

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 66

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 образования РГГМУ; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, СПбПУ; **Хуакин Л.**, PhD, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Джайянг (КНР).

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

Свидетельство ПИ № ФС77-79574 от 27.11.2020 г.

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

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

ISSN 2713-3001

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

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

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 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

№ 66

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. 66. St. Petersburg : RSHU Publishers, 2022. 114 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; **Timofeeva A.G.**, PhD in Geography, Director of the Institute of permanent education RSHU.

Editors:

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

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

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

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

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

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

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

Certificate III № 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.

ISSN 2713-3001

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

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

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

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

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2022
© Authors of publications, 2022

Содержание

Метеорология

- В.С. Балакин, Ю.В. Шипко.* Оценка внутренней структуры переднеазиатской депрессии. 7
- Е.М. Лившиц, В.И. Петров.* Разделение конвективных штормов. Часть II. Организация мезомасштабной структуры грозоградового процесса 20

Гидрология

- Ф.А. Иманов, И.С. Алиева, А.А. Нуриев, З.А. Нагиев.* Определение экологического стока реки Алиджанчай (Азербайджан) 42

Океанология

- В.Н. Малинин, П.А. Вайновский.* О межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов источников и стока CO₂ в океане на основе данных наблюдений 51

Геоэкология

- А.И. Банчева.* К оценке потенциального риска загрязнения атмосферы на о. Хоккайдо (Япония) 71

Геоинформатика

- В.А. Миклуш, Т.М. Татарникова.* Дистанционный мониторинг нефтяных разливов в акватории порта средствами радиолокационных систем 81

Социально-гуманитарные науки

- А.И. Угрюмов, Е.В. Соколихина, Н.Н. Соколихина.* Наполеон и «генерал Мороз» в войне 1812 года (К 210-й годовщине Отечественной войны 1812 года). 93

Хроника

- А.Н. Чилингаров, В.Л. Михеев, Ю.Ф. Сычев.* К инициативе проведения Пятого международного полярного года 104
- Памяти Л.И. Дивинского 110
- Памяти А.И. Погорельцева 112

Contents

Meteorology

- V.S. Balakin, Yu.V. Shipko.* Internal structure estimation of the South Asia Low 7
E.M. Livshits, V.I. Petrov. The splitting of convective storms. Part II.
Organizations of the mesoscale structure of the Thunderstorm process. 20

Hydrology

- F.A. Imanov, I.S. Aliyeva, A.A. Nuriyev, Z.A. Nagiyev.* Determination
of the ecological flow of the Alijanchay river (Azerbaijan) 42

Oceanology

- V.N. Malinin, P.A. Vainovsky.* On the interannual variability of the most intense
sources and sinks of CO₂ in the ocean based on observational data. 51

Geocology

- A.I. Bancheva.* On the potential risk of air pollution of Hokkaido island, Japan 71

Geoinformatics

- V.A. Miklush, T.M. Tatarnikova.* Remote monitoring of oil spills in the port area
by means of radar systems 81

Social science and humanities

- A.I. Ugruimov, E.V. Sokolikhina, N.N. Sokolikhina.* Napoleon and «general Frost»
in 1812 war (To 210-year anniversary of the Fatherland War 1812-year) 93

- Chronicle** 104

УДК 551.513

doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-7-19

Оценка внутренней структуры переднеазиатской депрессии

В.С. Балакин, Ю.В. Шипко

Центральный научно-исследовательский институт ВВС Минобороны России, Москва,
balakin69vs@gmail.com

Рассматривается сезонный центр действия атмосферы — переднеазиатская депрессия, преобладающий тип атмосферной циркуляции нижней тропосферы в летний период над территорией Ближнего и Среднего Востока. С целью выявления особенностей внутренней структуры депрессии построена программно-реализованная модель объектов циркуляции для изобарических уровней 925, 850 гПа. Выполнен переход из многомерного пространства параметров обобщенной модели к ортогональным факторам. Выявлены кластеры (типы) барических образований, представлена визуализация кластеров на факторной плоскости. Полученные модельные характеристики атмосферной циркуляции могут быть использованы в качестве предикторов для диагноза и прогноза метеорологической информации.

Ключевые слова: переднеазиатская депрессия, геопотенциальная высота, реанализ, изобарический уровень, фактор, кластер.

Internal structure estimation of the South Asia Low

V.S. Balakin, Yu.V. Shipko

Central Scientific Research Institute of Air Force (RF Ministry of Defense), Moscow,
balakin69vs@gmail.com

The paper examines the seasonal atmospheric center of action — the South Asia Low (or thermal depression), the predominant type of atmospheric circulation of the lower troposphere during warm period (April–October) over the Near and Middle East. The characteristics of the depression determine the weather and climatic conditions of the region, which can limit or exclude the implementation of meteorological solution for various consumers of information. In this way, the relevance of South Asia Low model development is beyond doubt. The purpose of the work was to identify the features of internal structure of the South Asia Low. The methods of factorial, cluster, discriminant analysis are used. The study information base was made up of geopotential height fields grid data of the reanalysis of the National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy Atmospheric Model Intercomparison Project II (for June, July and August of 2005—2019). The software-implemented generalized model of the South Asia Low at isobaric levels of 925, 850 hPa, including 26 predictors, was constructed. Statistical analysis of multidimensional data of reanalysis of atmospheric parameters was carried out, followed by transition to the factor model after compressing the information (with 5 common factors explaining ~80 % of total predictor variance). Clustering of the South Asia Low cyclonic objects was carried out. Three clusters (types) of circulation objects in the lower troposphere varying in power, shape and intensity were identified, which allows to refine meteorological information. The visualization of clusters on the factor plane and statistical characteristics of common factors for identifying the South Asia Low types are presented. Model characteristics of circulation objects in the lower troposphere can be used as predictors for diagnosis and forecast of required meteorological information for effective functioning of various organizational and technical

systems. The new information presented in the paper expands the understanding of the internal structure of summer cyclonic circulation over the Near and Middle East territory.

Keywords: South Asia Low, geopotential height, reanalysis, isobaric level, factor, cluster.

For citation: *V.S. Balakin, Yu.V. Shipko.* Internal structure estimation of the South Asia Low. *Gidro-meteorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2022, 66: 7—19. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-7-19

Введение

Центры действия атмосферы остаются предметом изучения метеорологов, поскольку их характеристики (мощность, конфигурация, географическое местоположение центра циркуляции и др.) существенно влияют на формирование метеорологических условий в различных районах земного шара, используются в качестве показателей общего состояния циркуляции атмосферы в климатическом аспекте и в схемах прогнозирования.

Рассматривается сезонный центр действия атмосферы над территорией Ближнего и Среднего Востока в теплый периода года (апрель—октябрь) — южно-азиатский летний циклон [1] или переднеазиатская депрессия (ПАД) [2—4], которую иначе называют термической депрессией, поскольку формируется в результате сильного нагревания подстилающей поверхности. Для ПАД характерна большая устойчивость (повторяемость в июле, августе 94—96 %). Объекты ПАД относятся к низким барическим образованиям, прослеживаются в нижней тропосфере до высоты 3—4 км [3].

ПАД оказывает главное влияние на метеорологические условия региона в летний период, в течение которого наблюдается ясная, жаркая и сухая погода. Температура воздуха днем поднимается до 30—40 °С, местами выше 50 °С. В условиях ПАД часто отмечаются пыльные бури. Термические вихри создают запыленность воздуха, иногда вихри достигают силы урагана и поднимают пыль на высоту, перемещают ее на значительные расстояния, что приводит к резкому ухудшению видимости на большой территории в течение нескольких суток. Кроме того, с ПАД связано преобладание северных ветров в восточной части Средиземного моря, иногда достигающих значительной силы. Такие метеорологические условия ограничивают функционирование различных метеозависимых организационно-технических систем.

Таким образом, с целью повышения информативности атмосферной циркуляции в нижней тропосфере над территорией Ближнего и Среднего Востока в летний период решается задача оценки внутренней структуры ПАД. Представленный материал является продолжением исследования ПАД [5, 6].

Исходный материал

Информационную базу исследования составили данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II [7] за июнь, июль, август периода 2005—2019 гг. Использовались сеточные данные (в узлах регулярной сетки с шагом 2,5°

по широте и долготе) геопотенциальной высоты на изобарических уровнях 1000, 925, 850 гПа. Предварительно по срочным данным (00, 06, 12, 18 ч) полей H_{1000} , H_{925} , H_{850} выполнен расчет среднесуточных значений в узлах сетки.

Модель циклонической циркуляции на изобарическом уровне

При построении базовой модели ПАД использован подход [8, 9], определяющий объект циклонической циркуляции как объем «чаши», образованной топографией некоторой изобарической поверхности с краевой изогипсой H_0 и горизонтальной плоскостью, проходящей через эту изогипсу. При этом веса элементов объема «чаши» определяются по формуле [8, 9]:

$$P_{ij} = \frac{(H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}{\sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}, \quad (1)$$

где H_{ij} — высота изобарической поверхности в узле (x_i, y_j) ; φ_i — широта точки (x_i, y_j) ; учитываются только узлы, для которых $H_{ij} < H_0$.

Используемая декартова система координат XOY представляется в плоскости экватора, где центр совмещен с центром Земли, ось X направлена к нулевому меридиану, ось Y — на восток. В этой системе центр циркуляции определяется как центр масс системы точек по формулам механики [9]:

$$x_c = \frac{r \sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos^2 \varphi_i \cos \lambda_j}{\sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}, \quad y_c = \frac{r \sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos^2 \varphi_i \sin \lambda_j}{\sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i}, \quad (2)$$

где r — радиус Земли; φ_i, λ_j — соответственно широта и долгота точки (x_i, y_j) .

Координаты центра (2) связаны с географическими координатами посредством известных формул:

$$x_c = r \cos \varphi_c \cos \lambda_c, \quad y_c = r \cos \varphi_c \sin \lambda_c.$$

Характеристиками модели являются: площадь S , ограниченная изогипсой H_0 , условная «масса» M рассматриваемого объема «чаши» и плотность Z [9]:

$$S = r^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \sum_i \sum_j \cos \varphi_i, \quad M = r^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i, \\ M = r^2 \Delta \varphi \Delta \lambda \sum_i \sum_j (H_0 - H_{ij}) \cos \varphi_i, \quad Z = \frac{M}{S}, \quad (3)$$

где $\Delta \varphi, \Delta \lambda$ — шаги по меридиану и параллели, выделяющие элементарную площадку (при данных реанализа NCEP — $2,5^\circ$ по широте и долготе).

Геометрической характеристикой концентрации двумерного распределения около центра масс является эллипс рассеяния с полуосями σ_x, σ_y или главными средними квадратическими отклонениями σ_u, σ_v эквивалентного единичного эллипса рассеяния [9]:

$$\sigma_{u/v}^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 \pm \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\rho^2 \sigma_x^2 \sigma_y^2} \right]. \quad (4)$$

Характеристикой формы двумерного распределения «масс» является коэффициент сжатия эллипса $k = \sigma_v / \sigma_u$.

Модель дополняется еще одной характеристикой циклонической циркуляции — углом положения оси ложбины β , расчет которого проводится по формулам механики [10]. В них ось ложбины циклонического образования рассматривается как главная центральная ось инерции плоской фигуры (S) полученного распределения условных «масс» точек (1), относительно которой главный центральный момент инерции имеет минимальное значение.

Обобщенная модель ПАД на уровнях 925 и 850 гПа

Учитывая, что объекты ПАД относятся к барическим образованиям нижней тропосферы, в работе рассматриваются поверхности геопотенциальной высоты на изобарических уровнях 925, 850 гПа в области $\varphi = 10 - 40^\circ$, $\lambda = 30 - 90^\circ$.

Краевая изогипса определяется следующим образом: находится минимум H_{\min} поверхностей H_{925} , H_{850} в рассматриваемой области; рассчитывается значение $H_0 = H_{\min} + 4$, которое принимается за крайнюю изогипсу каждой поверхности. Учитывается, что изогипсы принято проводить через 4 дам (рис. 1).

Как характеристика взаимосвязи процессов на различных изобарических уровнях [1] вводится в рассмотрение высотная ось депрессии — линия, соединяющая приземный центр барического образования (уровня 1000 гПа) с центром на уровне 850 гПа. Принимая за центры циклонического образования минимумы H_{\min} поверхностей геопотенциальной высоты H_{1000} и H_{850} в рассматриваемой области, высотная ось отображается прямой линией (рис. 1).

Положение высотной оси ПАД можно характеризовать изменением координат центров циркуляции $H_{1000\min}$ и $H_{850\min}$ (согласно рис. 1):

$$\Delta\varphi_{\text{во}} = \varphi_{850\min} - \varphi_{1000\min}, \quad \Delta\lambda_{\text{во}} = \lambda_{850\min} - \lambda_{1000\min}, \quad (5)$$

где знак «-» отклонения по широте $\Delta\varphi_{\text{во}}$ соответствует отклонению оси к югу, «+» — к северу; знак «-» отклонения по долготе $\Delta\lambda_{\text{во}}$ соответствует западному отклонению оси, «+» — восточному.

Гистограммы распределения отклонений координат высотной оси ПАД представлены на рис. 2.

В климатическом аспекте (июнь—август 2005—2019 гг.) характеристики (5) имеют значения: $\Delta\varphi_{\text{во}} = 1,6^\circ$; $\Delta\lambda_{\text{во}} = 6,8^\circ$. Это соответствует в среднем северо-восточному наклону высотной оси депрессии, что в данном случае означает сторону присутствия более холодных воздушных масс относительно рассматриваемой территории ПАД.

Разработанная программно-реализованная модель ПАД позволила провести статистическую обработку выборки циклонических образований по данным реанализа. Оценки параметров (2)—(5) модели ПАД (июнь—август, 2005—2019 гг.) представлены в табл. 1.

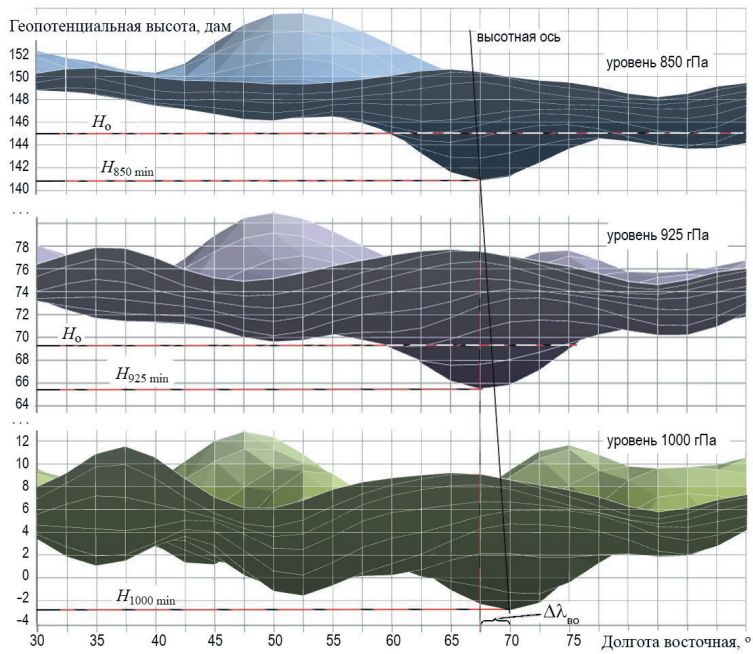


Рис. 1. Схема определения краевой изогипсы и высотной оси по среднесуточным поверхностям геопотенциальной высоты на изобарических уровнях 1000, 925 и 850 гПа.

Fig. 1. Scheme for determining the edge isohypse and the height axis on the average daily surfaces of geopotential height at isobaric levels 1000, 925, 850 hPa.

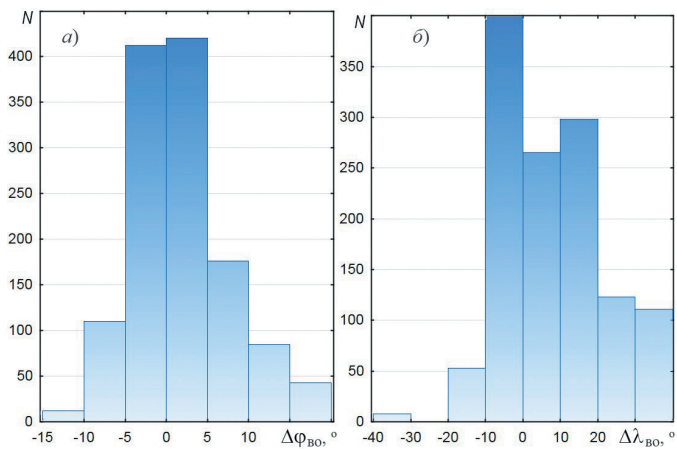


Рис. 2. Гистограмма распределения отклонения координаты высотной оси ПАД:

a) по широте; *б)* по долготе.

