляции, но и за счет других механизмов. Поверхностная сорбция происходит за счет формирования комплексов между антибиотиком и ионами металлов в межслоевом пространстве. Таким образом можно оценивать степень сорбционной емкости и количество используемого препарата.

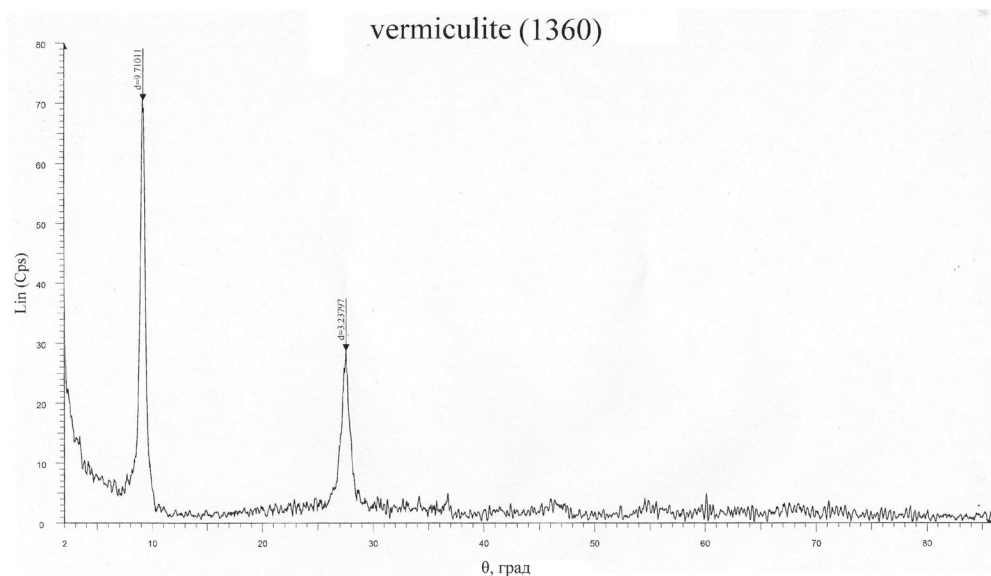


Рис. 1. Дифрактограмма исходного вермикулита.

Fig. 1. Diffractogram of initial vermiculite.

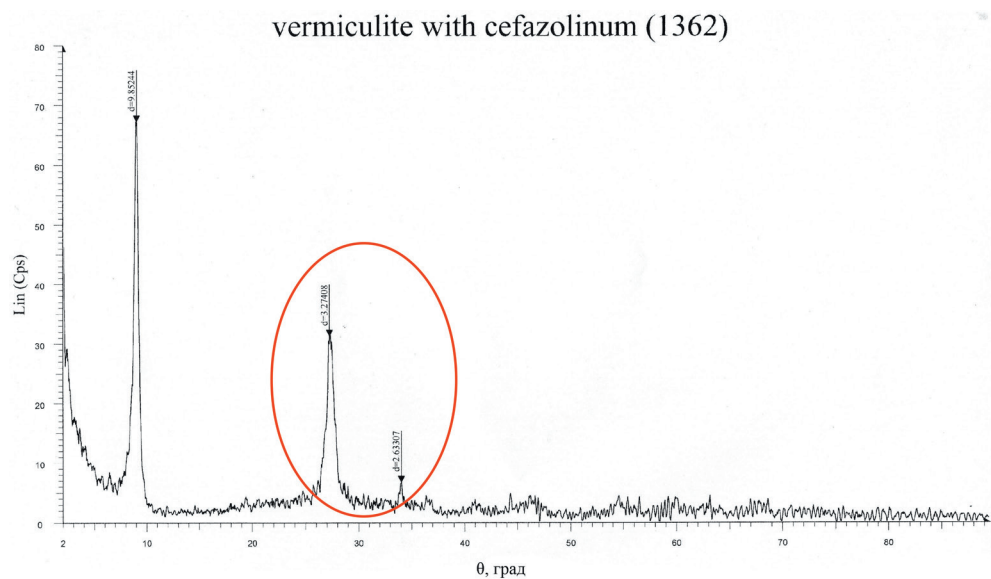


Рис. 2. Дифрактограмма исходного вермикулита с нанесенным цефазолином.

Fig. 2. Diffractograms of vermiculite with cefazolin.

Исследование сорбции антибиотиков вермикулитом методом позитронно-аннигиляционной спектроскопии

На основании данных позитронно-аннигиляционной спектроскопии (таблицы 1 и 2) были рассчитаны объемы ловушек для вермикулита с адсорбированными на нем антибиотиками (левомицетином, тетрациклином и цефазолином). Так как позитроний (Ps) образуется в пустотах, то удельный объем (V_{ps}) зависит от объема пор.

Таблица 1

Экспериментальные данные позитронно-аннигиляционной спектроскопии
Experimental data of positron-annihilation spectroscopy

Образец	Параметры позитронной аннигиляции							
	τ_1 , нс	τ_2 , нс	τ_3 , нс	I_1 , %	I_2 , %	I_3 , %	K_2 , 1/нс	K_3 , 1/нс
Вермикулит исходный	0,141	0,300	0,963	61,48	36,80	1,72	137,42	10,38
Вермикулит с водой	0,152	0,341	1,010	70,83	27,57	1,61	99,58	8,93
Вермикулит с левомицетином	0,152	0,339	1,103	69,02	29,86	1,12	108,68	6,34
Вермикулит с тетрациклином	0,168	0,319	0,957	73,03	25,32	1,64	71,11	8,04
Вермикулит с цефазолином	0,147	0,355	0,833	71,12	27,60	1,29	109,48	7,19

Примечания: τ_i — время жизни позитрония; I_i — интенсивность; $i = 2, 3$; $K_i = I_i \cdot (1/\tau_j - 1/\tau_i)$ — константа скорости реакции.

Таблица 2

Рассчитанные данные позитронно-аннигиляционной спектроскопии
Calculated positron annihilation spectroscopy data

Образец	N_{ps} , *1E 20	N_{e^+} , *1E 20	RPS лов.	R_{e^+} лов.	V_{ps}	V_{e^+}	V_{ps}	V_{e^+}
	1/sm ³	1/sm ³	Å	Å	rel. vol.	rel. vol.	norm. vol.	norm. vol.
Вермикулит исходный	8,40	74,69	4,78	4,36	0,383	2,585	0,129	0,871
Вермикулит с водой	6,68	54,34	4,79	4,34	0,308	1,864	0,142	0,858
Вермикулит с левомицетином	4,70	58,15	4,86	4,34	0,226	1,997	0,102	0,898
Вермикулит с тетрациклином	6,20	38,36	4,67	4,37	0,265	1,340	0,165	0,835
Вермикулит с цефазолином	5,37	59,31	4,67	4,34	0,229	2,029	0,101	0,899

Примечания: N_{ps} — число соударений позитрония; N_{e^+} — число соударений позитрона; R_{ps} — радиус ловушки для позитрония; R_{e^+} — радиус ловушки для позитрона; V_{ps} — объем позитрония; V_{e^+} — объем позитрона.

Расчет объема ловушек производился по формуле:

$$V_{л} = V_{ps} / N_{ps}$$

где V_{ps} — объем позитрония (в относительных единицах); N_{ps} — число соударений позитрония.

Рассчитанные объемы ловушек составляют 153,6, 212,6, 217, 266,1, 188,1 Å для исходного вермикулита, вермикулита с левомицетином, вермикулита с тетрациклином, вермикулита с цефазолином и вермикулита с ципрофлоксацином соответственно. Наибольшее изменение объема ловушки происходит при сорбции цефазолина, что говорит о большом размере молекулы антибиотика. Увеличение объемов ловушек по сравнению с исходным вермикулитом подтверждает предположение об интеркаляции антибиотиков в межслоевое пространство алюмосиликатов, что также является основанием для количественной оценки соотношения сорбент:сорбат.

Исследования сорбции антибиотиков вермикулитом методом сканирующей электронной микроскопии

При изучении полученных снимков вермикулита без нанесенных антибиотиков было обнаружено, что в составе сорбента присутствуют как сферические частицы, так и частицы с плоским слоистым строением (рисунки 3, 4), что связано с природным происхождением сорбента. При этом, сферические частицы практически идентичны слоистым по элементному анализу, что представлено в табл. 3, соответственно существенных различий в сорбционной емкости отмечаться не будет.

Эксперименты [7, 10, 13] показали, что вермикулиты имеют лучшие сорбционные свойства по сравнению с другими группами алюмосиликатов. При их использовании достигается максимальное удаление антибиотиков из раствора. Проведенные исследования показывают, что природа материала не окажет существенного влияния на поглонительную способность. Данный факт следует учитывать при выборе сорбента для очистки содержащих антибиотики вод.

Таблица 3

Данные элементного анализа химических веществ
(спектр 1 соответствует сферической частице, спектр 2 — слоистой)

Elemental analysis of chemicals data
(spectrum 1 corresponds to spherical particle, spectrum 2 — layered)

Образец	Элементы в составе, в атомных %							
	C	O	F	Mg	Al	Si	Cl	Fe
Спектр 1	4,02	68,10	1,29	2,11	1,51	22,07	0,90	–
Спектр 2	4,37	59,48	–	11,42	1,17	15,41	1,19	6,97

Как показано на рис. 5, при увеличении поверхности до нескольких сотен нанометров, и слоистые и сферические частицы имеют пористое строение. Такая структура также способствует увеличению сорбционной поверхности, а значит, показывает более эффективные результаты.

При сравнении снимков исходного вермикулита и вермикулита с нанесенными на него антибиотиками (рисунки 5—7) показано, что происходит изменение его поверхности. Для образцов с нанесенными антибиотиками наблюдается уменьшение количества пор и образование «наплывов» на поверхности частицы алюмосиликата (рис. 6). Образование «наплывов» происходит вследствие аморфной структуры антибиотиков левомицетина и тетрациклина, соответственно, емкость снижается.