Fig. 2. Histogram of deviation distribution coordinate SAL height axis:

a) by latitude; *б)* by longitude.

Статистические оценки параметров модели ПАД
(июнь—август, 2005—2019 гг.)
Statistic estimates of SAL model parameters
(June—August, 2005—2019)

Параметр / объекта ПАД	Среднее значение	Медиана	Максимум	Минимум	Среднее квадрати- ческое отклонение
Изобарический уровень 925 гПа					
H_{\min} , дам	66,45	66,37	72,93	60,58	2,21
$S \cdot 10^{-6}$, км ²	5,417	5,175	14,544	0,359	2,536
$M \cdot 10^{-6}$, км ² дам	8,719	7,863	31,687	0,697	4,866
Z , дам	1,571	1,572	2,341	0,725	0,250
σ_u , км	1011	1025	1731	177	280
σ_v , км	193	188	433	44	74
k	0,195	0,181	0,592	0,076	0,069
x_c , км	2183	2219	3777	223	541
y_c , км	5099	5101	5887	4142	255
λ_c , град. в.д.	66,8	66,5	87,4	48,7	6,1
φ_c , град. с.ш.	28,8	28,8	39,9	22,3	1,8
β , град.	133,7	135,6	150,1	25,4	11,8
Изобарический уровень 850 гПа					
H_{\min} , дам	141,46	141,40	147,43	134,98	2,18
$S \cdot 10^{-6}$, км ²	6,795	6,403	19,847	0,480	3,393
$M \cdot 10^{-6}$, км ² дам	0,011	0,010	0,038	0,001	0,006
Z , дам	1,546	1,540	2,783	0,808	0,258
σ_u , км	1016	1028	1831	204	274
σ_v , км	250	247	529	54	86
k	0,254	0,239	0,913	0,059	0,091
x_c , км	1708	1718	3412	235	532
y_c , км	5255	5269	5907	4223	250
λ_c , град. в.д.	72,0	72,0	87,4	51,1	5,9
φ_c , град. с.ш.	29,2	29,1	41,4	19,1	2,9
β , град.	131,8	135,1	167,2	19,8	15,2
Изобарические уровни 1000, 850 гПа					
$\Delta\lambda_{во}$	6,8	6,8	26,9	-9,8	4,9
$\Delta\varphi_{во}$	1,6	1,5	12,8	-6,6	2,5

Факторная модель переднеазиатской депрессии

С целью сжатия информации использован подход факторного анализа, когда параметры модели ПАД ($i = 1, 2, \dots, m$) представляются в виде линейной комбинации небольшого числа $k < m/2$ скрытых общих факторов в виде [11]:

$$z_j = a_{j1} \cdot f_1 + a_{j2} \cdot f_2 + \dots + a_{jk} \cdot f_k + e_j,$$

где z_j — признаки объекта (центрированные и нормализованные параметры); a_{jk} — коэффициенты — так называемые факторные нагрузки; f_i ($i = 1, 2, \dots, k$) — общие факторы; e_j — специфичный фактор (остаток).

Сделан переход из пространства 26 признаков объектов ПАД к 5-мерному пространству ортогональных факторов. Выделенные общие факторы объясняют 79 % общей дисперсии параметров. С учетом значений факторных нагрузок (превышающих по модулю 0,6) факторам модели дана следующая интерпретация:

- f_1 — фактор мощности (35 % общей дисперсии признаков);
- f_2 — фактор конфигурации (19 % дисперсии);
- f_3 — фактор положения центра циркуляции (11 % дисперсии);
- f_4 — фактор наклона высотной оси по долготе (8 % дисперсии);
- f_5 — фактор интенсивности (6 % дисперсии).

По величине выделенных факторов можно отметить особенность ПАД — изменение в течение летнего сезона. Например, на рис. 3 для сравнения даны гистограммы распределения факторов в начале и конце лета (в июне и августе).

Как следует из рис. 3, в течение лета имеет место рост мощности и интенсивности ПАД, смещение центра циркуляции нижней тропосферы, изменение наклона высотной оси депрессии в западном направлении.

Общие факторы являются некоррелированными величинами, поэтому могут использоваться в качестве предикторов при разработке регрессионных моделей параметров атмосферы (в исследованиях влияния характеристик депрессии на метеорологические величины), что повышает качество статистических и прогнозных характеристик моделей.

Оценка внутренней структуры переднеазиатской депрессии

С целью определения однородных по структуре групп объектов ПАД проведена процедура иерархической кластеризации объектов многомерного пространства, когда не требуется априорной информации о распределении генеральной совокупности объектов. Мерой близости циклонических объектов депрессии выбрано евклидово расстояние D [11].

На рис. 4 представлено дерево кластеризации объектов ПАД, где отчетливо выделяются три ветви «сгустков». Обозначим их как кластеры 1-го, 2-го и 3-го типа циркуляции.

Визуализация полученного разделения общей совокупности циркуляционных объектов ПАД на кластеры представлена на плоскости выделенных общих факторов (рисунки 5 и 6).

Статистические характеристики факторов для выделенных кластеров ПАД отображены в виде диаграммы на рис. 7.

Этапом типологизации циклонических объектов ПАД является построение правила отнесения каждого нового объекта к одному из выявленных кластеров (типов). Когда число классов (типов, совокупностей) известно, используется

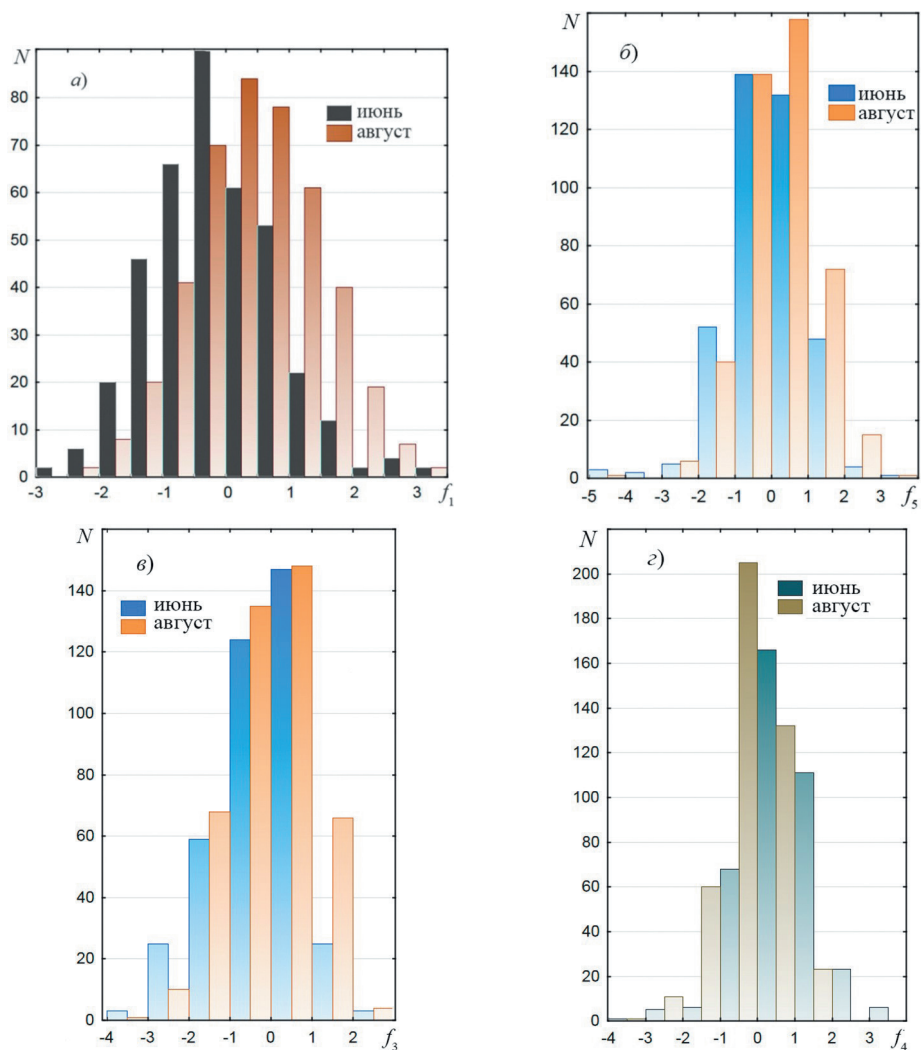


Рис. 3. Гистограммы распределения общих факторов ПАД в июне и августе (2005—2019):

- а) фактор мощности; б) фактор интенсивности; e) фактор положения центра циркуляции;
 з) фактор наклона высотной оси.

Fig. 3. Histograms of distribution of SAL common factors in June and August (2005—2019):

- a) the power factor; б) the intensity factor; e) the position factor of the circulation center;
 з) the tilt factor of height axis.

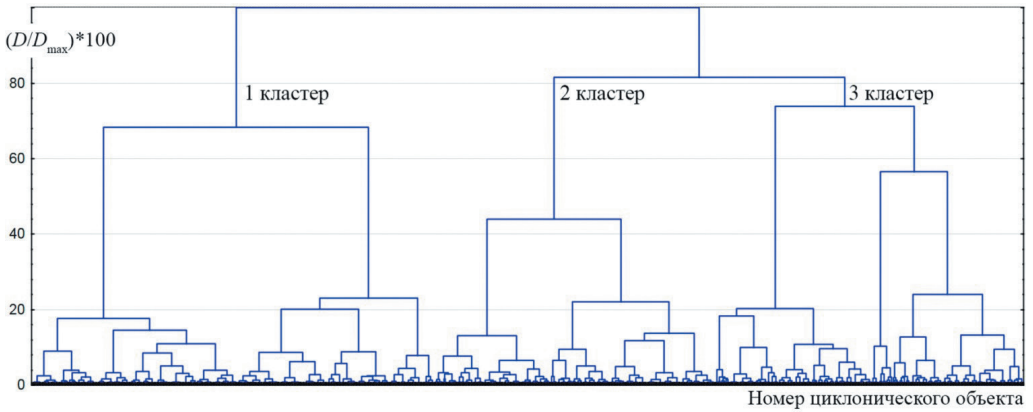


Рис. 4. Дерево кластеризации объектов ПАД (июнь—август, 2005—2019).

Fig. 4. Clustering tree of SAL objects (June—August, 2005—2019).

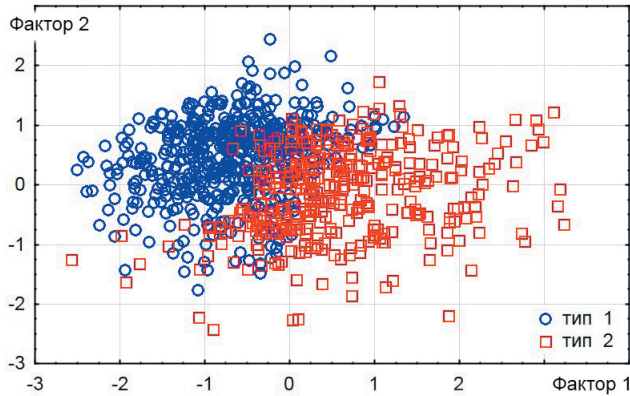


Рис. 5. Распределение объектов ПАД на плоскости факторов f_1, f_2 с учетом кластеризации (не показаны объекты кластера 3 типа).

Fig. 5. Distribution of SAL objects on the factor plane f_1, f_2 considering clustering (cluster objects of type 3 are not shown).

аппарат дискриминантного анализа [11] по построению классификационных функций. На базе выделенных общих факторов депрессии построены классификационные функции:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= -1,59076 - 1,36409f_1 + 0,86403f_2 - 0,30163f_3 - 0,13523f_4 + 0,15353f_5, \\
 C_2 &= -2,50466 + 1,28888f_1 - 0,38780f_2 + 1,20433f_3 + 0,42209f_4 - 1,24158f_5, \\
 C_3 &= -1,89093 + 0,61272f_1 - 0,77832f_2 - 0,70156f_3 - 0,20723f_4 + 0,92940f_5. \quad (6)
 \end{aligned}$$

При отнесении объекта ПАД к тому или иному типу используется следующее решающее правило: при реализации условий ортогональных факторов объект

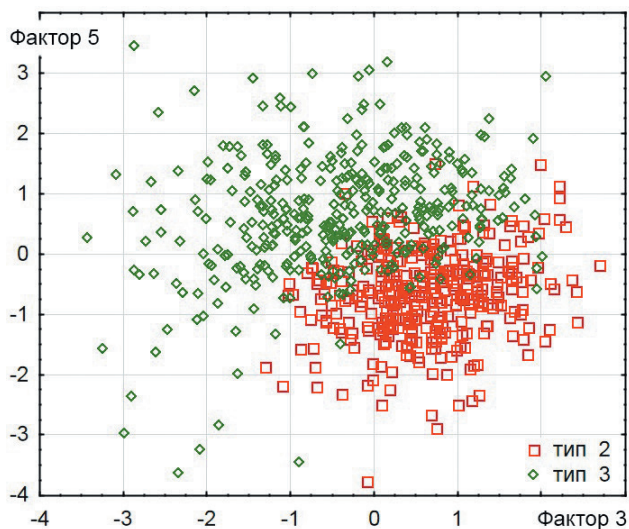


Рис. 6. Распределение объектов ПАД на плоскости факторов f_3, f_5 с учетом кластеризации (не показаны объекты кластера 1 типа).

Fig. 6. Distribution of SAL objects on the factor plane f_3, f_5 considering clustering (cluster objects of type 1 are not shown).

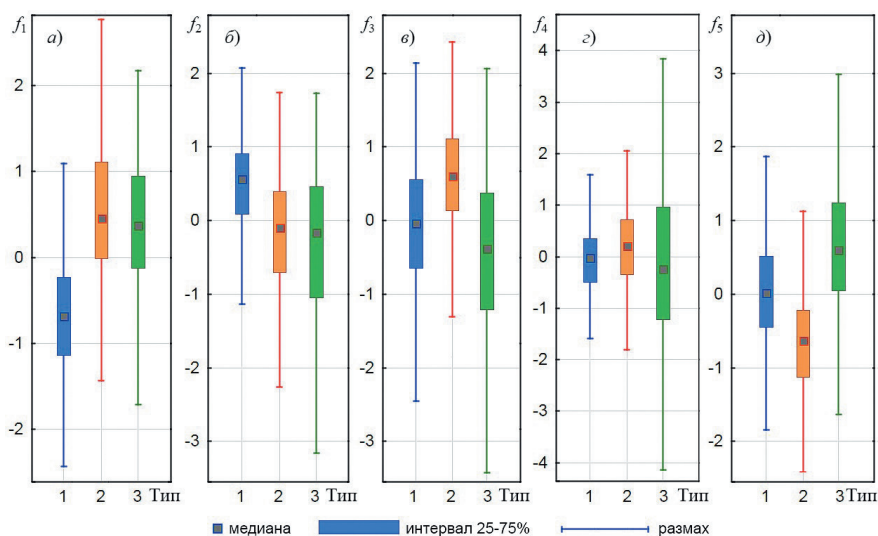


Рис. 7. Статистические характеристики общих факторов для кластеров ПАД:
 а) фактор 1; б) фактор 2; в) фактор 3; г) фактор 4; д) фактор 5.

Fig. 7. Statistical characteristics of common factors for SAL clusters:
 а) factor 1; б) factor 2; в) factor 3; г) factor 4; д) factor 5.

циркуляции относится к типу $j(j = 1, 2, 3)$, для которого классификационная функция (6) принимает максимальное значение.

Заключение

Учитывая, что циркуляция атмосферы — главный фактор, оказывающий влияние на формирование и пространственное распределение всех метеорологических параметров, модельные характеристики структурных объектов ПАД, имеющей место в нижней тропосфере летнего периода на территории Ближнего и Среднего Востока, можно использовать в качестве предикторов для диагноза и прогноза требуемой метеорологической информации.

Построена модель ПАД — преобладающего типа барического поля над территорией Ближнего Востока в летний период, на основе которой выявлены особенности атмосферной циркуляции в нижней тропосфере. Выделены ортогональные факторы, объясняющие ~80 % общей дисперсии признаков.

По методике типологизации внутренней структуры нижней тропосферы в летний период на территории Ближнего и Среднего Востока выявлены три типа ПАД в летнем сезоне, отличающиеся по мощности, форме, интенсивности циркуляционных объектов, что позволяет уточнять метеорологическую информацию по районам макрорегиона.

Полученные результаты могут быть использованы при организации метеорологического обеспечения различных метеозависимых организационно-технических систем. Кроме того, они могут служить основой для дальнейших научных исследований по повышению качества прогностических схем и моделей, в целом, — эффективности метеорологического обеспечения.

Список литературы

1. Зверев А.С. Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 776 с.
2. Авиационно-климатическая характеристика Ближнего Востока. М.: Воениздат, 1969. 112 с.
3. Авиационно-климатическая характеристика Среднего Востока. М.: Воениздат, 1977. 110 с.
4. Анасова Е.Г. О характеристиках местоположения центров действия атмосферы // Труды ВНИИГМИ-МЦД: Статистические методы анализа и прогноза в метеорологии. М.: Гидрометеиздат, 1979. Вып. 58. С. 89—97.
5. Шипко Ю.В., Бучнев Д.В., Облогин М.А., Балабан О.Р. Модель азиатской депрессии летнего периода на изобарическом уровне 1000 гПа // Электронное периодическое издание «Воздушно-космические силы. Теория и практика». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. № 8. С. 209—218.
6. Шипко Ю.В., Балакин В.С., Шувакин Е.В. Факторная модель переднеазиатской депрессии на изобарическом уровне 925 гПа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 1. С. 22—28. doi: 10.17308/geo.2020.1/2657.
7. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html>. Дата обращения: 22.02.2021.
8. Багров Н.А., Орлова И.И. К вопросу определения центра циркуляции атмосферы // Труды ГМЦ: Статистические методы долгосрочного прогноза погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Вып. 211. С. 3—14.
9. Глызь Г.А. О некоторых характеристиках циркумполярного вихря // Труды ВНИИГМИ-МЦД: Статистические методы анализа и прогноза в метеорологии. М.: Гидрометеиздат, 1979. Вып. 58. С. 98—104.

10. Шупко Ю.В., Шувакин Е.В., Шуваев М.А. Модель циркумполярного вихря северного полушария в терминах механики // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XVII Международной научно-методической конференции (Воронеж, 9—10 февраля 2017 г.). Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2017. Т. 4. С. 91—96.
11. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

References

1. Zverev A.S. *Synopticheskaya meteorologiya i osnovy predvychisleniya pogody*. Synoptic meteorology and the basics of weather forecasting. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968: 776 p. [In Russian].
2. *Aviacionno-klimaticheskaya harakteristika Blizhnego Vostoka*. Aviation-climatic characteristics of the Near East. Moscow: Voenizdat, 1969: 112 p. [In Russian].
3. *Aviacionno-klimaticheskaya harakteristika Srednego Vostoka*. Aviation-climatic characteristic of the Middle East. Moscow: Voenizdat, 1977: 110 p. [In Russian].
4. Apasova E.G. About the characteristics of the location of atmospheric action centers. *Trudy VNIIGMI-MCD: Statisticheskie metody analiza i prognoza v meteorologii*. Proceedings of RIHMI-WDC: Statistical methods of analysis and forecast in meteorology. Moscow: Gidrometeoizdat. 1979, 58: 89—97. [In Russian].
5. Shipko Yu.V., Buchnev D.V., Oblogin M.A., Balaban O.R. Model of the Asian depression of the summer period at the isobaric level 1000 hPa. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie «Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika»*. Electronic periodical «Aerospace Forces. Theory and practice». Voronezh: MES Air Force. 2018, 8: 209—218. [In Russian].
6. Shipko Yu.V., Balakin V.S., Shuvakin E.V. Factor model of the South Asia Low at the isobaric level 925 hPa. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. 2020, 1: 22—28. doi: 10.17308/geo.2020.1/2657. [In Russian].
7. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html> (accessed: 22.02.2021).
8. Bagrov N.A., Orlova I.I. On the issue of determining the center of atmospheric circulation. *Trudy GMC: Statisticheskie metody dolgosrochnogo prognoza pogody*. Proceedings of the HMC: Statistical methods of long-term weather forecast. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1978, 211: 3—14. [In Russian].
9. Glyz' G.A. On some characteristics of circumpolar vortex. *Trudy VNIIGMI-MCD: Statisticheskie metody analiza i prognoza v meteorologii*. Proceedings of RIHMI-WDC: Statistical methods of analysis and forecast in meteorology. Moscow: Gidrometeoizdat. 1979, 58: 98—104. [In Russian].
10. Shipko Yu.V., Shuvakin E.V., Shuvaev M.A. Circumpolar vortex model of the northern hemisphere in terms of mechanics. *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii (Voronezh, 9—10 fevralya 2017)*. Informatics: problems, methodology, technologies: Materials of the XVII International Scientific and Methodological Conference (Voronezh, February 9—10, 2017). Voronezh: Nauchno-issledovatel'skie publikacii., 2017, 4: 91—96. [In Russian].
11. Ayvazyan S.A., Buhstaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Klassifikaciya i snizhenie razmernosti*. Applied Statistics: Classification and Reduction of Dimension. Moscow: Finance and statistics, 1989: 607 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 24.05.2021

Принята к публикации после доработки 01.12.2021

Сведения об авторах

Балакин Владимир Станиславович, старший научный сотрудник, Научно-исследовательская лаборатория, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил (Минобороны России), balakin69vs@gmail.com.

Шипко Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Научно-исследовательская лаборатория, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил (Минобороны России), yshipko@mail.ru.

Information about authors

Balakin Vladimir Stanislavovitch, Senior researcher, Scientific research laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force (RF Ministry of Defense).

Shipko Yuriy Vladimirovitch, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Senior researcher, Scientific research laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force (RF Ministry of Defense).

Разделение конвективных штормов. Часть II. Организация мезомасштабной структуры грозоградового процесса

Е.М. Лившиц¹, В.И. Петров²

¹ Франкфурт на Майне, Германия, evmaleposoru@googlemail.com

² Специальная служба активных воздействий на гидрометеорологические процессы Республики Молдова, Кишинев

Исследование феномена разделения мощных конвективных штормов привело к выводу об управлении этим процессом со стороны мезо- β -масштабных конвективных структур, а влияние сдвига ветра с высотой сводится лишь к предпочтительной реализации одного из вариантов этих структур. На примере внутримассового процесса в Молдове рассматривается динамика формирования мезо- β -масштабных конвективных ячеек, внешне похожих на открытые ячейки Рэлея—Бенара, и мезомасштабных конвективных линий, похожих на «облачные улицы». Впервые наиболее полно описаны общие свойства этих мезомасштабных структур, которые применяются в сверхкраткосрочном прогнозе динамики конвективных штормов при проведении противоградовых работ, в активных воздействиях по изменению режима осадков из конвективной облачности, штормоповещении, и могут быть полезны для различных отраслей народного хозяйства.

Ключевые слова: мезомасштабные конвективные ячейки (ММКЯ), мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ), узел, грань, конвективный шторм, вектор эволюции, сверхкраткосрочный прогноз.

The splitting of convective storms. Part II. Organizations of the mesoscale structure of the Thunderstorm process

E.M. Livshits¹, V.I. Petrov²

¹ Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@googlemail.com

² Special Service of Active Influences on Hydrometeorological Processes of the Republic of Moldova, Kishinev

Based on the analysis of the phenomenon of splitting of powerful convective storms with more sound factual information thanks to technical and methodological progress, the paper reconsiders the hypothesis published by the authors in 1983 on the control of powerful convection by meso- β -scale processes. At weak winds and weak wind shear with height, they are expressed as polygonal structures similar to open Rayleigh—Benard cells, with a modal size of 30—40 km. At medium and large shear, they are expressed as linear structures resembling "cloud streets". These structures form on the surface boundary layer and trigger strong penetrating convection. The example of a powerful intra-mass thunderstorm process is analyzed, in which the previously unreported phenomenon of multicell hail storm splitting is found with one of the storms remaining in place after splitting and continuing to produce strong hail with damage. The dynamics of mesoscale convection cell (MSCC) and mesoscale convection line (MSCL) formation were considered for the first time. Based on this view of convection organization, the phenomenon of storm splitting as well as other convective phenomena are first described and explained without involving the parameter of wind shear with altitude. The application of the Lagrangian coordinate system (LSC), which excludes the masking effect of mean tropospheric displacement, allows such structures to be constructed. This method reduces the number of options by an order of magnitude for displaying phenomena marked by a stationary observer and significantly reduces the time for making operational decisions. The proposed method can be useful in active influencing on convective processes, storm warning and in many branches of national economy.

Keywords: Mesoscale convective cells (MSCC), Mesoscale convective lines (MSCL), knot, edge, convective storm, evolution vector, ultra-short-range forecast.

For citation: E.M. Livshits, V.I. Petrov. The splitting of convective storms. Part II. Organizations of the mesoscale structure of the Thunderstorm process. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2022, 66: 20—41. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-20-41

Введение

Феномен разделения мощных конвективных штормов, о котором шла речь в [1], взят нами в качестве одного из многих, связанных с их динамикой и кинематикой.

Вначале рассмотрим основные классификации типов штормов. При этом ограничимся масштабом конвективного шторма и тех объектов мезо- β -масштаба, которые мы определяем как ММКЯ (мезомасштабные конвективные ячейки) и ММКЛ (мезомасштабные конвективные линии). Мы не касаемся классификаций, включающих в себя шквальные линии, кластеры различных типов, боу-эхо, деречо, которые предполагают отнесение их как к мезо- β -, так и к мезо- α -масштабам [2].

Первую наиболее полную морфологическую классификацию штормов дали Чисхолм и Реник [3], выделившие 3 типа штормов: *однойчейковые*, *многоячейковые* (*мультиячейковые*) и *суперячейковые*.

Василофф и др. [4], наблюдая процессы перехода мультиячейковых штормов в суперячейки и обратно, считали, что структура конвективного шторма могла бы быть классифицирована скорее *в виде континуума*, чем как отдельные сущности типа мультиячейкового или суперячейкового штормов. Фут и Фрэнк [5] считали строение упорядоченных мультиячейковых и суперячейковых штормов практически одинаковым и предложили классифицировать штормы в зависимости от *соотношения диаметра восходящего потока (D_s), и расстояния между центрами соседних восходящих потоков (L)*. Если $L > D_s$, то имеет место так называемый «классический» упорядоченный мультиячейковый шторм с дискретным появлением новых радиолокационных ячеек (РЯ). Если $L < D_s$ — это суперячейковый шторм. При $L \sim D_s$ шторм эволюционирует по типу «слабой эволюции», т. е. в этом случае РЯ слабо различимы.

Концепция, в которой была сделана попытка обобщить подходы к типизации, была предложена Футом в работе [6]. В ее основу были положены следующие принципы: *по одновременному количеству ячеек в шторме, по времени жизни ячеек, по типу эволюции, по организации ансамбля ячеек и механизму образования зародышей града*.

Шон и др. [7], применяя в исследованиях доплеровский радар, предложили морфологическую классификацию *на основе организационного континуума*.

Вайсман и Клемп [8] изучали влияние вертикального сдвига ветра и плавучести на структуру и развитие конвективных штормов с использованием трехмерной численной модели облаков в широком диапазоне условий окружающей среды. Модель способна создавать спектр типов штормов, качественно сходных с наблюдаемыми в природе.

Абшаев и др. в технологии противогорадовой защиты (ПГЗ) [9] предложили типизацию, в которой присутствуют три основных типа штормов: одначейковые, мультячейковые и суперячейковые. Используя понятие грозоградный процесс (ГТП), авторы [9] разделили мультячейковую группу ГТП на *упорядоченные и неупорядоченные* процессы в зависимости от пространственной структуры ветра в атмосфере.

Отдельно отметим суперячейки, т. к. они являются самыми мощными в ряду конвективных штормов. Первое описание таких штормов на основе радиолокационных наблюдений было сделано Браунингом [10]. По мере накопления информации суперячейки были разделены на три класса: *классические* (CL) — Браунинг [10], Лимон и др. [11]; *с низким уровнем осадков* (LP) — Барджесс и др. [12], Блюштайн и др. [13]; *с высоким уровнем осадков* (HP) — Досуэлл и др. [14], Моллер и др. [15]. Отнесение суперячеек к разным классам носит, по нашему мнению, не вполне объективный характер. Различие их свойств не всегда очевидно, а сравнительная редкость не позволяет комплексно и объективно изучить этот феномен. Вносят свои коррективы и региональные условия. Встречаются также случаи перехода суперячеек по мере их развития из одного класса в другой: Блюштайн и др. [16], Дэвис-Джонс и др. [17].

В ряде работ (Барджесс и др. [18], Жерард и др. [19], Машико [20]) описываются так называемые «мини-суперячейки», которые отличаются меньшими размерами.

Отметим работы Бетти и др. [21, 22], в которых авторы на основе доплеровских радиолокационных характеристик дают классификацию, позволяющую разделить LP и HP суперячейки.

Новотарский и др. [23, 24], Андерсон-Фрей и др. [25], Штауффер [26] разработали статистический метод самоорганизующейся карты (SOM), что позволило применить его для составления прогнозов условной вероятности несуперячейковых штормов, неторнадических суперячеек (NT), слаботорнадических (WT), суперячеек с торнадо (менее F/EF2 по шкале Фуджита) и значительно торнадических (ST) суперячеек (F/EF2 по шкале Фуджита или выше).

Применение спутников вызвало к жизни много новых технологий. Их использование совместно с радиолокационными и другими натурными наблюдениями позволило не только классифицировать конвективные штормы, мезомасштабные конвективные структуры, но и, что особенно важно, заполнить информационные «лакуны» на континентах и в мировом океане, где не было возможности осуществлять радиолокационное и другое покрытие.

Гуэрова и др. [27], Вэй Джин и др. [28], Гийбэн и др. [29] применили спутниковую информацию и специальное программное обеспечение для анализа и классификации мощных гроз.

Бэнг и др. [30], Брюик и др. [31] использовали пассивные микроволновые радиометры для селекции из космоса градовых штормов.

В недавней работе Мэрион и др. [32] с помощью новых спутников серии GOES-R была установлена взаимосвязь между шириной восходящего потока конвективного шторма и интенсивностью торнадо.

Попытки классификации конвективных штормов, очевидно, продолжатся. Причина этому, на наш взгляд, состоит в том, что примерно половина всех штормов не вписывается ни в одну из классификаций. Здесь мы имеем в виду не столько морфологию штормов, сколько динамику штормов на протяжении всего их жизненного цикла. Это, на наш взгляд, является следствием того, что в качестве параметров управления по отношению к шторму принимается конвективная неустойчивость тропосферы, структура ветра с высотой и др., свойственные мезо- α -масштабу. Если бы это было верно, то все конвективные штормы в данный период времени и в конкретном регионе были бы «калиброваны» под параметры мезо- α -масштаба. Но этого, как известно, не происходит.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы показать решающую роль мезо- β -масштабных структур в динамике, «поведении», разнообразии конвективных феноменов, имеющих место одновременно на ограниченных территориях. Влияние мезо- α -масштаба, скорее всего, отражается на уровне возможных экстремальных проявлений конвекции и на преимущественных формах организации мезо- β -масштабных структур.

Исходные материалы и методика исследований

В настоящей работе, как и в [1], мы использовали данные опубликованных работ зарубежных и отечественных исследователей, сопоставляли оригинальные авторские материалы и преобразовывали их с помощью Лагранжевой системы координат (ЛСК), позволяющей исключить маскирующее действие смещения средней тропосферы [33]. В итоге были получены качественно новые результаты, позволяющие интерпретировать известные факты с единых позиций, которые способны не только описать, но и объяснить интересующие нас феномены. Кроме того, мы подробно исследуем один из внутримассовых процессов, данные по которому собирались с помощью АСУ МРЛ [34] в системе ПГЗ Республики Молдова. Частота получения объемных файлов из полусферы радиолокационного обзора пространства составляла 3,5 минуты в течение всего периода наблюдений. Была использована также аэрологическая и синоптическая информация за сроки, наиболее приближенные ко времени рассматриваемых событий.