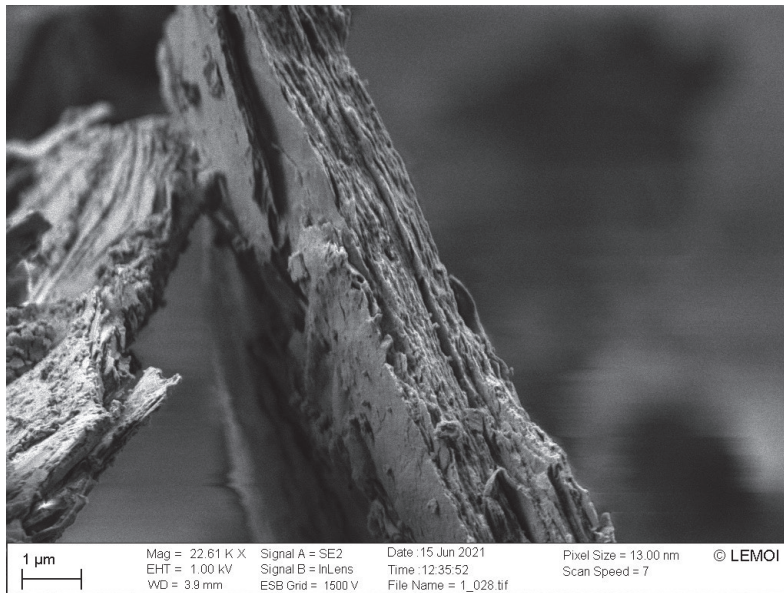


Рис. 3. Слоистые частицы в составе сорбента на основе вермикулита.

Fig. 3. Layered particles in the composition of the sorbent based on vermiculite.

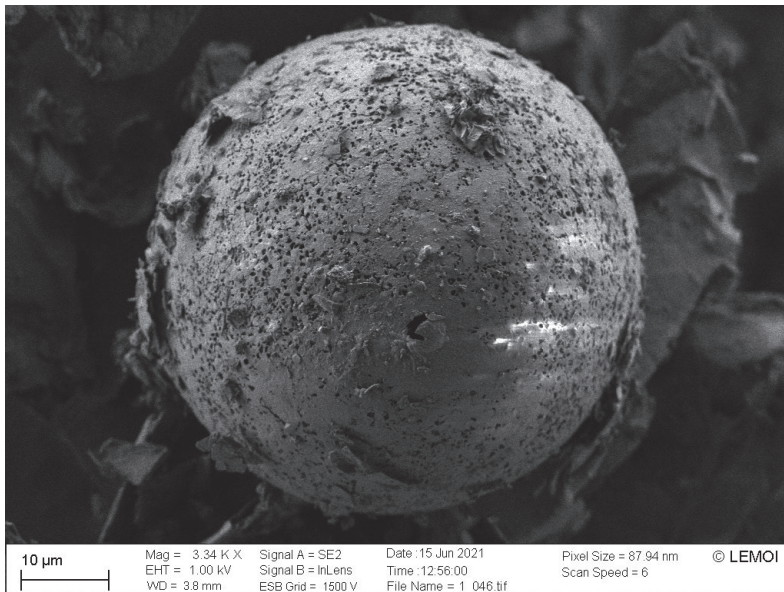


Рис. 4. Сферические частицы в составе сорбента на основе вермикулита.

Fig. 4. Spherical particles in the composition of the sorbent based on vermiculite.

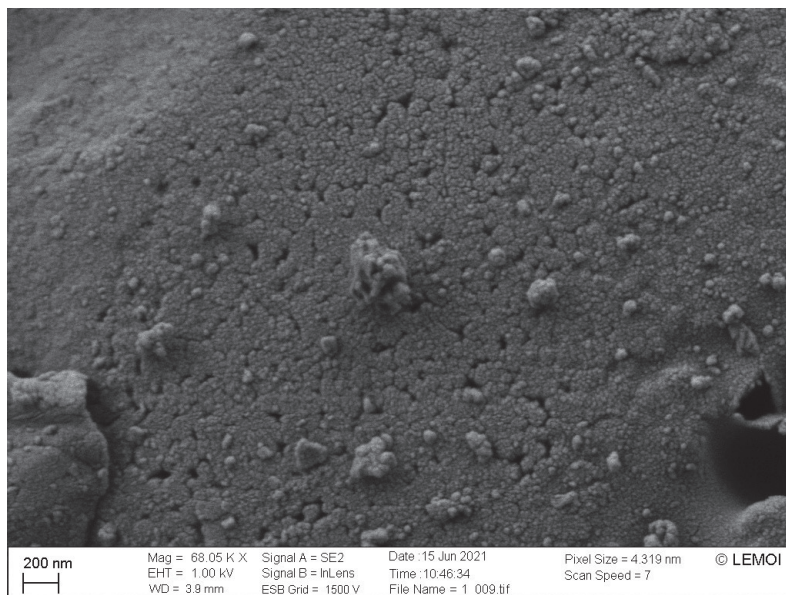


Рис. 5. Снимок поверхности алюмосиликата.

Fig. 5. A snapshot of the aluminosilicate surface.

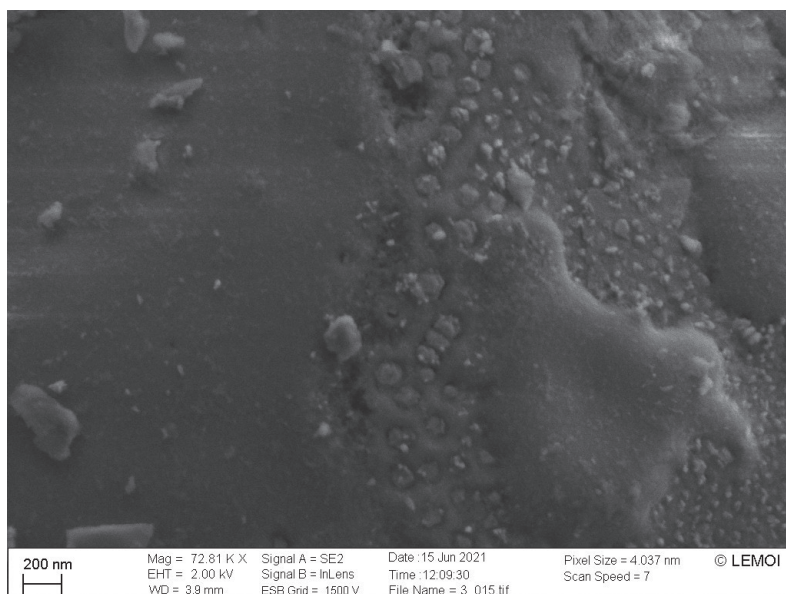


Рис. 6. Поверхность вермикулита с нанесенным тетрациклином.

Fig. 6. Surface of vermiculite with tetracycline.

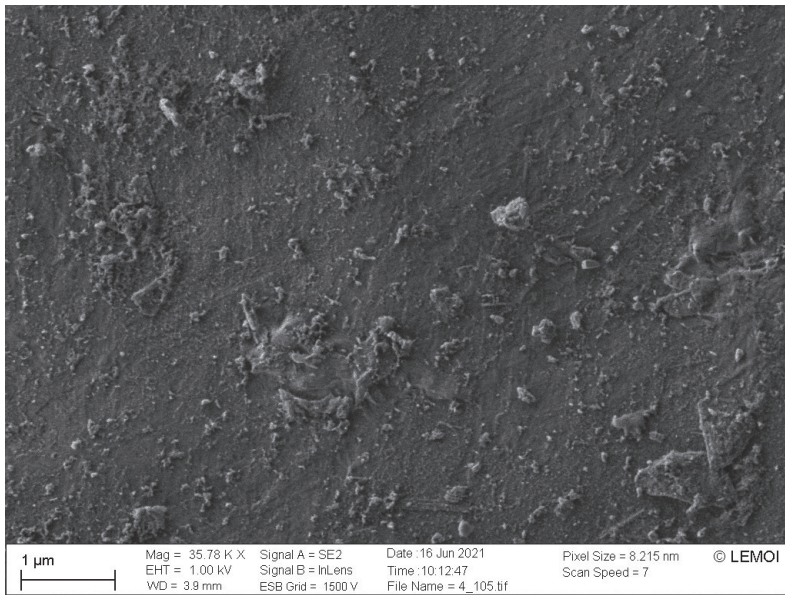


Рис. 7. Поверхность вермикулита с нанесенным цефазолином.

Fig. 7. Surface of vermiculite with cefazolin.

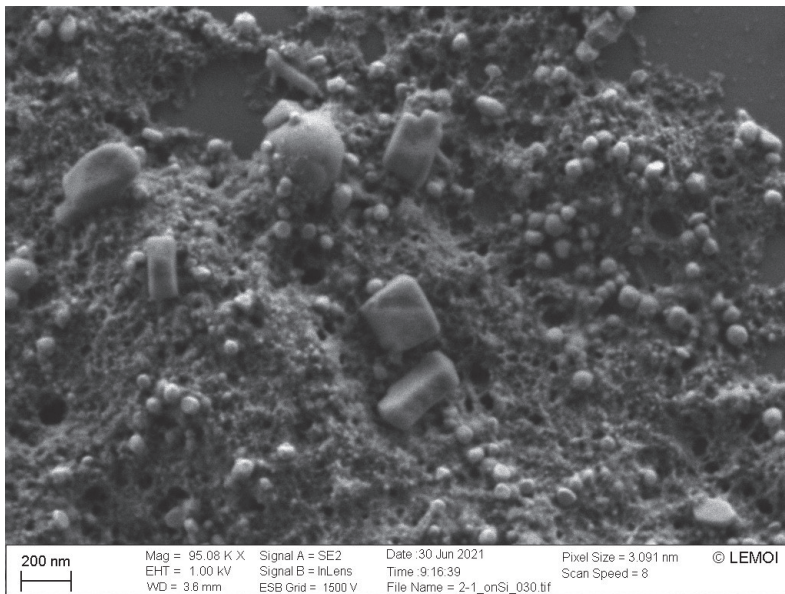


Рис. 8. Поверхность цефазолина на кремниевой подложке.

Fig. 8. Cefazoline surface on silicon substrate.

При этом, в некоторых случаях, для вермикулита с нанесенными цефазолином и ципрофлоксацином наблюдается появление пор крупного размера и правильной формы, что связано со структурой антибиотика. На рис. 8 показано, что для данных антибиотиков в растворе характерно образование кристаллов правильной формы. Таким образом, в процессе сорбции, при попадании в поры алюмосиликата, антибиотик может образовывать кристаллы, которые изменяют размер и форму пор. Затем кристалл растворяется, оставляя поры в измененном виде, что также влияет на эффективность очистки. Оценив скорость формирования кристаллов, можно рассчитать тенденции изменения эффективности очистки загрязненных вод.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что сорбция антибиотиков происходит не только за счет интеркаляции, что подтверждается данными рентгенофазового анализа, но и за счет поверхностных взаимодействий и физической сорбции, что подтверждают исследования, проведенные методами позитронно-аннигиляционной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Таким образом, данные методы следует использовать для оценки сорбции материалов аналогичных классов. Получаемые при этом показатели ложатся в основу расчета количества материала, применяемого для очистки содержащих антибиотики сточных вод, степени его эффективности для различных групп антибиотиком и частоты его замены.