Основные векторы движения элементов шторма

Многие исследователи изучали векторы движения таких элементов шторма, как его облачная ячейка (в нашей терминологии — *радиолокационная ячейка (РЯ)* [35, 36]), в виде единого целого. Примеры из работ [3, 37—42] показывают, что в зависимости от направления и скорости обновления, они двигаются по отношению к ведущему потоку по-разному — с замедлением или ускорением.

Рис. 1 иллюстрирует зависимость скорости смещения шторма ($\vec{V}_ш$) от соотношения скорости воздушного потока на 600 мб поверхности ($\vec{V}_п$) и эволюции шторма ($\vec{V}_э$):

- замедления шторма ($\vec{V}_{ш} < \vec{V}_n$), когда вектор эволюции находится справа и сзади относительно ведущего потока (рис. 1 а—в);
- примерного равенства скоростей ($\vec{V}_{ш} \approx \vec{V}_n$), (рис. 1 г);
- превышения скорости шторма над скоростью ведущего потока ($\vec{V}_{ш} > \vec{V}_n$), когда вектор эволюции находится справа или справа спереди относительно ведущего потока (рис. 1 д—е);
- редко встречающуюся ситуацию (около 10 % случаев от всех мощных штормов [35, 36]) практического совпадения векторов ведущего потока (\vec{V}_n) и вектора движения шторма ($\vec{V}_{ш}$). В данном случае это мультитячейковый Раумег-шторм [41, 43];
- отсутствия смещения шторма даже при значительных скоростях внешнего ветра (рис. 1 ж) [42], когда вектор эволюции ($\vec{V}_э$) противоположен направлению вектора ведущего потока (\vec{V}_n) и равен по скорости ($\vec{V}_н \approx \vec{V}_э$).

Результаты исследований соотношений векторов движения в мощных штормах со стационарирующим навесом описаны в работах [35, 36]. В них впервые приведены прямые радиолокационные доказательства того, что обновление штормов через фидерные облака происходит в направлении вектора эволюции ($\vec{V}_э$). При этом более чем в 90 % случаев $\vec{V}_э$ не совпадает с направлением навеса шторма.

Штормы могут двигаться медленнее или быстрее ведущего потока, влево или вправо от него, против потока или стоять на месте. И это понятно, когда мы

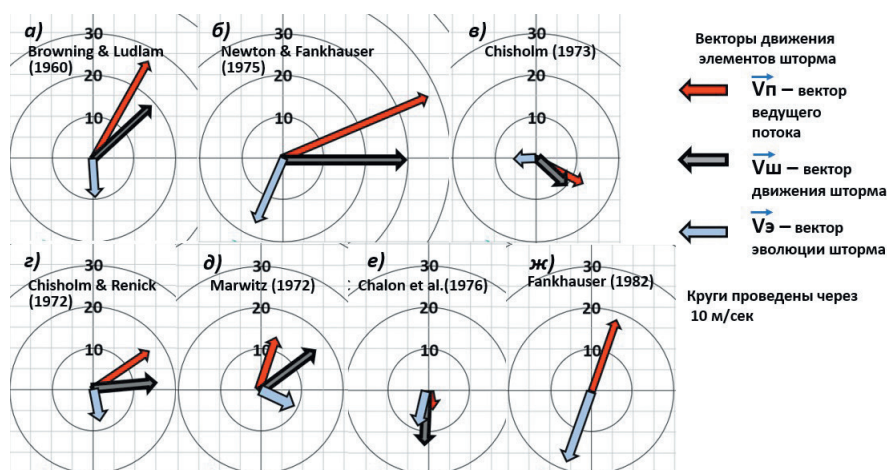


Рис. 1. Примеры векторов движения элементов шторма: [37] (а); [38] (б); [39] (в); [3] (г); [40] (д); [41] (е); [42] (ж).

Fig.1 Examples of storm element motion vectors: [37] (а); [38] (б); [39] (в); [3] (г); [40] (д); [41] (е); [42] (ж).

рассматриваем векторы движения отдельно взятого шторма. Случаи, когда штормы одновременно и недалеко друг от друга смещаются в разных направлениях и с разными скоростями или стоят на месте, у неподвижного наблюдателя, находящегося в ЭСК, создают впечатление хаоса. Такие явления чаще всего встречаются при внутримассовых ГПП. В этих случаях, как считают авторы [9], образуются так называемые «одноточечные» штормы, которые двигаются в поле слабых ветров в разных направлениях и с разными скоростями. Таких ГПП, а также «неупорядоченных» мультиячейковых ГПП, ведущих себя «непредсказуемо», в регионе Северного Кавказа, встречается в 45 % случаев. Обычное объяснение такого рода динамики и кинематики штормов, сводится к влиянию орографии [9]. Мы же, напротив, считаем, что именно в таких ГПП наилучшим образом проявляются ММКЯ и ММКЛ, поведение штормов на элементах которых наиболее предсказуемо, а влияние орографии не является определяющим.

Исходя из результатов, полученных нами в [1], можно констатировать, что структура ветра и сдвиг ветра с высотой не гарантируют единообразия в динамике и кинематике штормов в конкретный день на данной территории. Это означает, что именно отсутствие единообразия проявления различных феноменов ставит под сомнение определяющую роль структуры ветра с высотой.

На рис. 2 полигональные сетчатые структуры представлены схематически в виде шестигранников. Впервые схема реализации конвекции на элементах этих структур была описана в работе [44], а гипотеза о том, что упорядоченная мезомасштабная конвекция в нижней части тропосферы в виде полигональных

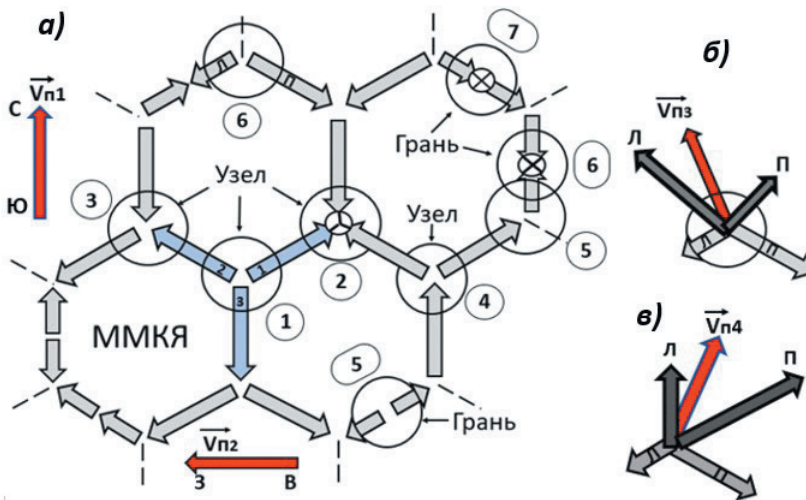


Рис. 2. а) Схема полигональной сетчатой структуры конвекции, по элементам которой (узлам 1, 2, 3, 4, 5, 6 и граням 5, 6, 7) происходит развитие штормов [44]; б, в) разделение штормов в узле 6.

Fig. 2. а) Schematic of the mesh convection structure, along the elements of which (knots 1, 2, 3, 4, 5, 6 and edges 5, 6, 7) the development of storms [44]; б, в) splitting of storms at knot 6.

сетчатых структур является запускающим механизмом для глубокой конвекции, высказана ранее в работе [33].

ММКЯ представляют собой циркуляционную систему, в центре которой имеют место нисходящие движения. При этом конвекция, а значит, и осадки, как ее следы в этой области отсутствуют. По внешнему периметру ММКЯ существуют восходящие движения, инициирующие возникновение и развитие конвекции. Структурными элементами внешнего периметра ММКЯ являются узлы и грани. Грани — линейные элементы, которые сходятся в узлах.

Развитие штормов происходит в узлах и на гранях ММКЯ, так как в этих областях в определенное время сосредотачивается «конвективный ресурс», который затем штормами расходуется. В свою очередь, конвективный ресурс пополняется из неустойчивости тропосферы через механизм циркуляции от центра ММКЯ к их граням и узлам. Завершение развития штормов на элементах мезомасштабных структур (диссипация штормов) свидетельствует о том, что конвективный ресурс в конкретном месте исчерпан.

От того, на каком элементе ММКЯ возникает и развивается шторм, зависит кинематика и динамика штормов. Здесь необходимо напомнить, что ММКЯ, ММКЛ или их отдельные фрагменты можно обнаружить, только интегрируя во времени радиоэхо от облаков в ЛСК, т. е. исключая вектор \vec{V}_n . Еще следует учитывать, что ММКЯ не всегда проявляются в виде полностью замкнутых полигональных структур, чаще всего мы наблюдаем частично замкнутые структуры. Кроме того, их элементы проявляются не одновременно. На основе многочисленных наблюдений было обнаружено *важнейшее свойство* этих структур: *конвекция на элементах ММКЯ или ММКЛ реализуется только один раз за время всего конвективного процесса*. Сам конвективный процесс может длиться иногда 10—15 и более часов, и за этот период на указанных элементах структуры ни разу не отмечается повторной конвекции. Этот факт является фундаментальным для построения сверхкраткосрочных прогнозов.

Рассмотрим элементы структуры ММКЯ подробнее (рис. 2). В узлах:

- а) две или три грани могут сходиться (узел 2) — феномен слияния и возможной диссипации штормов;
- б) две или три грани могут расходиться (узел 1) — феномен разделения штормов;
- в) в узел могут входить две грани, а исходить одна (узел 3) — феномен слияния и излома траектории штормов;
- г) в узел может входить одна грань, а выходить две (узел 4) — феномен разделения и излома траектории штормов;

И еще один феномен, не описанный в работе [44], который мы впервые обнаружили и описали в [1]. Это феномен разделения шторма, при котором один из штормов оставался на месте и продолжал развиваться (рисунки 7 и 8 в [1]). Назовем его *феноменом разделения капли* (подобно картине отделения капли воды из крана, когда оставшаяся на конце носика крана капля опять втягивается внутрь). Таким образом, имеют место пять возможных вариантов поведения штормов в узлах.

На гранях ММКЯ штормы могут:

- а) расходиться (грань 5) — феномен разделения;
- б) сходиться (грань 6) — феномен диссипации;
- в) смещаться друг за другом — феномен преследования и диссипации одного из штормов (грань 7).

Таким образом, есть три возможных варианта поведения штормов на гранях. В Эйлеровой системе координат (ЭСК), когда наблюдатель неподвижен, может проявляться, по нашим подсчетам, около 120 вариантов основных феноменов. Применение движущейся системы координат (ЛСК), жестко связанной с радиолокационной ячейкой, позволяет типизировать «поведение» штормов и выделить всего 8 вариантов их эволюции на элементах мезомасштабных структур.

На рис. 3 в качестве примера представлена картина, характерная для расхождения трех штормов из узла 1 (рис. 2 б) в ЛСК и то, как это же видит неподвижный наблюдатель (ЭСК), когда \vec{V}_n ориентирован с юга на север (рис. 3 з) и когда \vec{V}_n ориентирован с востока на запад (рис. 3 з). Рисунки 3 а—в и 3 д—ж иллюстрируют образование вектора смещения каждого из штормов.

Сочетание трех параметров: местоположения шторма в структуре ММКЯ, взаимного расположения элементов структуры ММКЯ и вектора ведущего потока, а также скорости эволюции создает собственно структуру ММКЯ, по конфигурации которой можно объяснить любое «поведение» шторма, наблюдаемое с помощью радара, т. е. в ЭСК.

Харрольд [45] предположил, но не объяснил наличие обновлений на противоположных флангах разделившихся штормов. Мы же объясняем этот феномен на примере узла 6 (рис. 2 б).

Если взять векторы эволюции \vec{V}_3 штормов Л и П (стрелки светло-серого цвета) из рис. 2 а и приложить к ним вектор ведущего потока \vec{V}_n (изображен красным), то по правилу сложения векторов получатся результирующие векторы движения левого (Л) и правого (П) штормов (стрелки темно-серого цвета с черной окантовкой). Из этого примера (рис. 2 б) видно, что левый шторм движется быстрее, чем правый.

На рис. 2 в показано разделение штормов в узле 6, только вектор ведущего потока направлен иначе. В результате правый шторм движется быстрее, чем левый. Из этих двух примеров очевидно, что в зависимости от соотношения сил (в виде \vec{V}_n и \vec{V}_3), действующих на штормы на разных флангах (левом и правом), мы получаем различные типы их движения после разделения. Такое объяснение применимо к случаям разделения и суперячейковых, и мультячейковых штормов при любых годографах. Таким образом, мы объясняем и другие аспекты этого феномена, а именно: ускорение или замедление движения штормов по траектории, углы расхождения штормов, соотношение скоростей расходящихся штормов и т.д., не привлекая при этом классическую теорию механизма их разделения [46, 47].

Теперь обратимся к ГПП от 22.06.2019 в Республике Молдова, фрагмент которого, касающийся разделения шторма, обсуждался в [1]. Здесь рассмотрим

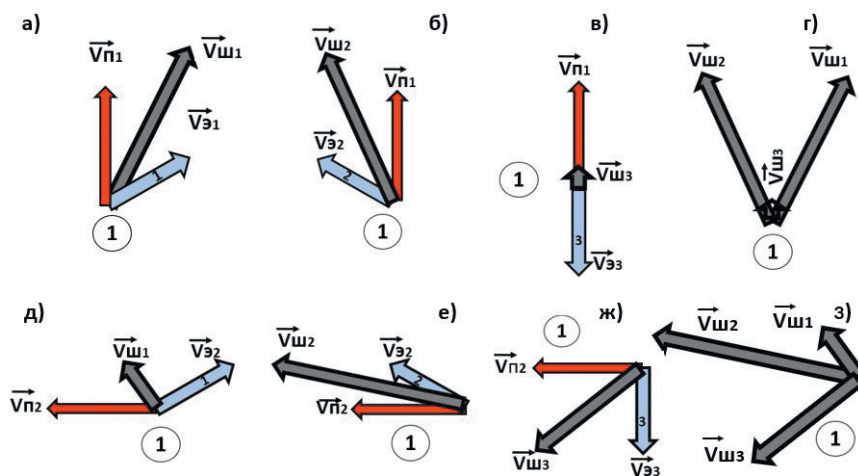


Рис. 3. Картина смещения штормов в ЭСК ($\vec{V}_{ш}$ — серый вектор) для двух положений вектора ведущего потока ($\vec{V}_{п}$ — красный вектор) относительно одного из структурных элементов ММКЯ, а именно из узла 1 (обозначение узла выделено маленьким кругом): первое положение $\vec{V}_{п}$ с юга на север (а, б, в), второе — с востока на запад (д, е, ж): з) и э) картина расхождения штормов ($\vec{V}_{ш1}$, $\vec{V}_{ш2}$, $\vec{V}_{ш3}$) в ЭСК из узла 1 при двух положениях $\vec{V}_{п}$.

Fig. 3 The picture of storm displacement in the ESC ($\vec{V}_{ш}$ — gray vector) for two positions of the leading flux vector ($\vec{V}_{п}$ — red vector) relative to one of the structural elements of the ММКЯ, namely from node 1 (the node designation is highlighted by a small circle): the first position $\vec{V}_{п}$ — from south to north (а, б, в), the second — from east to west (д, е, ж): з) and э) the picture of storm displacement ($\vec{V}_{ш1}$, $\vec{V}_{ш2}$, $\vec{V}_{ш3}$) in the ESC from node 1 at two positions $\vec{V}_{п}$.

динамику проявления мезомасштабных конвективных структур в виде ММКЯ и ММКЛ.

На рис. 4 путем интегрирования осадков за период около 9 часов представлена карта, на которой видны ММКЯ и ММКЛ (эти структуры в качестве примера указаны стрелочками). Общее количество обнаруженных ММКЯ в этот день составило 33, а ММКЛ — более 10-ти (привлечены данные шести радаров, которые расширили зону обзора почти вдвое). Напомним, что размер ММКЯ определяется диаметром круга, равным по площади внутренней области ММКЯ [1].

В табл. 1 сравниваются спутниковые данные, в которых представлено распределение размеров открытых ММКЯ, данные радиолокационных наблюдений за 46 ГПП в Молдове [33] и данные, полученные нами при анализе ГПП от 22.06.2019 в Республике Молдова. Максимумы всех трех распределений приходятся на диаметр ММКЯ, равный 30—40 км, и составляют 47, 37 и 43 % соответственно. В целом, можно констатировать неплохое совпадение распределений, а небольшие отличия мы связываем с ограниченным количеством ММКЯ, имевших место за один ГПП.

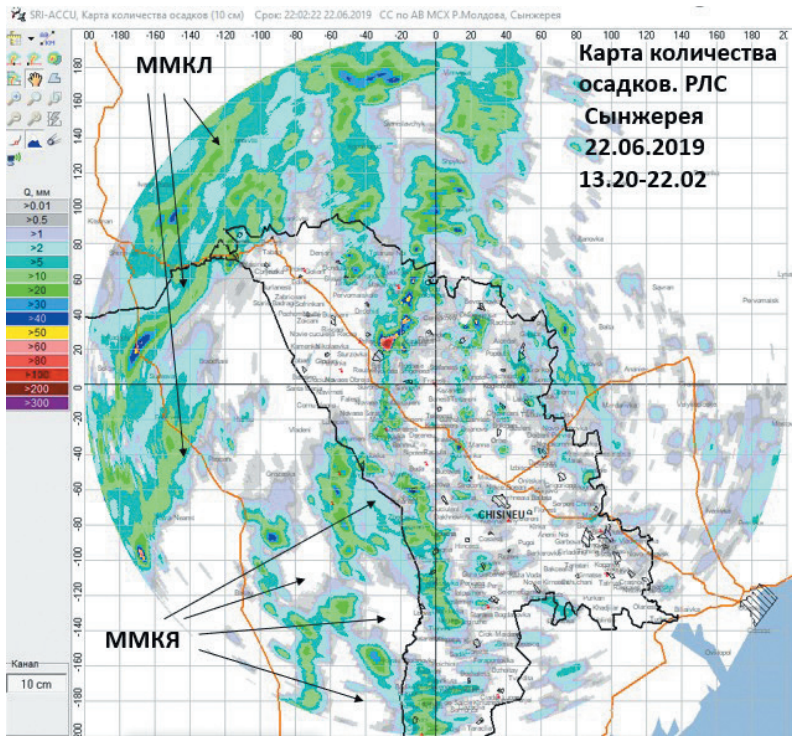


Рис. 4. Карта количества осадков по данным РЛС Сынжерия от 22.06.2019 (Республика Молдова).

Стрелками обозначены некоторые мезомасштабные конвективные ячейки (ММКЯ) и мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ).

Fig. 4. Map of precipitation according to the radar Singerei from 22.06.2019. Republic of Moldova.

The arrows indicate some Meso Scale Convective Cells (MSCC) and Meso Scale Convective Lines (MSCL).

Таблица 1

Повторяемость размеров мезомасштабных конвективных ячеек (ММКЯ) (в %) по спутниковым и радиолокационным данным из работы [33] и по радиолокационным данным от 22.06.2019

The repeatability of the Meso Scale Convective Cells (MSCC) size (in %) according to satellite and radar data from [33] and radar data from 22.06.2019

Данные	Диаметр ММКЯ (км)								
	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
спутников	5	21	47	21	3	1	0,8	0,4	0,8
РЛС	9	24	37	17	7	3,2	2	0,6	0,2
от 22.06.2019	6	28	43	17	6				

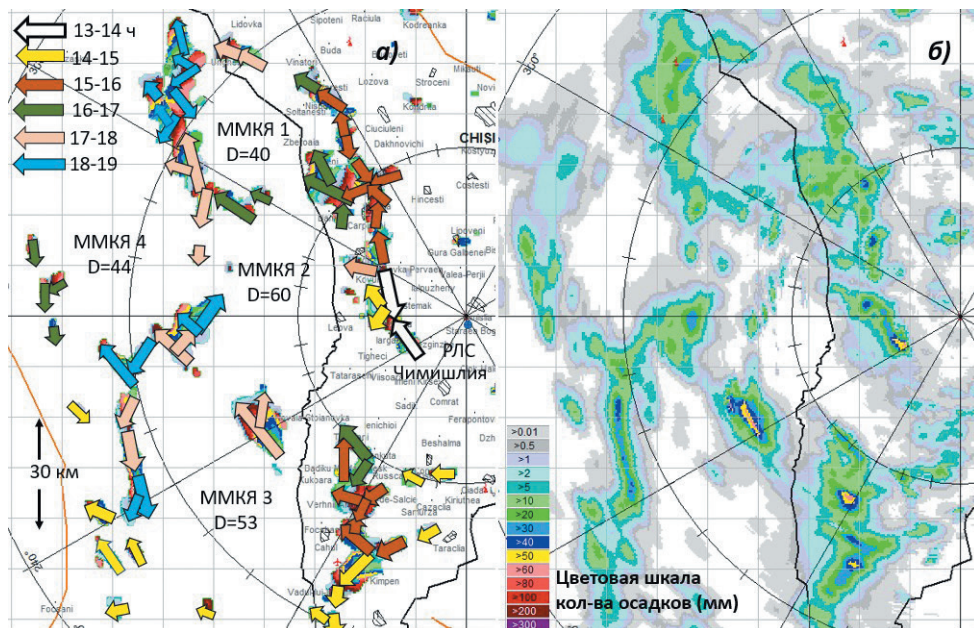


Рис. 5. Развитие мезомасштабных конвективных ячеек (ММКЯ) 22.06.2019 (Молдова, Радар Чимишлия):

- а) в виде векторов эволюции (радиоэхо с $Z \geq 45\text{dbZ}$);
- б) карта суммарных осадков с 13.43 по 19.43. D — диаметр ММКЯ (км).

Fig. 5. Evolution of mesoscale convective cells (MSCC) 22.06.2019 (Moldova, Radar Cimisia):

- а) as evolution vectors (radio echo with $Z \geq 45\text{dbZ}$);
- б) map of total precipitation from 13.43 to 19.43. D — diameter of MSCC (km).

На рис. 5 б представлена картина осадков за весь ГПП, и эта же картина в ЛСК на рис. 5 а. Цвета стрелок меняются в зависимости от времени существования тех или иных штормов. Здесь мы четко видим, что есть области, в которых осадки за весь период не отмечались (внутренние области ММКЯ, где имеют место нисходящие дивергентные воздушные потоки) и по краям, в зонах конвергенции восходящих воздушных потоков (мы называем эти области «гранями» и «узлами») почти везде отмечались осадки с различной интенсивностью. Размеры ММКЯ представлены на рис. 5 а. Конвекция началась около 13 часов (здесь и везде время местное) на востоке ММКЯ 2, затем, к 14 часам обозначилась южная периферия ММКЯ 3, а далее процесс проявления структур шел в основном с юго-востока на северо-запад. Некоторые детали ММКЯ дополнялись в течение всего периода.

В картине развития штормов отмечаются разные феномены, о которых речь шла выше: слияние, разделение, изломы траекторий штормов, преследование штормов, диссипация и т.д. Необходимо отметить, что в приводимых примерах ММКЯ 1—4, скорости эволюции по их элементам были в пределах 10—15 км/ч.

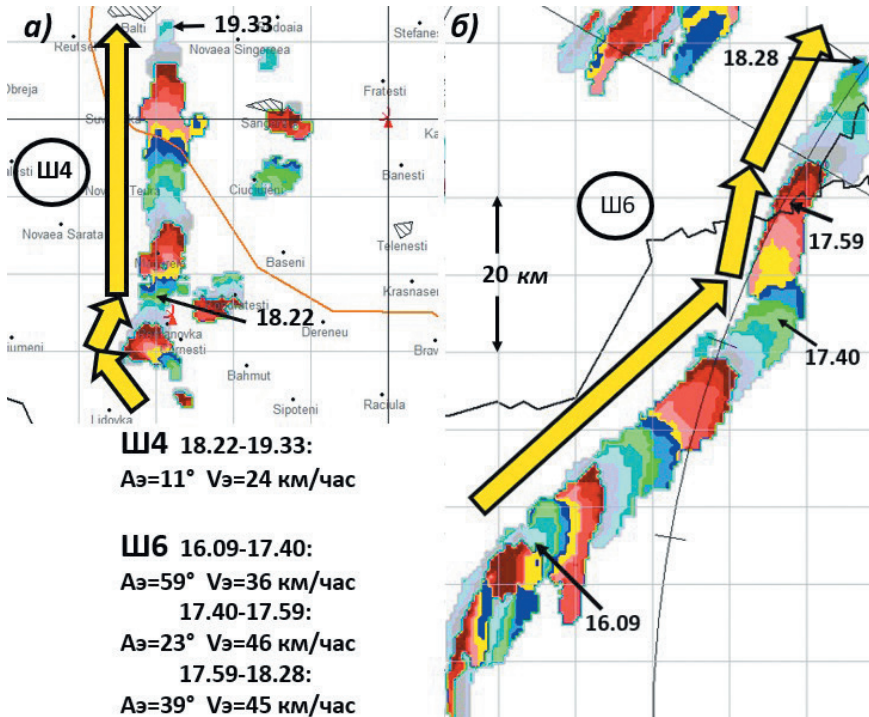


Рис. 6. Траектории штормов вдоль ММКЛ ($Z \geq 45 \text{ dbZ}$, $H = 5 \text{ км}$). ГПП за 22.06.2019 (Молдова). Частота обзора и смены цветов — 3,5 мин.

Fig. 6. Storm trajectories along the MMCL ($Z \geq 45 \text{ dbZ}$, $H = 5 \text{ км}$). TSP for 22.06.2019 (Moldova). Review and color change frequency — 3.5 min.

Важной особенностью ММКЯ является неодновременность проявления элементов структуры. По этой причине ММКЯ можно обнаружить, только интегрируя изображения радиозеха в течение какого-либо периода и по мере проявления структуры, имея определенные навыки прогнозировать не только конфигурацию элементов ММКЯ, но и время существования того или иного шторма, усиление или ослабление, место и время его разрушения и т.п.

На рис. 6 изображен фрагмент ГПП за 22.06.2019 в Молдове, где показаны траектории двух штормов: Ш4, о котором упоминалось в [1], и Ш6, развивавшийся в предгорной части Карпат в Румынии. Шторм 4, от момента 1-го радиозеха до полной диссипации просуществовал 170 мин, шторм 6 — 165 мин. Оба шторма испытывали изломы траектории. На разных прямолинейных участках они имели разные скорости эволюции, которые менялись от 24 (Ш4) до 46 км в час (Ш6). Если предположить, что центры ячеек, которые формировали картину эволюции этих штормов, располагались примерно в 6 км друг от друга (средний диаметр радиолокационных ячеек), то для Ш4, прошедшего расстояние 37 км, было 6 обновлений (5 ячеек в час), для Ш6 на разных прямолинейных участках таких

обновлений было в сумме 13 (5,6 ячеек в час). Примерно такая же частота обновлений имела место и для других ММКЛ в этот день. Этот параметр у нас для ММКЛ несколько выше, чем в мультячейковых и суперячейковых штормах при фронтальных процессах, когда она составляет величину от 3 до 4 в час, т. е. каждые 15—20 мин. Однако, мы пока не располагаем достаточной статистикой, которая смогла бы достоверно описать возможные различия в этом параметре для разных синоптических процессов.

Можно сравнить наши оценки с результатами, полученными в работе [48], в которой подробно представлен спектр скоростей эволюции 248 штормов в южной Бразилии. Приведем только два факта: средняя частота обновлений на элементах ММКЯ у нас равна двум в час, в южной Бразилии повторяемость этого параметра составляет 33 %; средняя частота обновления на ММКЛ у нас составляет около пяти в час, в южной Бразилии повторяемость таких частот обновления составляет 22 %. Из этого сравнения можно заключить, что повторяемость указанных выше частот обновления (а значит и скоростей эволюции) при внутримассовых процессах довольно внушительная: от 22 % для ММКЯ до 33 % для ММКЛ.

В работах [35, 36] нами показано, что регионы Северного Кавказа и Молдовы сравнимы с регионом южной Бразилии по спектру мощных градовых штормов. Эти полученные нами повторяемости частот обновлений и скоростей эволюции штормов на элементах ММКЯ и ММКЛ могут служить ориентиром в дальнейших исследованиях. Учет этого параметра — частоты обновлений для штормов, развивающихся на элементах ММКЯ или ММКЛ при разных типах ГТП (при внутримассовых или фронтальных) — имеет прямое отношение к технологии противоградовой защиты, т. к. частота циклов засева обновляющейся части штормов кристаллизующими реагентами линейно зависит от частоты обновления штормов.

Обсуждение полученных результатов и их сопоставление с концепцией разделения конвективных штормов

При рассмотрении известной классической концепции разделения мощных конвективных штормов [46, 47] в сопоставлении с опубликованными в литературе данными, а также с результатами наших исследований, возникает ряд следующих вопросов:

1. Авторы концепции считают, что горизонтальный вращающийся вихрь будет приподниматься набегающим восходящим потоком с последующим образованием дуги и т.д., в то время как набегающий восходящий поток может просто сверху обтекать горизонтальный вихрь, и все последующие стадии, ведущие к разделению шторма, не реализуются. Действительно, для набегающего восходящего потока горизонтальный вихрь является препятствием, преодолеть которое он может сверху, подобно тому, как теплый воздух при сближении с холодным фронтом не приподнимает его, а скользит поверх него. На каком основании, в таком случае, авторы концепции решили, что вихрь приподнимается восходящим потоком?

2. В суперячейковых или мощных мультячейковых штормах восходящие и нисходящие потоки разнесены: восходящие существуют в области слабого радиоэха

(под навесом радиоэха), и величина этих потоков достигает 30—40 м/сек и больше; нисходящие — далеко в тылу радиоэха и их величина — также десятки м/сек. Таким образом, в районе навеса радиоэха, где исключено выпадение осадков, отсутствует механизм разделения шторма. В тыловой части штормов, где происходит обрушение осадков, условия разделения штормов существуют, однако почему авторы концепции утверждают, что попадание в эту область вращающейся дуги приведет к разделению ее на две половины, в то время как мощные нисходящие движения могут подавить всю дугу полностью?

3. Если предположить, что вращающаяся дуга, достигшая области осадков, разделится пополам, то почему авторы концепции считают, что в условиях отсутствия восходящих потоков процесс развития разделившихся штормов продолжится?

Если мы все же примем за основу изложенную концепцию, то и в этом случае возникает ряд вопросов:

4. Почему после первого акта разделения шторма по мере поступления в него новых облачных ячеек через фидерные облака не происходит разделения шторма с частотой 15—20 мин (средняя частота поступления фидерных ячеек в штормы)?

5. Почему не разделяются все суперячейки, находящиеся в сходных условиях в данный день? А при наличии сходных условий — в разные дни?

6. Почему штормы, вращающиеся циклонически или антициклонически, иногда в процессе движения меняют свое отклонение от ведущего потока с левого на правое и наоборот. Означает ли это, что они поменяли свое вращение на противоположное? Если да, то почему это произошло без разделения шторма? А если не поменяли вращение, то почему?

7. Каким образом разнонаправленность траекторий разделившихся штормов сохраняется длительное время, если параметры мезо- α -масштаба (например, годограф), обуславливают либо циклоническое, либо антициклоническое вращение?

8. Теория утверждает, что разделяются только вращающиеся штормы, т. е. суперячейки, однако почему тогда встречаются случаи разделения явно не суперячеек? (Примеры на рисунках 3 и 4 в [1]), а также из данных других авторов [49—51].)

Ответы на указанные вопросы сформулированы ниже:

1—3. В самой фабуле взаимодействия восходящего потока и горизонтального ролла много искусственных предположений, которые требуют более детального натурного подтверждения. Мы не отрицаем того, что во многих случаях с помощью доплеровских измерений подтверждено циклоническое и антициклоническое вращение в отделившихся штормах. В некоторых случаях разделялись и мультячейковые штормы, в которых вращения потоков не происходило. Это означает, что вращение потоков внутри штормов не является обязательным условием их разделения. Подтверждением этому является ГПП от 18.06.2016 в Молдове [1], когда мультячейковый шторм разделился, и более чем через час один из отделившихся штормов стал суперячейкой.

4. Этот пункт представляется особенно важным, так как он затрагивает саму суть существования шторма, как процесса непрерывного обновления. Нами

показано [35, 36], что обновление штормов происходит в направлении вектора эволюции и совпадает с фидерными ячейками, которые обновляют шторм в среднем каждые 15—20 мин. Именно так и должно было бы происходить разделение штормов, однако этого не наблюдается. Вероятно, сравнительная редкость самого феномена разделения штормов указывает нам на то, что это явление возникает в особых условиях, пока еще не вполне изученных. Нет тонких исследований, в которых бы подробно разбирались и сам процесс разделения штормов. Такие данные смогли бы подтвердить или опровергнуть упомянутые выше положения концепции разделения штормов. В приведенных нами примерах показано, что все разделения штормов связаны с узлами мезомасштабных структур ММКЯ или их фрагментов, где узлы, а, значит, изломы четко просматриваются.