Список источников

1. Басов В. Н., Бахирева О. И., Вольхин В. В., Пан Л. С. Синтез сорбционных материалов на основе вермикулита и микроорганизмов для извлечения ионов и радионуклидов стронция // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 48—52.
2. Бахирева О. И., Пан Л. С., Вольхин В. В., Белякова О. В., Федорова М. С. Синтез и использование сорбционных материалов на основе вермикулита и микроорганизмов для извлечения стронция // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2010. № 11. С. 150—156.
3. Sari A., Tüzen M. Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite // Microporous and Mesoporous Materials. 2013. Vol. 170. P. 155—163.
4. Suzuki N., Ozawa S., Ochi K., Chikuma T., Watanabe Yu. Approaches for cesium uptake by vermiculite // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2013. Vol. 88, No 9. P. 1603—1605.
5. Holešová S., Štembírek J., Bartošová L., Pražanová G., Valášková M., Samlíková M., Pazdziora E. Antibacterial efficiency of vermiculite-chlorhexidine nanocomposites and results of the in vivo test of harmlessness of vermiculite // Materials Science and Engineering C. 2014. Vol. 42. P. 466—473.
6. Dos Anjos V. E., Rohwedder J. R., Cadore S., Abate G., Grassi M. T. Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn // Applied Clay Science. 2014. Vol. 99. P. 289—296.
7. Соколова Л. И., Гальченко Д. С., Смирнова М. Г., Блиновская Я.Ю. Использование природных алюмосиликатов для очистки сточных вод от антибиотиков различных классов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 113—125.

8. Белюстова К. О., Соколова Л. И. Определение содержания левомицетина в пищевых продуктах с различной массовой долей жира // Техника и технология пищевых производств. 2011. Т. 3, № 22. С. 107—111.
9. Белюстова К. О., Шапкин Н. П., Соколова Л. И., Привар Ю. О. Применение природных алюмосиликатов месторождений приморского края для концентрирования антибиотиков левомицетина и тетрациклина // Евразийский Союз Ученых. 2014. Т. 5, № 3. С. 154—156.
10. Привар Ю. О., Соколова Л. И., Белюстова К. О., Шапкин Н. П. Применение природных алюмосиликатов месторождений Приморского края для концентрирования антибиотиков левомицетина и тетрациклина // Современные концепции научных исследований. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. М., 2014. С. 145—146.
11. Соколова Л. И., Шапкин Н. П., Белюстова К. О. Патент № 2431829 — Способ определения содержания левомицетина в пищевых продуктах и сорбент для его осуществления. 2010.
12. Чучалина И. В., Соколова Л. И., Земнухова Л. А. Концентрирование цефалоспориновых антибиотиков на природных сорбентах // Исследовано в России. 2006. С. 1851—1842.
13. Шапкин Н. П., Шкуратов А. Л., Разов В. И., Золотарь Р. Н., Рассказов В. А., Соколова Л. И., Жамская Н. Н., Каткова, С.А. Хальченко И. Г. Химическая модификация алюмосиликатов и исследование их физико-химических свойств // Журнал неорганической химии. 2014. Т. 59, № 9. С. 1—6.
14. Шапкин Н. П., Разов В. И., Хальченко И. Г., Короченцев В. Г. Исследование строения модифицированных вермикулитов различными физико-химическими методами // Химическая промышленность сегодня. 2014. № 9. С. 10—18.
15. Privar Yu. O., Sokolova L. I., Belyustova K. O., Shapkin N. P., Kolycheva V. B. The application of natural aluminosilicate minerals of Primorsky region for the isolation of chloramphenicol and tetracycline antibiotics from a multicomponent food product matrix // Proceedings of the academic conference in English of school of natural science students. 14—15 March 2014. P. 59.

References

1. Basov V. N. Bakhireva O. I., Vol'khin V. V., Pan L. S. Synthesis of sorption materials based on vermiculite and microorganisms for extracting strontium ions and radionuclides. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhia = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2012;(2): 48—52. (In Russ.).
2. Bakhireva O. I., Pan L. S., Vol'khin V. V., Belyakova O. V., Fedorova M. S. Synthesis and using of sorption materials based on vermiculite and microorganisms for strontium extraction. *Vestnik Permskogo natsionalnogo polytechnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*. 2010;(11):150—156.
3. Sari A., Tüzen M. Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013;(170):155—163.
4. Suzuki N., Ozawa S., Ochi K., Chikuma T., Watanabe Yu. Approaches for cesium uptake by vermiculite. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2013;88(9):1603—1605.
5. Holešová S., Štembírek J., Bartošová L., Pražanová G., Valášková M., Samlíková M., Pazdziora E. Antibacterial efficiency of vermiculite-chlorhexidine nanocomposites and results of the in vivo test of harmlessness of vermiculite. *Materials Science and Engineering C*. 2014;(42):466—473.
6. Dos Anjos V. E., Rohwedder J. R., Cadore S., Abate G., Grassi M. T. Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: Adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn. *Applied Clay Science*. 2014;(99):289—296.
7. Sokolova L. I., Gal'chenko D. S., Smirnova M. G., Blinovskaya Ya. Yu. Using of natural aluminosilicates for clean wastewater from antibiotics various classes. *Gidrometeorologia i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(62):113—125. (In Russ.).
8. Belyustova K. O., Sokolova L. I. Determination of levomycetine content in foodstuffs with different weight fractions of fat. *Technika i tekhnologiya pischevykh produktov = Technique and technology of food production*. 2011;3(22):107—111. (In Russ.).

9. Belyustova K. O., Shapkin N. P., Sokolova L. I., Privar Yu. O. Using of natural aluminosilicates of deposits of the coastal region for concentration of antibiotics levomycetine and tetracycline. *Evrasiyskiy soyuz uchenshv = Eurasian Union of Scientists*. 2014;5(3):154—156. (In Russ.).
10. Privar Yu. O., Sokolova L. I., Belyustova K. O., Shapkin N. P. Using of natural aluminosilicates of Primorsky Krai deposits for concentration of levomycetine and tetracycline antibiotics. *Sovremennye koncepcii nauchnykh issledovaniy. Sbornik trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Modern concepts of scientific research. Collection of works of the V International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2014:145—146. (In Russ.).
11. Sokolova L. I., Shapkin N. P., Belyustova K. O. Patent № 2431829 – Method for determination of levomycetine content in food products and sorbent for its implementation. 2010. (In Russ.).
12. Chuchalina I. V., Sokolova L. I., Zemnukhova L. A. Concentration of cephalosporin antibiotics on natural sorbents. *Issledovano v Rossii = Investigated in Russia*. 2006:1851—1842. (In Russ.).
13. Shapkin N. P., Shkuratov A. L., Razov V. I., Zolotar R. N., Rasskazov B. A., Sokolova L. I., Zham-skaya N. N., Katkova S. A., Khal'chenko I. G. Chemical modification of aluminosilicates and study of their physicochemical properties. *Zhurnal neorganicheskoy khimii = Journal of Inorganic Chemistry*. 2014;59(9):1—6. (In Russ.).
14. Shapkin N. P., Razov V. I., Khal'chenko I. G., Korochentsev V. G. Study of the structure of modified vermiculites by various physicochemical methods. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya = Chemical industry today*. 2014;(9):10—18. (In Russ.).
15. Privar Yu. O., Sokolova L. I., Belyustova K. O., Shapkin N. P., Kolycheva V. B. The application of natural aluminosilicate minerals of Primorsky region for the isolation of chloramphenicol and tetracycline antibiotics from a multicomponent food product matrix. *Proceedings of the academic conference in English of school of natural science students*. 14—15 March 2014:59.

Сведения об авторах

Гальченко Дарья Сергеевна, аспирант департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, galchenko_ds@mail.ru.

Сokolova Лариса Ивановна, канд. хим. наук, профессор департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов, директор Эколого-аналитического центра, Дальневосточный федеральный университет, sokolova.li@dvvfu.ru.

Ткачев Владимир Вадимович, канд. физ.-мат. наук, доцент департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, tkachev.vv@dvvfu.ru.

Шапкин Николай Павлович, д-р хим. наук, профессор департамента химии и материалов Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, shapkin.np@dvvfu.ru.

Разов Валерий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доцент департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий Института наукоемких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет, razov.vi@dvvfu.ru.

Блиновская Яна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор департамента природно-технических систем и техносферной безопасности Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, blinovskaia.iaiu@dvvfu.ru.

Information about authors

Daria S. Gal'chenko, post-graduate student of Chemistry and Materials Department of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Larisa I. Sokolova, PhD (Chem. Sci.), Professor, Chemistry and Materials Department of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, director of Ecological and Analytical Centre, Far Eastern Federal University.

Д. С. ГАЛЬЧЕНКО, Л. И. СОКОЛОВА, В. В. ТКАЧЕВ и др.

Vladimir V. Tkachev, PhD (Phys.-Math. Sci.), Associate Professor, Department of Theoretical Physics and Intelligent Technology of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Nikolay P. Shapkin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Chemistry and Materials Department of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Valeriy I. Razov, PhD (Phys.-Math. Sci.), Associate Professor, Department of Theoretical Physics and Intelligent Technology of the Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University.

Yana Yu. Blinovskaya, Dr. Sci. (Tech.), Professor of natural and technical system and technosferical safety Polytechnical institute, Far Eastern Federal University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 26.03.2022.

Принята к публикации после доработки 26.07.2022.

The article was received on 26.03.2022.

The article was accepted after revision on 26.07.2022.

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 508—524.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):508—524.

ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 004.032.26:[551.43+551.50+504](282.256.17)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524

Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы)

***Сергей Иванович Биденко¹, Игорь Сергеевич Храмов²,
Александр Александрович Бенгерт³,
Ирина Сергеевна Мучкаева⁴***

¹ ПАО «Интелтех», Санкт-Петербург, VidenkoSI@inteltech.ru

² ГКУ Тверской области «Центр информационных технологий», Тверь

³ ФГУП «Гидрографическое предприятие», Санкт-Петербург

⁴ ФКГУ «9-й Отряд Федеральной противопожарной службы по Санкт-Петербургу», Санкт-Петербург

Аннотация. Проанализированы физико-географические и социально-географические условия акватории и района Обской губы как составной части Арктической зоны Российской Федерации. Определены направления использования геоинформационных моделей и методов представления и использования пространственных данных для поддержки управления территориальной хозяйственной активностью в Арктике. Предложена основанная на искусственных нейронных сетях (ИНС) модель геоданных, содержащая минимально необходимый для пространственного анализа набор территориальных параметров. Выполнено решение задачи качественного оценочного анализа навигационно-гидрографической и экологической обстановки в районе Обской губы, являющейся типовой задачей классификации для искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: морская территориальная активность, геоинформационная поддержка управления, геоэкология, искусственные нейронные сети, модель территориальной обстановки.