5. Если бы на различные феномены, которые мы наблюдаем в конвективных штормах, влиял мезо- α -масштаб, то все штормы вели бы себя одинаково, но этого не происходит. Мы показали, что от взаимного расположения элементов ММКЯ или ММКЛ, направления и скорости ветра в средней тропосфере зависит возможная реализация самых разнообразных феноменов и их комбинаций. При этом конфигурация и величина сдвига ветра, относящиеся к свойствам мезо- α -масштаба, не играют определяющей роли. По нашим представлениям, *факторы мезо- α -масштаба ответственны за форму реализации мезо- β -масштабных полигональных или линейных структур*. В то же время интенсивность конвекции и ее экстремальные проявления в виде суперячеек или мощных мультячейковых штормов во многом зависят именно от структуры ветра с высотой и параметров неустойчивости атмосферы.

6. Феномен смены отклонения траектории отделившихся штормов с левого на правый и наоборот теория не может объяснить, так как в этих случаях отсутствует разделение штормов (рисунки 3 и 4 в [1]). Мы объясняем его простым переходом штормов с одной грани ММКЯ (или ее фрагмента) на другую. Переориентация траекторий при этом связана с тем, что эти грани располагаются под некоторым углом друг к другу.

7—8. Сохранение отклонения траекторий штормов влево или вправо от ведущего потока в течение иногда многих часов теория не объясняет. Мы объясняем этот феномен наличием самих мезомасштабных структур, по граням и узлам которых эти штормы обновляются, а грани и узлы являются зонами конвергенции восходящих потоков. *Штормы диссипируют там, где отсутствуют условия конвекции*, т.к. на гранях и узлах мезомасштабных структур конвекция ранее уже проявлялась, и конвективный ресурс исчерпан.

Таким образом, *факт существования случаев разделения мультячейковых штормов не объясняется обсуждаемой теорией*. Наш подход, определяющий механизм влияния мезо- β -масштаба, напротив, не только объясняет этот феномен, но и не делает различий между механизмами разделения мультячейковых и суперячейковых штормов. Мы считаем, что *феномен разделения конвективных штормов объясняется обновлением на разных флангах*: для всех типов штормов разделение происходит по расходящимся граням ММКЯ или ММКЛ. Различные варианты соотношения скоростей разделившихся штормов и углов их расхождения

связаны лишь с разной взаимной ориентацией элементов мезо- β -масштабных структур по отношению к вектору внешнего ветра \vec{V}_n .

Выводы

Проведенное нами исследование феномена разделения штормов привело к необходимости описать многие другие феномены: диссипацию штормов, изломы траекторий, слияние штормов, различные скорости движения штормов, скорости их эволюции и т.п.

Применяя Лагранжев подход, например, в системе ПГЗ (Процедура Лагранжа в АСУ-МРЛ), мы получаем возможность в 15 раз (со 120 до 8) снизить количество вариантов отображения развития радиолокационных событий, а также число соответствующих прогностических решений и последующих оперативных действий.

Анализ известной теории разделения штормов в сопоставлении с фактами из зарубежной литературы и нашими исследованиями привел к следующим выводам:

1. Теория разделения штормов [46, 47] не может ответить на ряд важных вопросов, которые возникают при рассмотрении механизмов разделения штормов, не объясняет последствия таких разделений и часто вступает в противоречие с наблюдаемыми фактами.

2. Рассмотренные феномены впервые объясняются нами с единых позиций, связанных с положением и развитием штормов на элементах мезомасштабных структур в зависимости от взаимного расположения этих элементов по отношению к средне-тропосферным ветрам.

3. Впервые описан ранее не отмеченный феномен разделения мощных конвективных штормов, названный нами феноменом «разделения капли», когда один из разделившихся штормов, оставаясь в узле, продолжает развиваться и усиливаться, а другой отделившийся шторм смещается вдоль одной из граней ММКЯ. Таким образом, мы наблюдаем разделение шторма, но не наблюдаем расхождения траекторий штормов.

4. Закономерности развития штормов на элементах мезомасштабных структур позволяют осуществлять оперативное прогнозирование различных параметров штормов и мезомасштабных структур в целом применительно к технологиям ПГЗ, активных воздействий (АВ) на конвективные облака с целью перераспределения осадков и для штормоповещения населения.

В дальнейшем нами планируются исследования отдельных элементов структур ММКЯ и ММКЛ с целью описания и обобщения как уже известных, получивших апробацию в реально наблюдаемых процессах, так и новых прогностических предикторов. Их применение позволит существенно улучшить качество оперативных сверхкраткосрочных прогнозов, применяемых в работах по АВ на конвективную облачность, в штормоповещении, в обслуживании различных сфер народного хозяйства.

В заключение хотелось бы поблагодарить Гарабу И.А. за предоставленные материалы; Корнеева В.П., Щукина Г.Г. и Бычкова А.А. за всемерное содействие в проведении исследований и публикации их результатов.

Список литературы

1. *Лившиц Е.М., Петров В.И.* Разделение конвективных штормов. Часть I. Динамика и кинематика // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670.
2. *Orlanski I.* A rational division of scales for atmospheric processes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975. Vol. 56. P. 527—530.
3. *Chisholm A.J., Renick J.H.* The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta Hail Studies 1972. Research Council of Alberta // Hail Studies Report. 1972. № 72-2. P. 24—31.
4. *Vasiloff V.V., Brandes E.A., Davies-Jones R.P.* An investigation of the transition from multicell to supercell storms // Journal of Climate and applied meteorology. 1986. № 25. P. 1022—1036. doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<1022:AIOTTF>2.0.CO;2.
5. *Foot G.B., Frank H.W.* Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements // J. Atmos. Sci. 1983. Vol. 40. P. 686—707. doi: 10.1175/15200469(1983)040<0686:CSO-AHI>2.0.CO;2.
6. *Foot G.B.* Aspects of cumulonimbus classification relevant to hail problem // J. Res. Atmos. 1985. Vol. 19. P. 61—74.
7. *Schoen J.T., Ashley W.S.* A Climatology of Fatal Convective Wind Events by Storm Type // Weather and Forecasting. 2011. Vol. 26. P. 109—121. doi: 10.1175/2010WAF2222428.1.
8. *Weisman M.L., Klemp J.B.* The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy // Mon. Wea. Rev. 1982. Vol. 110, № 6. P. 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
9. *Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Бареева М.В., Малкарова А.М.* Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик, 2014. 500 с.
10. *Browning K.A.* Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds // J. Atmos. Sci. 1964. Vol. 21, № 6. P. 634—639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:AAPTWS>2.0.CO;2.
11. *Lemon L.R., Doswell III C.A.* Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis // Mon. Wea. Rev. 1979. Vol. 107, № 118. P. 1184—1197. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2.
12. *Burgess D.B., Davies-Jones R.P.* Unusual tornadic storms in eastern Oklahoma on 5 December 1975 // Mon. Wea. Rev. 1979. Vol. 107. P. 451—457. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0451:UTSIEO>2.0.CO;2.
13. *Bluestein H.B., Parks C.R.* A synoptic and photographic climatology of low precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains // Mon. Wea. Rev. 1983. Vol. 111. P. 2034—2046. doi: 10.1175/1520-0493(1983)111<2034:ASAPCO>2.0.CO;2.
14. *Doswell C.A., Moller A.R., Przybylinski R.* A unified set of conceptual models for variations on the supercell theme. Preprints. 16th Conf. Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB. Canada // Amer. Meteor. Soc. 1990. P. 40—45.
15. *Moller A.R., Doswell III C.A., Foster M.P., Woodall G.R.* The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures // Wea. Forecasting. 1994. Vol. 9. P. 327—347. doi: 10.1175/15200434(1994)009<0327:TOROST>2.0.CO;2.
16. *Bluestein H.B., Woodall G.R.* Doppler-radar analysis of a low precipitation severe storm // Mon. Wea. Rev. 1990. № 118. P. 1640—1664. doi: 10.1175/15200493(1990)118<1640:DRAOAL>2.0.CO;2.
17. *Davies-Jones R.P., Burgess D.W., Lemon L.R.* An atypical tornado producing cumulonimbus // Weather. 1976. 31. P. 336—347. doi: 10.1002/j.1477-8696.1976.tb07449.x.
18. *Burgess D.W., Lee R.R., Parker S.S., Floyd D.L., Andra D.I.* A study of mini supercells observed by WSR-88D radars. Preprints 27th Conf. On Radar Meteorology. Vail. CO // Amer. Meteor. Soc. 1995. P. 4—6.
19. *Gerard A.E., G.R. Garrett, C. Morgan.* An overview of a cool season tornadic supercell over central Mississippi. Nat. // Wea. Assoc. Electronic Journal. 2000. 2000-EJ2.
20. *Mashiko W., Niino H., Kato T.* Numerical Simulation of Tornadogenesis in an Outer-Rainband Mini-supercell of a Typhoon Shanshan on 17 September 2006 // Mon. Wea. Rew. 2009. Vol. 137. P. 4238—4260. doi: 10.1175/2009MWR2959.1.

21. *Beatty K., Rasmussen E.N., Straka J.M.* The Supercell Spectrum. Part I: A Review of Research Related to Supercell Precipitation Morphology // *Journal of Severe Storms Meteorology*. 2008. № 3 (4). P. 1—21.
22. *Beatty K., Rasmussen E.N., Straka J.M., Lemon L.R.* The Supercell Spectrum. Part II: A Semi-Objective Method for Radar Classification of Supercell Type // *Journal of Severe Storms Meteorology*. 2009. № 4 (1). P. 1—30.
23. *Nowotarski C.J., Jensen A.A.* Classifying proximity soundings with self-organizing maps toward improving supercell and tornado forecasting // *Wea. Forecasting*. 2013. № 28. P. 783—801. doi: 10.1175/WAF-D-12-00125.1.
24. *Nowotarski C.J., Jensen A.A.* Multivariate Self-Organizing Map Approach to Classifying Supercell Tornado Environments Using Near-Storm, Low-Level Wind and Thermodynamic Profiles // *Wea. Forecasting*. 2018. № 33. P. 661—670. doi: 10.1175/WAF-D-17-0189.1.
25. *Anderson-Frey A.K., Richardson Y.P., Dean A.R., Thompson R.L., Smith B.T.* Self-organizing maps for the investigation of tornadic near-storm environments // *Wea. Forecast*. 2017. № 32. P. 1467—1475. doi: 10.1175/WAF-D-17-0034.1.
26. *Stauffer R.M., Thompson A.M., Young G.S.* Tropospheric ozonesonde profiles at long-term u. S. monitoring sites: 1. A climatology based on self-organizing maps // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016. № 121. P. 1320—1329. doi: 10.1002/2015JD023641.
27. *Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S.* Thunderstorm Classification Functions Based on Instability Indices and GNSS IWV for the Sofia Plain // *Remote Sensing*. 2019. № 11(24). P. 1—17. doi: 10.3390/rs11242988.
28. *Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R.* Classification of Clouds in Satellite Imagery Using Adaptive Fuzzy Sparse Representation December // *Sensors*. 2016. № 16(12). P. 1—15. doi: 10.3390/s16122153.
29. *Gijben M., Coning E.* Using Satellite and Lightning Data to Track Rapidly Developing Thunderstorms in Data Sparse Regions // *Atmosphere*. 2017. Vol. 8, № 16. P. 1—15. doi: 10.3390/atmos8040067.
30. *Bang S.D., Cecil D.J.* Constructing a Multifrequency Passive Microwave Hail Retrieval and Climatology in the GPM Domain // *J. Appl. Met. and Clim.* 2019. № 58(9). P. 1889—1904. doi: 10.1175/JAMC-D-19-0042.1.
31. *Bruick Z.S., Rasmussen K.L., Cecil D.J.* Subtropical South American hailstorm characteristics and environments // *Mon. Wea. Rev.* 2019. № 147. P. 4289—4304. doi: 10.1175/MWR-D-19-0011.1.
32. *Marion G.R., Trapp R.J., Nesbitt S.W.* Using overshooting top area to discriminate potential for large, intense tornadoes // *Geophys. Res. Lett.* 2019. № 46. P. 12520—12526. doi: 10.1029/2019GL084099.
33. *Старостин А.Н., Лившиц Е.М., Швецов В.С.* Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков в Молдавии // *Метеорология и Гидрология*. 1983. № 10. С. 55—59.
34. *Абшаев М.Т., Абуаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В.* Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормоповещения и активного воздействия на облачные процессы // *Сб. Тр. XXVII Всеросс. Симпозиума «Радиолокац. исследования природных сред»*. СПб., 2011. С. 211—225.
35. *Лившиц Е.М., Петров В.И.* Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть I. Основные векторы движения и их соотношение в мощных градовых штормах // *Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Процессы*, 2021. С. 192—198.
36. *Лившиц Е.М., Петров В.И.* Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть II. Результаты исследования. Выводы // *Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Проц. Нальчик*, 2021. С. 198—204.
37. *Browning K.A., Ludlam F.H.* Radar analysis of a hailstorm. Tech. Note No. 5 // *Dept. of Meteorology. Imperial College. London*, 1960. P. 106.
38. *Newton C.W., Fankhauser J.C.* Movement and propagation of multicellular convective storms // *Pure Appl. Geophys.* 1975. № 113. P. 747—764. doi: 10.1007/BF01592957.
39. *Chisholm A.J.* Radar case studies and airflow models. Alberta Hailstorms // *Meteor. Mon.* 26. Amer. Meteor. Soc. 1973. P. 1—36. doi: 10.1007/978-1-935704-32-4.
40. *Marwitz J.D.* The structure and motion of severe hailstorms. Part II: Multi-cell storm // *J. Appl. Meteor.* 1972. № 11. P. 180—188. doi: 10.1175/1520-0450(1972)011%3C0180:TSAMOS%3E2.0.CO.
41. *Chalon J.-P., Fankhauser J.C., Eccles P.J.* Structure of an evolving hailstorm. Part I: General characteristic and cellular structure // *Man. Wea. Rev.* 1976. № 104. P. 564—575. doi: 10.1175/1520-0493(1976)104<0564:SOAENP>2.0.CO;2.

42. Fankhauser J.C. Hail Storms of the Central High Plains. Vol. 2. Part I: 22 June 1976 case study — a complex multicellular hail and rainstorm. Chap. 13: Large-scale influences, radar echo structure and mesoscale circulations // C. Knight. P. Squires. Eds. Colorado Assoc. University Press. 1982.
43. Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.P., Eccles P.J., Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., Mav E.L., Sand W.R. Structure of an Evolving Hailstorm, Part V; Synthesis and Implications for Hail Growth and Hail Suppression // Monthly Weather Rev. 1976. № 104. P. 603—610. doi: 10.1175/1520-0493(1976)104<0603:SOAHP>2.0.CO;2.
44. Старостин А.Н. Классификация типов эволюции кучево-дождевых облаков // Активное воздействие на атмосферные процессы в Молдове. 1992. Вып. 3. С. 58—74.
45. Harrold, T.W. Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations // ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29. 1966. P. 1—8.
46. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation // Mon. Weather Rev. 1981. № 109. P. 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
47. Klemp J.B. Dynamics of tornadic thunderstorms // Ann. Rev. Fluid Mech. 1987. № 19. P. 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
48. Starostin A., Abdoullaev S., Nunes A.B. Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares // XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000. P. 1990—1995.
49. Achtemeier G.L. Some observations of splitting thunderstorms over Iowa on August 25—26. 1965 // Preprints. Sixth Conf. on Severe Local Storms. Chicago. IL. Amer. Meteor. Soc. 1969. P. 89—94.
50. Charba J., Sasaki Y. Structure and Movement of the Severe Thunderstorms of 3 April 1964 as Revealed from Radar and Surface Mesonetwork Data Analysis // J. of the Meteorological Society of Japan. 1971. Vol. 49, № 3. P. 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3_191.
51. Wang C., Tai-Jen Chen G., Yang S., Tsuboku K. Wintertime Supercell Thunderstorms in a Subtropical Environment: Numerical Simulation // J. Monthly Weather Review. 2009. Vol. 137, № 7. P. 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.

References

1. Livshits E.M., Petrov V.I. The splitting of convective storms. Part I. Dynamics and Kinematics. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670. [In Russian].
2. Orlanski I. A rational division of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975, 56: 527—530.
3. Chisholm A.J., Renick J.H. The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta Hail Studies 1972. Research Council of Alberta. Hail Studies Report. 1972, 72-2: 24—31.
4. Vasiloff V.V., Brandes E.A., Davies-Jones R.P. An investigation of the transition from multicell to supercell storms. J. of Climate and applied meteorology. 1986, 25: 1022—1036. doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<1022:AIOTTF>2.0.CO;2.
5. Foot G.B., Frank H.W. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements. J. Atmos. Sci. 1983, 40: 686—707. doi: 10.1175/15200469(1983)040<0686:CSOA-HI>2.0.CO;2.
6. Foot G.B. Aspects of cumulonimbus classification relevant to hail problem. J. Res. Atmos. 1985, 19: 61—74.
7. Schoen J.T., Ashley W.S. A Climatology of Fatal Convective Wind Events by Storm Type. Wea. and For. 2011, 26: 109—121. doi: 10.1175/2010WAF2222428.1.
8. Weisman M.L., Klemp J.B. The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. Mon. Wea. Rev. 1982, 110, 6: 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
9. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Berekova M.V., Malkarova A.M. *Rukovodstvo po organizazii i provedeniyyu protivogradovykh rabot*. Guidelines for organizing and conducting anti-hail operations. Nalchik, 2014: 500 p. [In Russian].
10. Browning K.A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J. Atmos. Sci. 1964, 21, 6: 634—639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:AAPT WS>2.0.CO;2.

11. *Lemon L.R., Doswell III C.A.* Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.* 1979, 107, 118: 1184—1197. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<1184:STEAMS>2.0.CO;2.
12. *Burgess D.B., Davies-Jones R.P.* Unusual tornadic storms in eastern Oklahoma on 5 December 1975. *Mon. Wea. Rev.* 1979, 107: 451—457. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0451:UTSIEO>2.0.CO;2 13.
13. *Bluestein H.B., Parks C.R.* A synoptic and photographic climatology of low precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains. *Mon. Wea. Rev.* 1983, 111: 2034—2046. doi: 10.1175/1520-0493(1983)111<2034:ASAPCO>2.0.CO;2.
14. *Doswell C.A., Moller A.R., Przybylinski R.* A unified set of conceptual models for variations on the supercell theme. Preprints. 16th Conf. Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB. Canada. Amer. Meteor. Soc. 1990: 40—45.
15. *Moller A.R., Doswell III C.A., Foster M.P., Woodall G.R.* The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea. For.* 1994, 9: 327—347. doi: 10.1175/15200434(1994)009<0327:TOROST>2.0.CO;2.
16. *Bluestein H.B., Woodall G.R.* Doppler-radar analysis of a low precipitation severe storm. *Mon. Wea. Rev.* 1990, 118: 1640—1664. doi: 10.1175/15200493(1990)118<1640:DRAOAL>2.0.CO;2.
17. *Davies-Jones R.P., Burgess D.W., Lemon L.R.* An atypical tornado producing cumulonimbus. *Weather.* 1976, 31: 336—347. doi: 10.1002/j.1477-8696.1976.tb07449.x.
18. *Burgess D.W., Lee R.R., Parker S.S., Floyd D.L., Andra D.I.* A study of mini supercells observed by WSR-88D radars. Preprints 27th Conf. On Radar Meteorology. Vail. CO. Amer. Meteor. Soc. 1995: 4—6.
19. *Gerard A.E., Garrett G.R., Morgan C.* An overview of a cool season tornadic supercell over central Mississippi. *Nat. Wea. Assoc. Electronic Journal.* 2000, 2000-EJ2.
20. *Mashiko W., Niino H., Kato T.* Numerical Simulation of Tornadogenesis in an Outer-Rainband Minisupercell of a Typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.* 2009, 137: 4238—4260. doi: 10.1175/2009MWR2959.1.
21. *Beatty K., Rasmussen E.N., Straka J.M.* The Supercell Spectrum. Part I: A Review of Research Related to Supercell Precipitation Morphology. *Journal of Severe Storms Meteorology.* 2008, 3 (4): 1—21.
22. *Beatty K., Rasmussen E.N., Straka J.M., Lemon L.R.* The Supercell Spectrum. Part II: A Semi-Objective Method for Radar Classification of Supercell Type. *Journal of Severe Storms Meteorology.* 2009, 4 (1): 1—30.
23. *Nowotarski C.J., Jensen A.A.* Classifying proximity soundings with self-organizing maps toward improving supercell and tornado forecasting. *Wea. Forecasting.* 2013, 28: 783—801. doi: 10.1175/WAF-D-12-00125.1.
24. *Nowotarski C.J., Jensen A.A.* Multivariate Self-Organizing Map Approach to Classifying Supercell Tornado Environments Using Near-Storm, Low-Level Wind and Thermodynamic Profiles. *Wea. Forecasting.* 2018, 33: 661—670. doi: 10.1175/WAF-D-17-0189.1.
25. *Anderson-Frey A.K., Richardson Y.P., Dean A.R., Thompson R.L., Smith B.T.* Self-organizing maps for the investigation of tornadic near-storm environments. *Wea. Forecasting.* 2017, 32: 1467—1475. doi: 10.1175/WAF-D-17-0034.1.
26. *Stauffer R.M., Thompson A.M., Young G.S.* Tropospheric ozonesonde profiles at long-term u. S. monitoring sites: 1. A climatology based on self-organizing maps. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016, 121: 1320—1329. doi: 10.1002/2015JD023641.
27. *Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S.* Thunderstorm Classification Functions Based on Instability Indices and GNSS IWV for the Sofia Plain. *Remote Sensing.* 2019, 11(24): 1—17. doi: 10.3390/rs11242988.
28. *Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R.* Classification of Clouds in Satellite Imagery Using Adaptive Fuzzy Sparse Representation December. *Sensors.* 2016, 16(12): 1—15. doi: 10.3390/s16122153.
29. *Gjiben M., Coning E.* Using Satellite and Lightning Data to Track Rapidly Developing Thunderstorms in Data Sparse Regions. *Atmosphere.* 2017, 8, 16: 1—15. doi: 10.3390/atmos8040067.
30. *Bang S.D., Cecil D.J.* Constructing a Multifrequency Passive Microwave Hail Retrieval and Climatology in the GPM Domain. *J. Appl. Met. and Clim.* 2019, 58(9): 1889—1904. doi: 10.1175/JAMC-D-19-0042.1.

31. Bruick Z.S., Rasmussen K.L., Cecil D.J. Subtropical South American hailstorm characteristics and environments. *Mon. Wea. Rev.* 2019, 147: 4289—4304. doi: 10.1175/MWR-D-19-0011.1.
32. Marion G.R., Trapp R.J., Nesbitt S.W. Using overshooting top area to discriminate potential for large, intense tornadoes. *Geophys. Res. Lett.* 2019, 46: 12520—12526. doi: 10.1029/2019GL084099.
33. Starostin A.N., Livshits E.M., Shvetsov V.S. Mesoscale structure of radio echo fields of convective clouds in Moldova. *Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology.* 1983, 10: 55—59. [In Russian].
34. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Kotelevich A.F., Sirota N.V. Automated system of radar information processing for storm warning and active impact on cloud processes. *Tr. XXVII Vseross. Simpoziuma «Radiolokazionnye issledovaniya prirodnykh sred».* XXVII All-Russia Symposium “Radar Investigations of Natural Environments». St. Petersburg, 2011: 211—225. [In Russian].
35. Livshits E.M., Petrov V.I. Radar detection of the location of the feeding cloud line. Part I. Main motion vectors and their relation in powerful hail storms. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy.* Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes. Nalchik, 2021: 192—198. [In Russian].
36. Livshits E.M., Petrov V.I. Radar detection of the location of the feeder cloud line. Part II. Results of the study. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy.* Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes. Nalchik, 2021: 198—204. [In Russian].
37. Browning K.A., Ludlam F.H. Radar analysis of a hailstorm. *Tech. Note No. 5.* Dept. of Meteorology. Imperial College. London, 1960: 106 p.
38. Newton C. W., Fankhauser J.C. Movement and propagation of multicellular convective storms. *Pure Appl. Geophys.* 1975, 113: 747—764. doi: 10.1007/BF01592957.
39. Chisholm A.J. Radar case studies and airflow models. *Alberta Hailstorms. Meteor. Mon.* 26. *Amer. Met. Soc.* 1973: 1—36. doi: 10.1007/978-1-935704-32-4.
40. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Part II: Multi-cell storm. *J. Appl. Meteor.* 1972, 11: 180—188. doi: 10.1175/1520-0450(1972)011%3C0180:TSAMOS%3E2.0.CO.
41. Chalon J.-P., Fankhauser J.C., Eccles P.J. Structure of an evolving hailstorm. Part I: General characteristic and cellular structure. *Mon. Wea. Rev.* 1976, 104: 564—575. doi: 10.1175/1520-0493(1976)104<0564:SOAHP>2.0.CO;2.
42. Fankhauser J.C. Hail Storms of the Central High Plains. Vol. 2. Part I: 22 June 1976 case study — a complex multicellular hail and rainstorm. *Chap. 13: Large-scale influences, radar echo structure and mesoscale circulations.* C. Knight, P. Squires, Eds. Colorado Assoc. University Press, 1982.
43. Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.P., Eccles P.J., Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., Mav E.L., Sand W.R. Structure of an Evolving Hailstorm, Part V; Synthesis and Implications for Hail Growth and Hail Suppression. *Monthly Weather Rev.* 1976, 104: 603—610. doi: 10.1175/1520-0493(1976)104<0603:SOAHP>2.0.CO;2.
44. Starostin A.N. Classification of cumulonimbus cloud evolution types. *Aktivnoe vozdejstvie na atmosferynye protsessy v Moldove.* Active impact on atmospheric processes in Moldova. 1992, 3: 58—74. [In Russian].
45. Harrold T.W. Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations. ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29. 1966: 1—8.
46. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation. *Mon. Weather Rev.* 1981, 109: 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
47. Klemp J. B. Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987, 19: 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
48. Starostin A., Abdoullaev S., Nunes A.B. Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000: 1990—1995.
49. Achtemeier G.L. Some observations of splitting thunderstorms over Iowa on August 25—26. 1965. Preprints. Sixth Conf. on Severe Local Storms. Chicago. IL. *Amer. Meteor. Soc.* 1969: 89—94.
50. Charba J., Sasaki Y. Structure and Movement of the Severe Thunderstorms of 3 April 1964 as Revealed from Radar and Surface Mesonet Data Analysis. *J. of the Met. Soc. of Jap.* 1971, 49, 3: 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3_191.

51. Wang C., Tai-Jen Chen G., Yang S., Tsuboku K. Wintertime Supercell Thunderstorms in a Subtropical Environment: Numerical Simulation. J. Monthly Weather Review. 2009, 137, 7: 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.10.2021

Принята к публикации после доработки 28.01.2022

Сведения об авторах

Евгений Михайлович Лившиц, свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия, evmaleposoru@googlemail.com.

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

Information about authors

Evgenii Mikhailovich Livshits, Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@googlemail.com.

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

Определение экологического стока реки Алиджанчай (Азербайджан)

Ф.А. Иманов¹, И.С. Алиева¹, А.А. Нуриев¹, З.А. Нагиев²

¹ Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан, fardaimanov@bsu.edu.az

² Научно-Исследовательский и Проектный институт «Суканал», ОАО «Азерсу», г. Баку, Азербайджан

Статья посвящена оценке экологического стока р. Алиджанчай, являющейся левым притоком р. Куры в Азербайджане, и на которой планируется строительство водохранилища. Значения экологического стока реки определены с применением семи методов, шесть из которых относятся к гидрологическим методам. Использован также метод, основывающийся на холистическом подходе. Полученные разными методами оценки экологического стока изменяются от 10 до 32,9 % от величины среднегоголетнего стока реки.

Ключевые слова: река Алиджанчай, годовой сток, экологический сток, гидрологический метод, холистический подход.

Determination of the ecological flow of the Alijanchay river (Azerbaijan)

F.A. Imanov¹, I.S. Aliyeva¹, A.A. Nuriyev¹, Z.A. Nagiyev²

¹ Baku State University, Baku, Azerbaijan, fardaimanov@bsu.edu.az

² "Sukanal" Scientific-Research and Design Institute, "Azersu" JSC, Baku, Azerbaijan.

Countries with limited water resources strive to increase their own "sustainable flow" resources. In this direction, an affordable and relatively cheap way is to build reservoirs. The main objective of the article is to develop recommendations for estimating the ecological flow of the Alijanchay river, a left tributary of the Kura River, downstream of the reservoir dam.

Currently, no normative document exists in Azerbaijan to determine the ecological flow of rivers. Therefore, the values of the ecological flow of the river have been calculated by different methods. Six of seven methods used are classified as hydrological methods. One method is based on the holistic approach, which, in addition to the flow data, requires data on the hydromorphology of rivers, physicochemical parameters of river waters and types of bottom fauna and water use.

The values of the ecological flow of the Alijanchay river, calculated by different methods, vary from 10.0 to 32.9 % of the annual flow volume. According to the holistic method, this figure is 27.7 %. It seems that the holistic method should be preferred when choosing the estimated value of the ecological flow of the river, since this approach has been considered the most effective over the past 40 years in international practice.

Keywords: Alijanchay River, annual flow, ecological flow, hydrological method, holistic approach.

For citation: F.A. Imanov, I.S. Aliyeva, A.A. Nuriyev, Z.A. Nagiyev. Determination of the ecological flow of the Alijanchay river (Azerbaijan). *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2022, 66: 42—50. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-42-50

Введение

Водные ресурсы отдельных регионов, стран и речных бассейнов оцениваются по данным о годовом речном стоке рек, который имеет две составляющие — поверхностный и подземный сток. Основная часть поверхностного стока формируется за относительно короткий период времени (во время весеннего половодья и дождевых паводков), и поэтому в условиях естественного режима реки, т. е. без регулирования речного стока, рациональное его использование затруднено. Подземный сток в течение всего года участвует в питании рек. В периоды зимней и летне-осенней межени эти воды являются главным источником питания рек. Таким образом, в меженные периоды водопользование осуществляется в основном за счет подземного стока. С точки зрения эффективности использования водных ресурсов более благоприятными считаются реки с большей долей подземного стока. Подземный сток рек также называют «базисным стоком» или же «устойчивым стоком» [1]. Суммарный подземный сток местных рек Азербайджана составляет 4,354 км³ (42,2 %), поверхностный сток — 5,955 км³ (57,8 %) [2]. Поверхностный сток превышает подземный сток на 15,6 %.

Страны с ограниченными водными ресурсами стремятся к увеличению собственных ресурсов «устойчивого стока». В этом направлении доступным и относительно дешевым способом является построение водохранилищ. В конце XX в. «устойчивый сток» всей суши составлял 34 % [3].

В настоящее время полный объем всех водохранилищ Азербайджана составляет 22031 млн м³. Продолжается строительство еще двух водохранилищ на трансграничной реке Аракс совместно с Ираном (Худаферинское, с полным объемом 1612 млн м³ и Гыз Галасы — 57 млн м³). Кроме того, проектируется строительство нового водохранилища на р. Алиджанчай с полным объемом в 108 млн м³.

Основная цель статьи — разработка рекомендаций по определению экологического стока р. Алиджанчай ниже плотины одноименного водохранилища. При этом величина экологического стока рассматривается как необходимая часть оставляемого в русле реки речного стока [4].

Материалы и методы исследования

В настоящей работе были использованы данные по годовому, месячному и суточному стоку р. Алиджанчай (п. Каябаши), действующего в период 1958—2013 гг. Для определения экологического стока реки использованы семь методов. Эти методы, за исключением одного, относятся к числу гидрологических методов, которые являются более простыми (необходимы только гидрологические данные) и дешевыми (полевые исследования не требуются).

Дополнительно экологический сток реки рассчитан по методу, основывающемуся на холистическом подходе [10], для применения которого, наряду со стоковыми данными, требуются также данные по гидроморфологии рек, физико-химическим параметрам речных вод, видам придонной фауны и водопользованию. Применены и данные комплексных полевых исследований, выполненных в 2019—2020 гг.