Для цитирования: Биденко С. И., Храмов И. С., Бенгерт А. А., Мучкаева И. С. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 508—524. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.

Original article

Geoinformation procedure for assessing the regional situation on the basis of operational ANN-analysis of hydrometeorological and environmental information (on the example of the Ob Bay)

Sergey I. Bidenko¹, Igor S. Khramov², Alexander A. Bengert³, Irina S. Muchkaeva⁴

¹ PAO “Inteltech”, St. Petersburg, Russia

² State Institution of the Tver Region “Center of Information Technologies”, Tver, Russia

³ FGUP “Hydrographic Enterprise”, St. Petersburg, Russia

⁴ FKGU “9th Detachment of the Federal Fire Service for St. Petersburg”, St. Petersburg, Russia

Summary. The physical-geographical and socio-geographical conditions of the water area and the Ob Bay area as an integral part of the Arctic zone of the Russian Federation are analyzed. The directions of using geoinformation models and methods of representation and use of spatial data to support the management of territorial economic activity in the Arctic are determined. The methods of using artificial neural networks to assess the navigational-hydrographic, hydrometeorological and ecological situation in areas adjacent to specially protected Arctic natural territories have been developed. A geodata model based on artificial neural networks containing the minimum set of territorial parameters necessary for spatial analysis is proposed. The set of parameters necessary to achieve the specified accuracy in the analysis of the situation is justified. The requirements for the training surface of such a network are formulated. The comparison of different architectures of neural networks with a different number of internal layers and neurons on them is carried out. The application of a neural network by the type of recurrent neural structure with two hidden layers consisting of N neurons is justified, as well as a procedure for training a network on ten thousand sets with an error propagation algorithm. The problem of the estimated analysis of the navigational-hydrographic and ecological situation in the area of the Gulf of Ob, which is a typical classification problem for an artificial neural network, has been solved. Based on the results, evaluation cartoids were compiled, which make it possible to analyze and predict the environmental situation in the region.

Keywords: marine territorial activity, geoinformation management support, geoecology, artificial neural networks, territorial situation model.

For citation: Bidenko S. I., Khramov I. S., Bengert A. A., Muchkaeva I. S. Geoinformation procedure for assessing the regional situation on the basis of operational INS-analysis of hydrometeorological and environmental information (on the example of the Ob Bay). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):508—524. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-508-524.

Введение

Акватория Обской губы (рис. 1) занимает особое положение в Арктической зоне Российской Федерации (АЗ РФ). В этом районе сосредоточены значительные месторождения углеводородов (природный газ, нефть, уголь) и других полезных ископаемых [1]. По Морскому каналу Обской губы осуществляются интенсивные

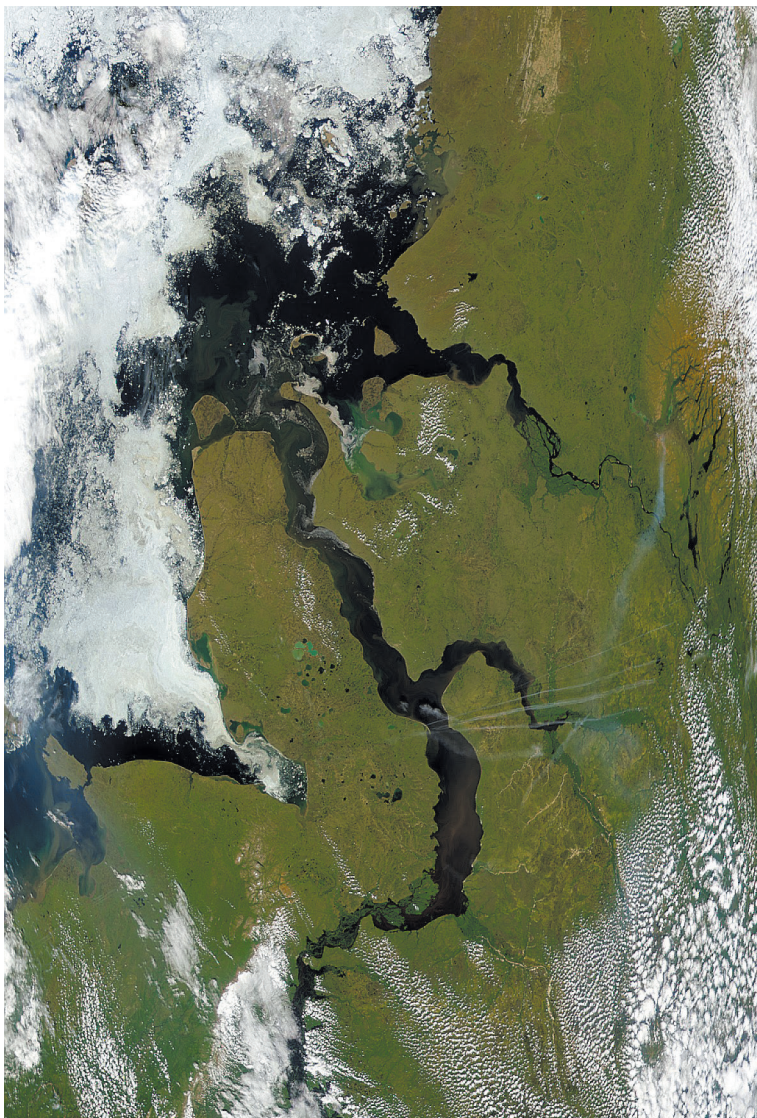


Рис. 1. Космоснимок района Обской губы.

Fig. 1. A satellite image of the Ob Bay area.

морские перевозки сжиженного природного газа, других значимых материалов и грузов.

В акватории Обской губы проводятся активные изыскания, научные исследования, прокладываются кабели и трубопроводы, бурятся скважины, решаются вопросы, связанные с обороной страны. В силу стратегической важности региона

в акватории Обской губы ведется интенсивное строительство новых терминалов, портов и других хозяйственных сооружений.

Акватории и району Обской губы присущи как общие для АЗРФ затрудняющие морскую территориальную активность (МТА) физико-географические условия (ФГУ) и хозяйственно-географические условия (ХГУ), так и специфические территориальные факторы. К негативным ФГУ относятся: низкие температуры, сильные ветры, аномалии геофизических полей Земли (в первую очередь магнитного поля), недостаточная инсоляция, тяжелые подвижные льды, длительность восстановления нарушенных экосистем, ионизация атмосферы. Отрицательные ХГУ: удаленность от промышленных центров, неразвитость инфраструктуры, демографические ограничения, высокая стоимость ресурсов и услуг. Специфические территориальные факторы — мелководность акватории, большая изменчивость рельефа дна из-за интенсивных выносов речного грунта, узость Морского канала, недостаточное навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение, высокий уровень загрязнения акватории и прибрежной зоны.

Это требует особого внимания и учета при организации и управлении территориальной хозяйственной активностью в регионе. В силу геопространственного характера этой деятельности (располагается, распространяется и осуществляется на поверхности и относительно поверхности Земли) при регулировании территориальной активности в регионе может применяться модельно-методический аппарат геоинформационной поддержки управления [1, 2]. Суть геоинформационной поддержки управления территориальными объектами и системами состоит в пространственной интерпретации категорий и этапов управления, трансформации рабочей географической графики из пассивной карты-подложки в активное геоизображение, наглядно показывающее в каком районе и каким образом необходимо действовать.

Морская арктическая активность протекает в определенном функциональном геопространстве и включает в себя грузовые и пассажирские перевозки, ледовые проводки, добычу углеводородов и полезных ископаемых на шельфе, прокладку кабелей и трубопроводов, дноуглубительные работы, изыскания и исследования Мирового океана, спасательные операции, оборонную деятельность и т.д. [3]. Пространственный характер МТА предполагает геоинформационные процедуры поддержки управления видами морской территориальной активности [4]. Эти процедуры соответствуют традиционным этапам методики управления (уяснение задачи, оценка обстановки, принятие решения, планирование, реализация решения) и направлены на геопространственное представление и наглядное картографическое отображение базовых категорий управления (задача, решение, план, обстановка) [1, 3, 4] (рис. 2).

В работах [4, 5] отмечается, что категория «обстановка» является системообразующей в структуре геоинформационной методики управления территориальной активностью, т. к. к ней циклически обращаются все другие этапы и категории управления. Особенно активно эти обращения происходят на стадиях оценки ситуации и реализации решения (при выявлении рассогласования плановой информации и информации состояния) [6, 7].

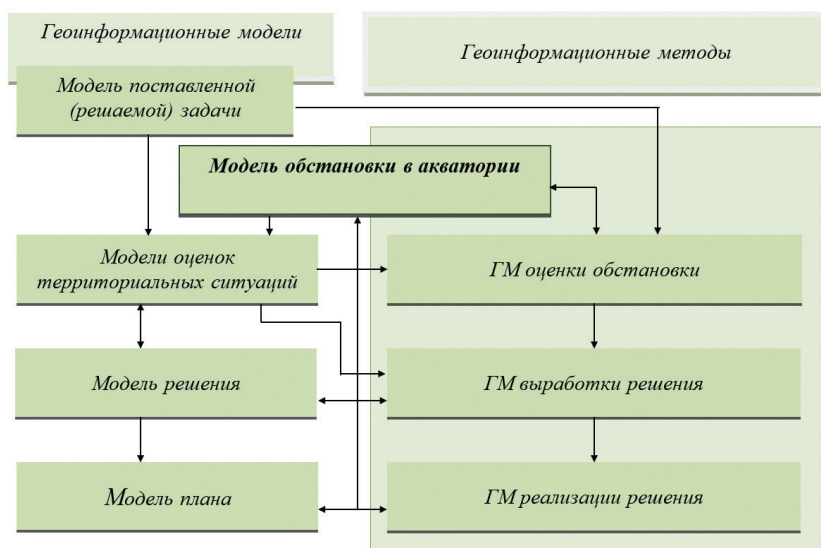


Рис. 2. Система геокибернетического моделирования (ГМ — геоинформационный метод).

Fig. 2. Cybernetic modeling system (GM — geoinformation method).

Геомодель обстановки [6, 7] постоянно наполняется (обновляется) текущей информацией об объектах МТА и среде, в которой протекает хозяйственная морская активность.

Наиболее динамической в системе «обстановка» является гидрометеорологическая и экологическая информация, связанная с быстроменяющимися процессами метеорологической и гидрологической среды. К примеру, интенсивное освоение в Арктике района Обской губы с целью эксплуатации энергетических ресурсов, их хранения и транспортировки морским путем требует проведения многочисленных продолжительных исследований гидрометеорологических (лед, осадки, течения, ветер, видимость, давление) и геоэкологических (разливы нефти, загрязненность акватории и грунта, концентрация вредных веществ в воздухе и др.) параметров, предполагающих в течение ограниченного времени многофакторный анализ больших объемов разноплановых оперативных данных обстановки.

Для оценки навигационно-гидрографических, гидрометеорологических и экологических факторов в системе арктической МТА представляется перспективным использование аппарата искусственных нейронных сетей [2, 4, 8, 9]. К настоящему времени уже накоплен определенный опыт применения нейросетевого моделирования для решения задач оценки обстановки, районирования, построения региональных границ, обработки навигационных измерений [3, 5, 10, 11] и др. Это обеспечивает оперативность оценок опасных факторов арктической геосреды, позволяет оптимизировать процедуры ледовой навигации и экологической безопасности в заданном районе.

Целью работы являлась разработка искусственной нейронной сети, позволяющей прогнозировать влияние добычи ресурсов в регионе на экологическую обстановку и состояние окружающей среды.

Модель геоданных

Для использования искусственных нейронных сетей необходимо предварительно обработать массивы входных данных. Для этого представим данные в виде следующей модели. Базовым элементом модели является территория, то есть некоторая пространственная структура, графически на изображении ограниченная ломанной линией и имеющая связанные числовые данные, являющиеся характеристиками данного объекта [8].

Математически модель может быть представлена в виде:

$$M = \text{ГО} \cup (N_1 \dots N_s, E_1 \dots E_r, O(N_1 \dots N_s, E_1 \dots E_r)),$$

где N , E — вектора, соответствующие наборам параметров обстановки для каждой территории (описаны ниже); O — оценка, соответствующая указанным наборам параметров обстановки; ГО — графическое отображение модели (геоизображение).

Предлагаемая модель не учитывает особенностей рельефа и реального масштаба в рассматриваемой зоне. Но сделанные упрощения позволяют оптимизировать формат хранения данных для их дальнейшего использования с помощью искусственных нейронных сетей. Основным массивом данных в нашем случае являются таблицы числовых данных, связанные с картой, а не сама карта.

Принципиальным отличием представленной модели являются топологический переход от географически конкретного представления территориальной ситуации к пространственно-абстрактному картоиду, что позволяет эффективно формировать наборы исходных геоданных для работы (обучения) ИНС [4, 5, 12].

Входными параметрами модели являются различные аспекты обстановки в ближней морской зоне. Предлагается разделить входные параметры модели представления окружающей обстановки на следующие группы:

- навигационно-гидрографические и гидрометеорологические параметры (N);
- экологические параметры (E).

К навигационно-путевым параметрам текущей задачи относятся глубины и рельеф дна, ледовая обстановка, направление и сила ветра, течения, температурный режим, а также средства навигационного оборудования.

Экологические параметры важны в условиях текущей задачи ввиду того, что в рассматриваемой зоне находятся особо охраняемые природные территории на п-ове Явай (к северу от 72-й параллели); северная и северо-западная части п-ова Мамонта; п-ов Олений; побережье Юрацкой губы; о-ва Олений, Шокальского, Песцовые, Проклятые и Ровный [3]. Они включают в себя зоны традиционного экстенсивного природопользования коренных малочисленных народов (ненцев и эвенков), ареалы обитания белого медведя и атлантического моржа, места гнездовья краснокнижных видов птиц и места нереста рыб. Примеры экологических параметров района Обской губы приведены на рисунках 3 и 4.

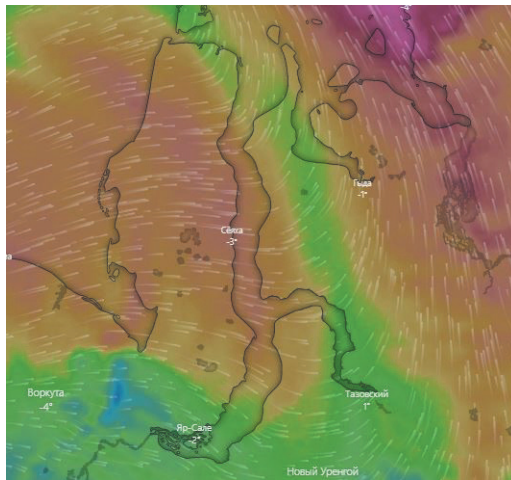


Рис. 3. Карта обстановки, отображающая навигационно-путевые параметры (зоны осадков, зоны давления) в рассматриваемой зоне.

Fig. 3. A situation map showing navigation and travel parameters (precipitation zones, pressure zones) in the zone under consideration.

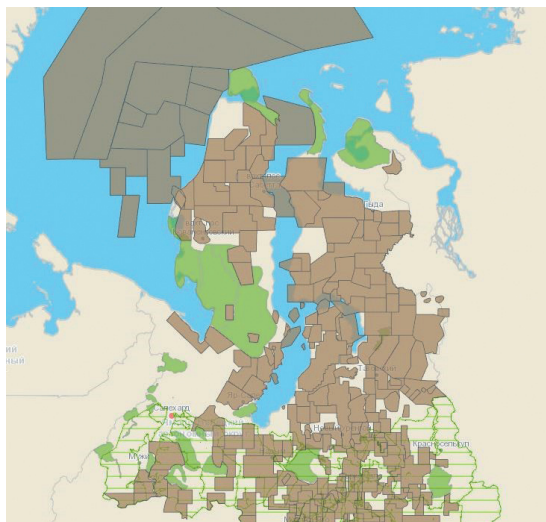


Рис. 4. Карта обстановки, отображающая экологические параметры в рассматриваемой зоне (ареалы обитания краснокнижных животных и растений (заштрихованные коричневым), зоны экстенсивного природопользования коренных народов (заштрихованы зеленым)).

Fig. 4. A map of the situation showing environmental parameters in the zone under consideration (habitats of red book animals and plants (shaded in brown), zones of extensive nature use of indigenous peoples (shaded in green)).

В результате работы нейронной сети получается число в диапазоне от 0 до 1. В связи с этим оценка будет представлять собой число от 0 до 10, полученное округлением результата работы НС до десятых с последующим умножением на 10. Существует возможность сделать более точную шкалу оценивания, однако это выходит за границы поставленной задачи и существенно усложняет работу программы. Будем считать, что чем больше оценка, тем хуже ситуация в рассматриваемой части морской зоны.

Решение задачи оценки территориальной обстановки с помощью ИНС

В качестве базовой архитектуры выбрана рекуррентная нейронная сеть (РНС) с двумя скрытыми слоями [2, 4], состоящими из N нейронов (рис. 5). Здесь N — число входных параметров.

Базовые свойства РНС (запоминание результатов обработки предыдущего шага) используется в связи с тем, что физические поля Земли (ФПЗ) имеют континуальный характер, изменяются плавно, изменения ФПЗ, как правило, обуславливаются взаимным влиянием нескольких пространственных факторов.

После обучения нейронной сети достаточным количеством обучающих наборов данных получаем значение ошибки, близкое к заранее заданному.

Для получения большей точности к архитектуре нейронной сети были последовательно добавлены еще три скрытых слоя по N нейронов.

После сравнения полученных значений ошибки было установлено, что добавление скрытых слоев, начиная с пятого, не имеет практического смысла, ввиду незначительного улучшения значений точности при существенном росте затрат машинных ресурсов и времени на работу нейронной сети.

В качестве функции активации нейрона используется сигмовидная функция:

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}.$$

Данная функция позволяет существенно сократить вычислительную сложность метода обратного распространения ошибки, используемого для обучения нейронной сети.

Обучающий набор для каждого анализируемого района (зоны) формировался из порядка 10 000 векторов территориальных параметров, оценками навигационно-гидрографической, гидрометеорологической и тактической ситуации, а также служебными признаками для каждого набора.

Оценивание условий и составление обучающего множества выполнялось вручную методом экспертной оценки. Само обучение нейронной сети выполнялось с помощью алгоритма обратного

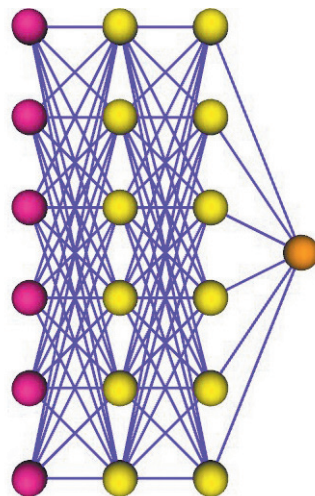


Рис. 5. Результирующая архитектура нейронной сети.

Fig. 5. The resulting neural network architecture.

распространения ошибки, который является оптимальным для задач территориальной классификации [2, 4, 10].

Необходимо отметить, что нейронная сеть, используемая для экологической оценки, нуждается в длительном обучении на большом количестве обучающих наборов [2, 12]. Обобщенный алгоритм (последовательность) обучения сети в данном случае выглядит следующим образом:

- 1) прямой проход сети;
- 2) вычисление ошибки выходного элемента;
- 3) расчет величины корректировки весов связей;
- 4) определение ошибки элементов первого скрытого слоя;
- 5) корректировка веса связей;
- 6) определение величины корректировки оставшихся весов;
- 7) завершение обратного прохода сети.

После определения архитектуры рабочей сети, требуется решить задачу получения оптимального управления, регулирующего динамику обучения ИНС.

Для этого сеть представляется дискретной системой векторов параметров (факторов) геосреды, физический смысл которых и составляет описание динамической обстановки в оцениваемой морской зоне. На каждом шаге k эти вектора обозначаются как набор x^{k-v}, x^{k-v+1}, x^k . Вводятся вектора управления u^{k-p}, u^k . Тогда минимизируемый функционал примет вид:

$$I([x][u]) = \sum_{(k=0)}^{(q-1)} f_k^0(x^{(k-n)}, \dots, x^k, u^{(k-m)}, \dots, u^k) + S(x^q); \quad (1)$$

Переход из k -ого состояния в $k + 1$ описывается рекуррентными соотношениями:

$$x^{k+1} = f_k(x^{k-n}, \dots, x^k, u^{k-m}, \dots, u^k), \quad k = \overline{1, q-1}; \quad (2)$$

$$x^k = b^k \in \mathbb{R}^l, \quad k = -v, \dots, 0; \quad (3)$$

$$u^k = u^k \in \mathbb{R}_r, \quad k = -p, \dots, 0; \quad (4)$$

с заданными начальными условиями:

$$z^k = (x^{k-n}, \dots, x^k, u^{k-m}); \quad [u] = [u^0, \dots, u^{q-1}]; \quad [\tilde{u}] = [u^0, \dots, u^{i-1}, u^i + \Delta, u^{i+1}, \dots, u^{q-1}];$$

$$[x] = [x^0, \dots, x^q]; \quad [\tilde{u}] = [u^0, \dots, u^{i-1}, u^i + \Delta, u^{i+1}, \dots, u^{q-1}]; \quad [x] = [x^0, \dots, x^q];$$

$$[\tilde{x}] = [x^0, \dots, x^{i-1}, x^i + \Delta, x^{i+1}, \dots, x^q].$$

Дадим приращение вектору $x^i + \Delta$, тогда последующие векторы $\widetilde{x}_{i+1}, \dots, \widetilde{x}_q$ вычисляются согласно формуле (2):

$$\tilde{x}^{i+1} = f_i(x^{i-n}, \dots, x^{i-1}, x^i + \Delta, \dots, x^{q-1}).$$

Определим сопряженный вектор:

$$p^i = \frac{dI([x],[u])}{d x^i} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{i([\tilde{x}][\tilde{u}]) - I([x][u])}{\Delta}; \quad (5)$$

Из (5) следует, что если $i = q$, то имеет место равенство:

$$p^q = \frac{dI([x],[u])}{d_{x^q}} = \frac{\partial\Phi(x^q)}{\partial x^q}; \quad (6)$$

если $i = q - 1$, то

$$p^{q-1} = \frac{dI}{d_{x^{q-1}}} + \left(\frac{d_{x^q}}{d_{x^{q-1}}} \right)^T \frac{dI}{d_{x^{q-1}}}. \quad (7)$$

В общем случае имеем:

$$\begin{aligned} p^i &= \frac{\partial I}{\partial x^i} + \left(\frac{\partial x^{i+1}}{\partial x^i} \right)^T \frac{\partial I}{\partial x^i} + \dots + \left(\frac{\partial x^{i+v+1}}{\partial x^i} \right)^T \frac{dI}{dx^{i+v+1}} = \frac{\partial f_i^0(z^i)}{\partial x^i} + \dots + \\ &+ \frac{\partial f_{i+v}^0(z^{i+n})}{\partial x^i} + \left[\frac{\partial f_i(z^i)}{\partial x^i} \right]^T p^{i+1} + \dots + \left[\frac{\partial f_{i+v}^0(z^{i+v})}{\partial x^i} \right] p^{i+n+1} = \\ &= \sum_{l=0}^n \frac{\partial}{\partial x^i} \left[\partial f_{i+l}^0(z^{i+l}) + (p^{i+l+1}, f_{i+l}(z^{i+l})) \right], \quad i = \overline{1, q-1}, \quad p^j = 0, \quad j > q. \end{aligned} \quad (8)$$

Введем функцию:

$$H_k(z^k, p^{k+1}) = \lambda_0 f_k^0(z^k) + (p^{k+1}, f_k(z^k)).$$

Тогда (8) с помощью этой функции преобразуется следующим образом:

$$p^i = \sum_{l=0}^v \frac{\partial H_{i+l}(z^{i+l}, p^{i+l+1})}{\partial x^i}, \quad i = \overline{q-1, 1}. \quad (9)$$

Множество векторов $[x] = [x^1, \dots, x^q]$ зависит от начального набора состояния x^0 и допустимых векторов $[u] = [u^0, \dots, u^{q-1}]$, или $[x] = [x(u)]$, и минимизирует сложную функцию $I = I([x(u)], [u])$ аргумента u . Полная производная этой функции по вектору u^i определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{dI([x(u)], [u])}{du^i} &= \frac{dI[x(u), [u])}{du^i} + \sum_{l=0}^p \frac{\partial x^{i+l+1}[u]}{\partial u^i} \frac{dI([x(u)], [u])}{dx^{i+l+1}} = \\ &= \sum_{l=0}^p \frac{\partial f_{i+l}^0(z^{i+l})}{\partial u^{i+l}} + \left[\frac{\partial f_{i+l}^0(z^{i+l})}{\partial u^{i+l}} \right]^T p^{i+l+1} = \sum_{l=0}^p \frac{\partial}{\partial u^i} H_{i+l}(z^{i+l}, p^{i+l+1}). \end{aligned} \quad (10)$$

Функция Лагранжа для дискретной задачи оптимального управления (1)–(4) имеет вид:

$$L([x], [u], [p], \lambda_0) = \sum_{i=0}^{q-1} \left[\lambda_0 f_i^0(z^i) + (p^{i+1}, f_i(z^i) - x^{i+1}) \right] + \lambda_0 \Phi(x^q).$$

Чтобы получить необходимые условия оптимальности, вычислим производные функции Лагранжа по переменным x^i , $i = \overline{1, q}$, $i = \overline{1, q-1}$:

$$\frac{\partial L}{\partial x^i} = \sum_{l=0}^v \frac{\partial H_{i+l}(z^{i+l}, p^{i+l+1})}{\partial x^i} - p^i = 0, \quad i = \overline{1, q-1}, \quad \frac{\partial L}{\partial x^q} = \frac{\partial \Phi(x^q)}{\partial x^q} - p^q = 0,$$

$$\frac{\partial L}{\partial u^i} = \sum_{l=0}^p \frac{\partial H_{i+l}(z^{i+l}, p^{i+l+1})}{\partial u^i} = 0, \quad i = \overline{0, q-1}. \quad (11)$$

Сравнивая формулы (10) и (11), получим следующее равенство:

$$\frac{\partial L}{\partial u^i} = \frac{dI([x(u)], [u])}{du^i}, \quad i = \overline{0, q-1}. \quad (12)$$

Формула (12) может использоваться для получения приближенного оптимального решения, например, градиентным методом.

Если в задаче (1)–(4) присутствуют ограничения на вектор управления $u^i \in U_i, \overline{0, q-1}$, например:

$$U_i = \left\{ v \in \mathbb{R}^r : g_l^i(v) \leq 0, \quad l = \overline{1, k}, \quad h_l^i(v) = 0, \quad l = \overline{k+1, s} \right\}, \quad (13)$$

то можно использовать метод Лагранжа с новой функцией Лагранжа. В этом случае новая функция Лагранжа \tilde{L} для задачи (1)–(4) определяется выражением:

$$\tilde{L} = L + \sum_{i=0}^{q-1} \left[\sum_{l=0}^k \mu_l^i g_l^i(v) + \sum_{l=k+1}^s \nu_l^i h_l^i(v) \right].$$

Для решения задачи (1)–(4) в этом случае можно использовать метод штрафных функций [2].

Рассмотрим модель нейронной сети, в которой присутствует запаздывание по вектору состояния, а управляющими функциями являются весовые коэффициенты нейронной сети [4].

Пусть переход из k -ого состояния в $k+1$ осуществляется по следующему правилу:

$$x^{k+1} = h(x^k, x^{k-v}) + (W_0 + W_k)g(x^{k-v}). \quad (14)$$

Весовые коэффициенты ω_{ij}^k выбираются из условия минимума функции:

$$I(\omega) = \Phi(x^q) + \sum_{k=0}^{q-1} E_k(x^k, x^{k-v}) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{q-1} \sum_{j=1}^n r_{ij}^k (\omega_{ij}^k)^2. \quad (16)$$

В выражении (16) коэффициенты $r_{ij}^k > 0$ при каждом $k = \overline{0, q-1}$ образуют положительно определенную матрицу, которую обозначим через R_0 , ω_{ij}^0 , ω_{ij}^q — набор $n \times n$ матриц, $E_k(x^k, x^{k-v})$ — заданные скалярные функции, то есть каждая компонента вектора x^{k-v} имеет свое запаздывание.

В модели (14)—(17) оптимальные весовые коэффициенты $\bar{\omega}_{ij}^k$ определяются равенством:

$$\bar{\omega}_{ij}^k = p_i^{k+1} [r_{ij}^k]^{-1} g_j(x^{k-v}), \quad (17)$$

а сопряженные векторы удовлетворяют следующим рекуррентным соотношениям:

$$p_i^k =_0 \left[\frac{\partial E_k(\bar{x}^k, \bar{x}^{k-v})}{\partial x_i^k} - \frac{\partial E_{k+v}(\bar{x}^{k+v}, \bar{x}^k)}{\partial x_i^k} \right] + p_i^{k+1} \frac{\partial h_i(x^k, x^{k-v})}{\partial x_i^k} + p_i^{k+1+v} \left[\frac{\partial h_{i+v}(x^{k+v}, x^k)}{\partial x_i^k} + \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^{k+1} \frac{\partial g_j(x^k)}{\partial x_i^k} \right]; \quad (18)$$

с граничными условиями:

$$p_i^q = \lambda_0 \frac{\partial \Phi(\bar{x}^q)}{\partial x_i^q}, \quad i = \overline{1, n}; \quad p_i^s = 0, s > q; \quad i = \overline{1, n}.$$

Практическая реализация предложенной методики территориального ИНС-анализа геоситуации выполнена с помощью разработанного авторами программного продукта «ЭкоВМ» [13], который реализован на языке Python 3 [14] и представляет собой консольное приложение, обрабатывающее shape-файлы и анализирующее навигационно-гидрографические, гидрометеорологические, ситуационные и экологические параметры окружающей обстановки. Программа использует технологии нейронных сетей (аппарат многослойного перцептрона) для решения задачи анализа и оценки (классификации) районов (участков) акватории на предмет безопасной навигации и пригодности к прохождению судов.

Для ускорения работы программы используется технология потоков и фреймов, позволяющая распараллелить процессы обучения нейронной сети с использованием графического процессора. В контексте работы под фреймом понимаются данные внутри потока данных об обстановке. То есть однотипные данные о геосреде распределяются по фреймам для их параллельной обработки.

Процедурно это реализовано через использование библиотеки CUDA для фреймов и библиотеки tensorflow для нейронной сети.

Алгоритмически программа реализована следующим образом. На автоматизированном рабочем месте с предустановленной системой Python 3-й версии для запуска программы открывается командная строка и вводится следующая команда:

python inference.py — «опция режима работы» — «путь к исходному картоиду в формате .shp» — «путь для сохранения результата».

Пример командной строки приведен на рис. 6.

На входе программы подается оцифрованная карта обстановки в формате shape-файла либо json-файла, то есть карты, разбитой на зоны (участки, подрайоны) с приписанными им параметрами-характеристиками.

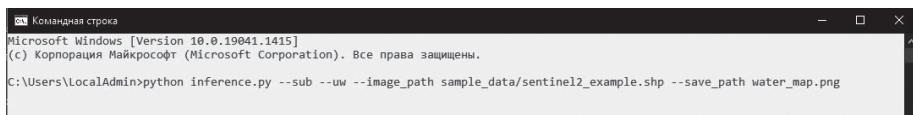


Рис 6. Пример команды, запускающей приложение «ЭкоВМ».

Fig 6. Example of a command launching an application.

Значение точности оценки устанавливается, исходя из пространственной точности данных наблюдений, размеров обследуемого района и целеполагания по точности настройки сети. Чем меньше значение ошибки, тем больше и дольше надо учить нейронную сеть. Например, мы можем положить значение ошибки в 1 км, если размеры района находятся в пределах 100—300 км. А если территориальный охват составляет 5—10 км, то надо брать погрешность в 5—100 м, иначе работа нейросети смысла не имеет.

Далее нейронная сеть, обученная на 10 000 тестовых наборах, проводит классификацию (оценку) каждой зоны в зависимости от введенных опций и соответственно учитываемых условий геосреды.

Введены следующие пороговые цветовые обозначения:

- красный — критичная обстановка;
- желтый — средний уровень экологической обстановки;
- зеленый — угрозы экологии отсутствуют.

Программа забирает файл из папки-источника, осуществляет преобразование и кладет в папку в виде окрашенного share-файла (либо картинки в формате .png, если добавлена соответствующая опция). Пример файла, преобразованного приведенной выше командой, указан на рис. 7.

Также авторами разработан программный продукт «СМПО-22.3» [15], который дополнительно к программе «ЭкоВМ» позволяет с помощью нейронных сетей анализировать и распознавать ледовую обстановку по получаемой от беспилотников мультисенсорной информации, учитывать влияние на геоэкологическую ситуацию в Арктике объектов с ядерной энергетической установкой (атомные ледоколы, атомный лихтеровоз-контейнеровоз, плавучие АЭС и др.), дноуглубительных снарядов, караванов судов, морских буровых платформ.

Выполнено тестирование пространственных матриц (наборов), описывающих экологическую обстановку в районе Обской губы, включающую такие параметры как ледовая обстановка, скорость и направление ветра, сила течения, вынос грунта, наличие нерестилищ рыб и мест обитания редких животных, наличие загрязненных участков территорий (могильников), наличие выбросов опасных веществ. Для данной области выделены территории, находящиеся в зоне риска (рис. 7). Зеленым обозначены территории с благополучной экологической обстановкой, чем цвет интенсивнее — тем обстановка вызывает меньше опасений. Желтые цвета характеризуют менее благополучные участки (как правило, имеются технологические выбросы). Белые участки имеют недостаточно информации для анализа нейронной сетью. Черные линии ограничивают участки со схожим экологическим положением.

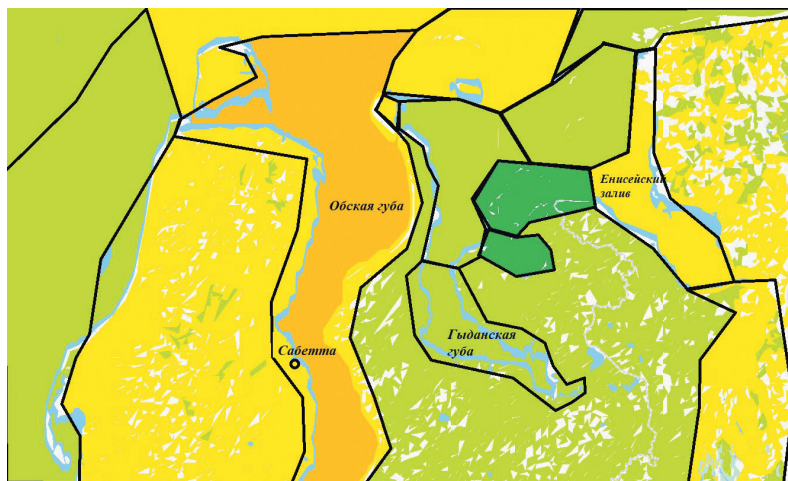


Рис 7. Картоид, характеризующий геоэкологическую ситуацию в районе Обской губы.

Fig 7. A cartoid characterizing the geoeological situation in the area of the Gulf of Ob.

Выводы

1. Территориальная ситуация в регионе описывается: данными положением геообъектов в пространстве; характеристикой их содержания и собственного пространства; динамикой содержания и формы геообъектов; отношениями между объектами.

2. Оценка геоситуации в регионе связана с выявлением (выделением) определенных объектов и определенных отношений между объектами.

3. Эта «определенность» детерминирована задачей, для решения которой производится оценка обстановки. Это может быть навигационная безопасность, экологическая защищенность, биоразнообразие и др.

4. Наибольшую сложность представляет отображение и оценка обстановки с быстроизменяющимися (динамическими) факторами геосреды (гидрометеорологические и гидрологические условия (лед, ветер, течения, осадки, температура, давление, видимость и т.д.), геофизические характеристики, навигационные параметры, экологические показатели и т.п.).

5. Наиболее адекватной формой отображения оценки территориальной обстановки является их пространственно-картографическая интерпретация в виде результирующих (интегральных, обобщенных) качественных оценок-покрытий.

6. Построение указанных территориальных локаций с помощью нейронной сетевой модели (1) показало принципиальную возможность и порядок использования аппарата ИНС для многопараметрической оценки экологической ситуации в регионе, а также методические ограничения модели, связанные с необходимым большим количеством наборов для обучения нейронной сети.

7. Тонность и достоверность оценки территориальной ситуации напрямую связана с точностью, актуальностью, достоверностью, обоснованностью, репре-

зентативностью, надежностью данных ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли), натуральных наблюдений и полевых исследований

8. В ходе тестирования установлено, что значение показателя ошибки применяемой нейронной сети не превышает изначально заданного значения пространственной точности. Это подтверждает допустимость применения данной ИНС при анализе территориальной экологической ситуации в регионе.

9. Достоверность итоговых качественных покрытий-оценок подтвердилась совпадением с оценками специалистов и экспертов, занимающихся вопросами экологии и безопасной навигации в акваториях арктических морей.

Список источников

1. Bagnall A., Lines J., Bostrom A., Large J., Keogh E. The great time series classification bake off: a review and experimental evaluation of recent algorithmic advances. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2017. V. 31, issue 3. P. 606—660. doi: 10.1007/s10618-016-0483-9.
2. Aggarwal C.C. *Neural Networks and Deep Learning. A Textbook*. Springer International Publishing AG, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-94463-0 ISBN 978-3-319-94462-3.
3. Арктическое пространство России в XXI веке: факторы развития, организация управления. СПб.: Издательский дом «Наука», 2019. 1040 с.
4. Биденко С. И., Бородин Е. Л., Храмов И. С. Оценка обстановки в ближней морской зоне с использованием искусственных нейронных сетей // *Эксплуатация морского транспорта*. 2018. № 4. С. 82—90.
5. Биденко С. И., Храмов И. С., Якушев Д. И., Бородин Е. Л., Черный С. Г., Васильев А. Б. Повышение точности геолокации объектов арктической навигационной активности методом прогнозной аналитики результатов многократных РЛ-наблюдений // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 63. С. 297—310. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-297-310.
6. Бородин Е. Л., Биденко С. И., Травин С. В., Хекерт Е. В., Храмов И. С. Геоинформационная поддержка управления морской транспортной активностью: методический аспект // *Эксплуатация морского транспорта*. 2018. № 2. С. 80—85.
7. Панамарев Г. Е., Биденко С. И. Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами. Новороссийск: Изд-во ГМУ, 2012. 202 с.
8. Красногорская Н. Н., Белозерова Е. А. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 65. С. 702—725.
9. Минашкина А. В., Кондратенко С. В., Воробьева Е. А. Разработка программы мониторинга водных объектов вблизи рекультивированного полигона ТКО в пос. им. А. Космодемьянского Калининградской области // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 62. С. 96—112.
10. Редько В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: Ленанд, 2019. 224 с.
11. Шумский С. А. Машинный интеллект. Очерки по теории машинного обучения и искусственного интеллекта. М.: РИОР, 2019. doi: 10.29039/02011-1.
12. Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение. Машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow. 2-е изд. Вильямс, 2019.
13. Храмов И. С., Мучкаева И. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664091. Российская Федерация. ЭкоВМ: № 2022664091: заявлено 05.07.2022: опубликовано 22.07.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.
14. Рашид Т. Создаем нейронную сеть. Математические идеи, лежащие в основе нейронных сетей, и поэтапное создание собственной нейронной сети на языке Python. Вильямс, 2018.
15. Храмов И. С., Биденко С. И., Бенгерг А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664000. Российская Федерация. СМПО-22.3, № 2022664000: заявлено 01.07.2022: опубликовано 21.07.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

References

1. Bagnall A., Lines J., Bostrom A., Large J., Keogh E. The great time series classification bake off: a review and experimental evaluation of recent algorithmic advances. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2017;31(3):606—660. doi: 10.1007/s10618-016-0483-9.
2. Aggarwal C. C. *Neural Networks and Deep Learning. A Textbook*. Springer International Publishing AG, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-94463-0.
3. *Arkticheskoe prostranstvo Rossii v XXI veke: factory razvitiya, organizacii I upravleniya = The Arctic space of Russia in the XXI century: factors of development, organization of management*. St. Petersburg: Nauka Publishing House, 2019: 1040 p. (In Russ.).
4. Bidenko S. I., Borodin E. L., Khramov I. S. Evaluation of the situation in the near sea zone using artificial neural networks. *Ekspluatatsia morskogo transporta = Operation of marine transport*. 2018;(4):82—90. (In Russ.).
5. Bidenko S. I., Khramov I. S., Iakushev D. I., Borodin E. L., Chernyi S. G., Vasil'ev A. B. Povishenie tochnosti gtolokatcii obyektov arkticheskoy navigacii metodom prognoznoy analitiki rezultatov mnogokratnykh RL-nablydeniy. Improving the accuracy of geolocation of objects of Arctic navigation activity by predictive analytics of the results of multiple radar observations. *Gydrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(63):97—310. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-297-310. (In Russ.).
6. Borodin E. L., Bidenko S. I., Travin S. V., Khekert E. V., Khramov I. S. Geoformatcionnaya podderzka upravleniya morskogo transportnoy aktivnjtyi: metodologicheskij aspect. Geoinformation support of marine transport activity management: methodological aspect. *Ekspluatatsia morskogo transporta = Operation of marine transport*. 2018;(2):80—85. (In Russ.).
7. Panamarev G. E., Bidenko S. I. *Geoformatcionnaya podderzka upravleniya sloznimy territorialnimy obektamy i sistemamy = Geoinformation support for the management of complex territorial objects and systems*. Novorossiysk: Publishing House of the State Maritime University, 2012: 202 p. (In Russ.).
8. Krasnogorskaya N. N., Belozerova E. A. Development of a geoinformation decision support system for water resources management. *Gydrometeorologiya i ekologiya (Uchenye zapiski RGGMU) = Hydrometeorology and Ecology (Scientific notes of RSHU)*. 2021;(65):702—725. (In Russ.).
9. Minashkina A.V., Kondratenko S.V., Vorobyeva E.A. Development of a monitoring program for water bodies near the recultivated landfill of SMW in the village named after A. Kosmodemyansky of the Kaliningrad region. *Gydrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(62):96—112.
10. Redko V. G. *Evjlyuciya, neyronnye sety, intelekt: modely i koncepcii evolyucionnoy kibernetiki = Evolution, neural networks, intelligence: Models and concepts of evolutionary cybernetics*. Moscow: Lenand, 2019: 224 p. (In Russ.).
11. Shumsky S. A. *Mashinnyy intellekt. Ocherki po teorii mashinnogo obucheniya i iskusstvennogo intellekta = Machine intelligence. Essays on the theory of machine learning and artificial intelligence*. Moscow: RIOR, 2019: doi: 10.29039/02011-1. (In Russ.).
12. Rashka S., Mirjalili V. *Python i mashinnoe obuchenie. Mashinnoe i glubokoe obuchenie s ispolzovaniem Python, scikit-learn i TensorFlow = Python and machine learning. Machine and deep learning using Python, scikit-learn and TensorFlow*. 2nd ed. Williams, 2019. (In Russ.).
13. Khramov I. S., Muchkaeva I. S. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registracii programmy dlya EVM № 2022664091. Rossiyskaya Federaciya. EkoVM. Zaregistrirvano v Reestre program dlya EVM = Certificate of state registration of the computer program No. 2022664091 Russian Federation. EcoVM: No. 2022664091: announced 05.07.2022: published 22.07.2022. Registered in the Register of computer programs*. (In Russ.).
14. Rashid T. *Sozdaem neyronnyuy set. Matematicheskie idei, lezashie v osnove neyronnoy seti na yazike Python = Creating a neural network. Mathematical ideas underlying neural networks, and step-by-step creation of your own neural network in Python*. Williams, 2018. (In Russ.).
15. Khramov I. S., Bidenko S. I., Bengert A. A. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registracii programmy dlya EVM № 2022664091 Rossiyskaya Federaciya. SMPO-22.3. Zaregistrirvano v Reestre program dlya EVM = Certificate of state registration of the computer program No. 2022664000. Russian Federation*.

SMPO-22.3, No. 2022664000: announced 01.07.2022: published 21.07.2022. Registered in the Register of computer programs. (In Russ.).

Информация об авторах

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

Храмов Игорь Сергеевич, канд. техн. наук, главный специалист, ГКУ Тверской области «Центр информационных технологий» отдел аудита и мониторинга защищенности, igorhramov@yahoo.com.

Бенгерт Александр Александрович, генеральный директор, ФГУП «Гидрографическое предприятие», A1ABengert@rosatom.ru.

Мучкаева Ирина Сергеевна, старший инспектор, ФКГУ «9-й Отряд Федеральной противопожарной службы по Санкт-Петербургу», irishk94@mail.ru.

Information about authors

Sergey I. Bidenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor, General Designer Advisor, PAO "Inteltech".

Igor S. Khramov, PhD (Tech. Sci.), Chief Specialist, State Institution of the Tver Region "Center of Information Technologies" Department of Audit and Security Monitoring.

Alexander A. Bengert, General Director, Federal State Unitary Enterprise "Hydrographic Enterprise".

Irina S. Muchkaeva, Senior Inspector, Federal State Institution "9th Detachment of the Federal Fire Service for St. Petersburg".

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.05.2022.

Принята к публикации после доработки 26.08.2022.

The article was received on 04.05.2022.

The article was accepted after revision on 26.08.2022.

doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-525-526

Памяти В. Н. Воробьева

7 апреля 2022 г. на 87 году жизни скончался бывший проректор РГГМУ по научной работе Воробьев Владимир Николаевич. В. Н. Воробьев родился 13 октября 1935 г. После окончания средней школы в 1953 г. он поступил в Ленинградское высшее инженерное морское училище (ЛВИМУ) им. адм. С. О. Макарова, которое окончил в 1958 г. по специальности инженер-океанолог. Вся его последующая профессиональная деятельность связана с гидрометеорологией и изучением окружающей природной среды. После окончания училища был направлен в Дальневосточную промысловую геологическую разведку, где проработал до 1960 г. В течение 1960—1963 гг. работал заведующим лабораторией гидрологии ЛВИМУ, затем учился в очной аспирантуре под руководством известного ученого проф. И. В. Максимова. После ее окончания в 1966 г. он был направлен в ААНИИ, где проработал с 1966 г. по 1975 г., затем в 1975—1980 гг. — руководителем отдела в Амдерминском УГМС, начальником которого был А. Н. Чилингаров. В 1967 г. Воробьев В. Н. защитил кандидатскую диссертацию, и ему была присуждена ученая степень кандидата географических наук.

С 1980 г. В. Н. Воробьев продолжил свою трудовую деятельность в Российском государственном гидрометеорологическом университете (тогда — ЛГМИ) в должности старшего научного сотрудника, затем руководителя научно-исследовательского сектора, а с 1991 г. — проректора по научной работе, на которой он проработал 25 лет, до 2015 г. В этот период В. Н. Воробьев проявил себя как ученый и как организатор научно-исследовательской работы, а также как организатор подготовки высококвалифицированных кадров в области гидрометеорологии.

На посту проректора по научной работе В. Н. Воробьев осуществил перестройку научной работы университета, придав большой вес фундаментальным исследованиям и развитию инновационной деятельности, что позволило университету по всем показателям этого направления войти в число ведущих вузов России. В 2015 г. он уходит с должности проректора и становится советником ректора.

Успешная деятельность В. Н. Воробьева неоднократно отмечалась руководством Министерства образования и науки, Росгидромета и Санкт-Петербурга. За свою трудовую деятельность В. Н. Воробьев был награжден нагрудными знаками «Почетный работник гидрометслужбы России», «Почетный полярник ММФ», «Почетный работник РГГМУ», «За заслуги» Министерства обороны РФ, медалями «За пользу и верность» Министерства Обороны. РФ, «300 лет Российскому флоту», юбилейной медалью «В память 300-летия Санкт-Петербурга». В 2007 г. получил почетное звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации». Много внимания он уделял общественной деятельности: на протяжении 10 лет являлся Президентом Ассоциации проректоров по научной работе при Совете ректоров вузов Санкт-Петербурга.

В. Н. Воробьев является автором более 140 научных работ, опубликованных в российских и зарубежных научных изданиях, а также соавтором 9 монографий и учебников. Им внесен большой вклад в исследование изменений климата Земли, динамику океана, практическое освоение и изучение Арктики и Антарктики, разработаны научно-методические основы мониторинга, контроля и управления экологическим состоянием среды. Результаты последних исследований легли в основу создания системы экологического мониторинга окружающей среды Санкт-Петербурга и Северо-Запада России.

На протяжении всей жизни Владимира Николаевича отличали большие организаторские способности, трудолюбие, целеустремленность, стремление всегда приносить пользу коллективу.

Светлая память Владимиру Николаевичу Воробьеву!

doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-527-528

Памяти М. Г. Лазара



28 августа 2022 г. на 79-м году жизни скоропостижно скончался доктор философских наук, профессор кафедры социально-гуманитарных наук РГГМУ Михайл Гаврилович Лазар. В 1962 г. студент Ясского университета (Румыния) Михайл Гаврилович был направлен на учебу в СССР. В 1967 г. он закончил философский факультет Ленинградского государственного университета, год работал на родине учителем истории в школе, а затем после женитьбы на советской гражданке вернулся на постоянное жительство в СССР. С 1969 по 1971 г. работал преподавателем в Гродненском педагогическом институте (Белорусская ССР). В 1971 г. стал гражданином СССР и был принят на работу в Ленинградский сектор Института философии Академии Наук СССР в должности младшего научного сотрудника.

В 1976 г. после перевода в Институт социально-экономических проблем (ИСЭП) АН СССР М. Г. Лазар как соискатель защитил кандидатскую диссертацию. Докторская диссертация на тему «*Философско-социологические аспекты взаимоотношений науки и морали*» была защищена им в 1988 г. на философском факультете ЛГУ. С 1980 г. работал в РГГМУ (тогда — ЛГМИ), вначале в должности доцента, а после защиты докторской диссертации — профессором.

Признанный в России науковед М. Г. Лазар в 1985 г. опубликовал первую в СССР монографию «*Этика науки*», став одним из основателей этого нового направления науковедения в СССР. Он является соавтором первого в стране профессионального кодекса социологов, принятого в 1989 г. С 1994 г. он член Ученого

Совета по присуждению докторской степени факультета философии человека СПбГПУ им. Герцена, член Российского общества социологов, член редколлегии журнала «Социология науки и технологий».

Михай Гаврилович до 2013 г. являлся экспертом российских научных фондов РФФИ, РГНФ, Комитета по науке и образованию Правительства Санкт-Петербурга. С момента основания в 2006 г. журнала «Ученые записки РГГМУ» стал его постоянным автором и опубликовал в журнале более 20 научных статей. Неоднократно был отмечен благодарностями руководства РГГМУ, награжден знаком «Почетный работник РГГМУ», знаком «Почетный работник высшего образования РФ».

Профессор М. Г. Лазар — автор более 200 опубликованных учебно-методических и научных работ в области истории румынской эстетики и социологии, этики и социологии науки, социологии образования, науковедения, политологии, в том числе двух учебников, четырех монографий, множества разделов монографий, статей в российских и зарубежных журналах и сборниках.

Профессор М. Г. Лазар читал студентам курсы дисциплин «Социология», «Политология», «Социология науки», «Философские проблемы науки», а также курс для аспирантов по дисциплине «История и философия науки», являлся главой диссертационного совета по защите кандидатских работ.

Михай Гаврилович Лазар был глубоко интеллигентным и благородным человеком, прекрасным педагогом, настоящим ученым, добрым и надежным коллегой. На протяжении всей преподавательской деятельности Михай Гаврилович пользовался заслуженным авторитетом и уважением студентов за интересные лекции и семинарские занятия, за человечность, отзывчивость и справедливость. Огромная благодарность Михаю Гавриловичу за все, чему он нас научил, и за то, что все эти годы он был с нами.

Коллеги, друзья, ученики

Р. С. Михай Гаврилович Лазар похоронен на родине, в Румынии, в центре старинного города Пятра Нямец.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 68

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Подписано в печать 30.09.2022. Выход в свет 06.10.2022. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,5625. Тираж 50 экз. Заказ №1294. Цена свободная.
Адрес издателя, редакции и типографии: РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