Краткое описание бассейна и режима реки Алиджанчай

Река Алиджанчай является левым притоком р. Куры (рис. 1). Исток реки находится на высоте 3500 м, а устье — 13 м. В бассейне реки сформировались следующие высотные ландшафтные пояса: равнинные и предгорные степи, горные леса, горные луга, субнивальный и нивальный пояс. Приустьевую часть бассейна р. Алиджанчай занимают равнинные полупустыни.

В равнинных частях бассейна реки развито орошаемое земледелие. По данным 2018 г. площадь орошаемых земель составляет 3483 га. Здесь в основном выращивают зерновые, кормовые и бахчевые культуры.

В бассейне р. Алиджанчай построено небольшое внеусловное ирригационное водохранилище (1,23 млн м³), а также два ирригационных водозаборных сооружения (рис. 1).

На реке в разные годы действовали четыре пункта гидрологических наблюдений (Халхал, Каябаши, Халдан и Ханабад). В настоящее время они все закрыты. Нижняя граница зоны формирования стока реки соответствует створу Чайговушан, расположенному чуть выше поста Каябаши. Здесь на реке планируется строительство водохранилища. Необходимые для этого проекта гидрологические



Рис. 1. Бассейн р. Алиджанчай.

Fig. 1. Alijanchay river basin.

расчеты были выполнены на основе данных поста Каябаши (площадь водосбора 708 км² и его средняя высота 990 м). В этом пункте наблюдения средний многолетний годовой расход воды реки составляет 5,52 м³/с, максимальный расход воды — 146 м³/с (7 июня 1963 г.), а минимальный расход воды — 0,12 м³/с (5 сентября 1966 г.). Доля подземных вод в годовом стоке реки Алиджанчай в створе Каябаши составляет 43 % [2].

Обсуждение результатов

В Азербайджане отсутствует нормативный документ по определению экологического стока рек. Поэтому значения экологического стока рек рассчитаны различными методами [4].

1. Метод Монтана. В более чем 25 странах Европы для количественной оценки экологического стока рек широко используется метод Монтана. Расчеты производятся для водохозяйственного года. Оценка экологического состояния реки этим методом выполняется согласно данным табл. 1, в которой приведены градиентные показатели для критерия оценки.

Чтобы экологическое состояние реки можно было считать удовлетворительным, необходимо с октября по март в реке оставлять 7,53 млн м³ воды, а с апреля по сентябрь — 29,48 млн. м³. В этом случае годовой экологический сток будет равен 37 млн м³ (табл. 2). Таким образом, годовой экологический сток реки составляет 21,2 % от среднегодового стока (174 млн м³).

2. Метод 7Q10 — используется Службой рыболовства и дикой природы США, а также в штате Массачуссет. В Канаде применяется вариант 7Q20, в Великобритании вариант 7Q1. По этой методике строится аналитическая кривая обеспеченностей минимальных 7-суточных расходов воды, и по ней определяется расход воды, который повторяется один раз в 10 лет (обеспеченность $P = 90\%$). Это значение расхода воды (7Q10) принимается равной значению экологического стока [5].

Для р. Алиджанчай (п. Каябаши) применен вариант 30Q10 метода 7Q10. Статистические параметры минимальных месячных расходов воды рассчитывались

Таблица 1

Оценка экологического состояния рек по методу Монтана

Assessment of the ecological condition of the river according to the method of Montana

Экологическое состояние реки	Величины стока	
	за октябрь—март, %	за апрель—сентябрь, %
Максимум	200	200
Оптимально	60—100	60—100
Превосходно	40	60
Отлично	30	50
Хорошо	20	40
Удовлетворительно	10	30
Плохо или минимум	10	10
Резкая деградация	< 10	< 10

Экологический сток р. Алиджанчай (по методу Монтана)
 Estimation of ecological flow of R. Alijanchay, calculated by the method of Montana

Экологическое состояние реки	По методу Монтана, %	Экологический сток		По методу Монтана, %	Экологический сток	
		м ³ /с	млн м ³		м ³ /с	млн м ³
		октябрь—март			апрель—сентябрь	
Максимум	200	9,60	150,69	200	12,44	196,50
Оптимально	60—100	2,88	45,21—75,35	60—100	3,73—6,22	58,95—98,28
Превосходно	40	1,92	30,14	60	3,73	58,95
Отлично	30	1,44	22,60	50	3,11	49,13
Хорошо	20	0,96	15,07	40	2,49	39,30
Удовлетворительно	10	0,48	7,53	30	1,87	29,48
Плохо или минимум	10	0,48	7,53	10	0,62	9,83
Резкая деградация	< 10	< 0,48	< 7,53	< 10	< 0,62	< 9,83

по методу моментов: $Q = 3,52 \text{ м}^3/\text{с}$; $C_v = 0,56$; $C_s = 0,80$ и $C_s/C_v = 1,4$. Для сглаживания эмпирической кривой обеспеченностей минимального стока использовано трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого—Менкеля.

Значение минимального расхода воды 90%-ной обеспеченности составляет $30Q_{10} = 1,26 \text{ м}^3/\text{с}$, а соответствующая этому расходу воды величина экологического стока — $39,7 \text{ млн м}^3$ или $22,8 \%$ от среднегодовалого годового стока реки.

3. Метод Q95 %, предусматривает построение кривой продолжительности стояния суточного расхода воды [6]. По этой кривой определяется расход воды 95%-ной обеспеченности, который принимается в качестве величины экологического стока. Для анализируемой реки подобная кривая была построена с учетом наблюдаемого абсолютного минимума расхода воды (рис. 2).

В результате расчетов было определено, что $Q_{95} \% = 1,11 \text{ м}^3/\text{с}$. Объем экологического стока составляет $35,0 \text{ млн м}^3$ ($20,1 \%$).

4. Метод Фащевского. По этому методу для определения экологического стока рек, со среднегодовым расходом воды более $1 \text{ м}^3/\text{с}$ принимается 75% от объема минимального месячного стока 95%-ной обеспеченности [6]. Установлено, что величина экологического стока р. Алиджанчай составляет $17,3 \text{ млн м}^3$ (10%).

5. Метод Иманова. Данный метод относится к группе гидрологических методов и позволяет построить гидрографы экологического стока по среднемесячным расходам воды [7, 8].

Расчеты проводились в двух вариантах:

- использовались среднемесячные расходы воды за все годы наблюдения;
- использовались среднемесячные расходы воды только самого маловодного года.

Среднемесячные значения экологического стока, рассчитанные для обоих вариантов, приведены в табл. 3.

По первому варианту объем экологического стока составляет $37,2 \text{ млн м}^3$ ($21,5 \%$), по второму — $57,0 \text{ млн м}^3$ ($32,9 \%$).

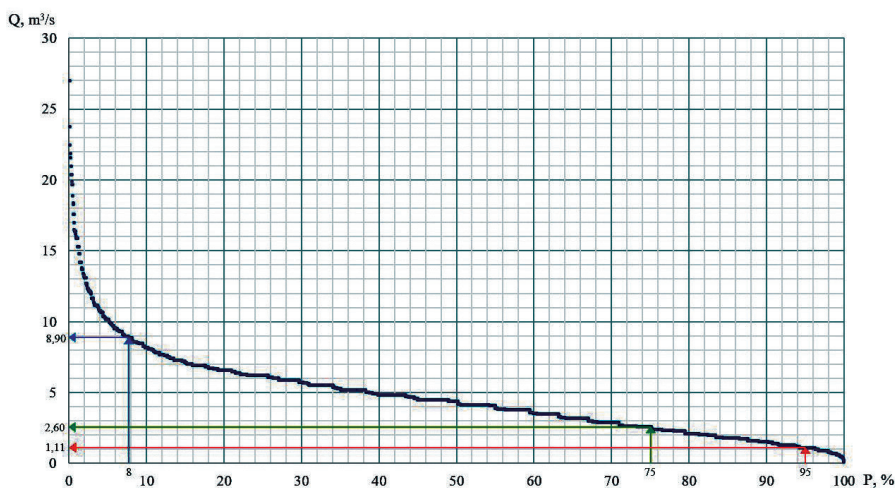


Рис. 2. Кривая продолжительности стояния суточных расходов воды.

Fig. 2. Duration curve of daily water discharges.

Таблица 3

Среднемесячные значения экологического стока
Average monthly values of ecological flow

Варианты	Среднемесячные значения экологического стока, м³/с											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-й	1,32	1,10	1,42	0,86	1,90	1,15	0,59	0,59	0,86	1,58	1,64	1,15
2-й (1961 г.)	2,38	2,30	2,58	2,86	2,19	1,15	0,59	0,88	0,95	1,90	2,18	1,79

6. Гидрологический метод Кура I. Этот метод был разработан в рамках первой фазы регионального проекта Кура I, поддерживаемого Программой развития Организации Объединенных Наций и Глобальным экологическим фондом (ПРООН-ГЭФ). Для применения этого метода необходимы данные гидрологических наблюдений не менее 15 лет. Сначала рассчитывается среднее значение ряда минимального декадного стока, а затем определяется отношение (в процентах) этой величины к минимальному среднемесячному стоку. Полученное отношение принимается одинаково для всех календарных месяцев.

Среднемесячные значения экологического стока, рассчитанные по данному методу, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Среднемесячные значения экологического стока (метод Кура I)
Average monthly values of ecological flow

Среднемесячные значения экологического стока, м³/с											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,71	0,58	0,87	0,93	1,31	1,04	1,01	1,18	1,61	1,02	1,07	0,56

Согласно этому методу объем экологического стока составляет 32,4 млн м³ (18,6 %).

7. Холистический метод Кура II. Этот метод был разработан в рамках второй фазы регионального проекта Кура II, поддерживаемого ПРООН-ГЭФ. Согласно этому методу, режим экологического стока включает три экологически и социально значимых компонента речного стока:

1. Величина стока для выживания донной фауны. Она соответствует наименьшим наблюдаемым расходом воды в маловодные периоды года.

2. Величина низкого стока необходима для поддержания индикаторных видов и стадий их жизни, экологических процессов, а также важных социальных и культурных объектов. Продолжительность периода низкого стока обычно составляет от одного до шести месяцев, при этом обеспечивается непрерывный сток в течение года.

3. Оценки максимальных расходов воды, продолжительность стояния которых составляет не менее 5 дней. Эти расходы воды предназначены для поддержания морфологии русла и экосистемы речной поймы.

В качестве составляющих экологического стока рек были приняты следующие значения суточных расходов воды:

- объем стока, обеспечивающий жизнь донной фауны — $Q_{95\%}$ или Q_{350} (суточные расходы воды продолжительностью стояния 350 дней);
- величина низкого стока — $Q_{75\%}$ или Q_{270} ;
- максимальные расходы воды продолжительностью стояния не менее 5 дней — $Q_{8\%}$ или Q_{30} .

Указанные компоненты для р. Алиджанчай (п. Каябаши) составляют соответственно 1,11; 2,60 и 8,90 м³/с (рис. 2), а годовой объем экологического стока, рассчитанный с учетом этих значений — 48,2 млн м³ (27,7 %) (табл. 5).

Значения экологического стока р. Алиджанчай, рассчитанные разными методами, и их отношения к среднегодовому годовому стоку приведены в табл. 5. Полученные величины экологического стока рек изменяются от 10,0 до 32,9 % от величины среднегодового стока. Следует отметить, что в соглашении между Россией и Азербайджаном о распределении трансграничных вод р. Самур величина экологического стока была согласована на уровне 30,5 % [9].

Таблица 5

Значения экологического стока реки, рассчитанные различными методами

The value of the ecological flow of the river, calculated by different methods

Метод	Объем экологического стока, млн м ³	%	
Метод Монтана	37,0	21,2	
Метод 7Q10	39,7	22,8	
Метод Q95 %	35,0	20,1	
Метод Фащевского	17,3	10,0	
Метод Иманова	По 1-ому варианту	37,2	21,5
	По 2-ому варианту	57,0	32,9
Метод Кура I	32,4	18,6	
Метод Кура II	48,2	27,7	

Выводы

Значения экологического стока р. Алиджанчай, рассчитанные гидрологическими методами, изменяются от 10,0 до 32,9 % в зависимости от величины среднесуточного стока. По использованному холистическому методу эта цифра составляет 27,7 %. Представляется, что при выборе расчетного значения экологического стока рассмотренной реки, предпочтение следует отдавать холистическому методу, так как в течение последних 40 лет в международной практике такой подход считается наиболее эффективным [10].

Список литературы

1. Барабанова Е.А. Глобально-региональные особенности регулирования стока рек под влиянием водохранилищ (по косвенным методам) // Вопросы географии. 2012. С. 297—311.
2. Рустамов С.Г., Кашкай Р.М. Водный баланс Азербайджанской ССР. Баку: Элм, 1978. 110 с.
3. Авакян А.Б. Водохранилища — новые географические объекты XX века // Труды Академии водохозяйственных наук. 1998. Вып. 5. С. 6—15.
4. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive // European Commission Guidance Document. 2015. № 31.
5. Ozdemir A. D., Karaca O., Erkus M. K. Low flow calculation to maintain ecological balance in streams // River basin management: International Congress. Turkey, Antalya, 2007. Vol. 1. P. 402—412.
6. Фащевский Б.В. Основы экологической гидрологии. Минск: Эковест, 1996. 240 с.
7. Иманов Ф.А. Минимальный сток рек Кавказа. Баку: Нафта-пресс, 2000. 298 с.
8. Иманов Ф.А., Раджабов Р.Ф., Нуриев А.А. Метод определения экологического стока рек Азербайджана // Водное хозяйство России. 2017. № 5. С. 90—101.
9. Справка о результатах проработок по установлению экологического попуска по реке Самур // Западно-Каспийское бассейновое водное управление. Министерство Природных ресурсов РФ. Махачкала, 2001. 4 с.
10. USAID 2017. The assessment of environmental flow for the rivers and streams of Georgia. Usaid governing for growth (g4g) in Georgia. Contract number: aid-114-c-14-00007.

References

1. Barabanova E.A. Global-regional peculiarities of stream regulation under the influence of reservoirs (by indirect methods). *Voprosi geografii*. Questions of geography. 2012: 297—311. [In Russian].
2. Rustamov S.G., Kashkai R.M. *Vodnyy balans Azerbaydzhanskoy SSR*. Water balance of the Azerbaijan SSR. Baku: Elm, 1978: 110 p. [In Russian].
3. Avakyan A.B. Reservoir — new geographical objects of the XX century. *Trudi Akademii vodokhozyaystvennikh nauk*. Proceedings of the Academy of Water Science. 1998, 5: 6—15. [In Russian].
4. Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. European Commission Guidance Document. 2015, 31.
5. Ozdemir A. D., Karaca O., Erkus M. K. Low flow calculation to maintain ecological balance in streams. River basin management: International Congress. Turkey, Antalya, 2007, 1: 402—412.
6. Fashevskiy B.V. *Osnovy ekologicheskoy gidrologii*. Fundamentals of ecological hydrology. Minsk: Ecoinvest. 1996: 240 p. [in Russian].
7. Imanov F.A. *Minimal'nyy stok rek Kavkaza*. Minimal flow of the Caucasus. Baku: Publishing House Nafta-Press, 2000: 298 p. [in Russian].
8. Imanov F.A., Rajabov R.F., Nuriyev A.A. Method of determination of ecological stock of the river of Azerbaijan. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. Water industry in Russia. 2017. 5: 90—101. [In Russian].
9. Information on the results of studies to establish an ecological release on the Samur River. *Zapadno-Kaspiyskoe basseynovoe vodnoe upravlenie. Ministerstvo Prirodnix resursov RF*. West Caspian Basin Water Administration. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation. Makhachkala, 2001: 4 p. [In Russian].

10. USAID 2017. The assessment of environmental flow for the rivers and streams of Georgia. Usaid governing for growth (g4g) in Georgia. Contract number: aid-114-c-14-00007.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 07.01.2022

Принята в печать 22.02.2022

Сведения об авторах

Иманов Фарда Али оглы — д-р геогр. наук, профессор, проректор по организации учебного процесса и технологиям обучения, Бакинский Государственный Университет.

Алиева Ирада Сабир гызы — канд. геогр. наук, доцент кафедры гидрометеорологии, Бакинский Государственный Университет.

Нурйев Анар Атахан оглы — преподаватель кафедры гидрометеорологии, Бакинский Государственный Университет.

Нагиев Захид Аббасгулу оглы — начальник отдела водоснабжения, канализации и гидротехнических сооружений, Научно-исследовательский и проектный институт «Суканал», ОАО «Азерсу».

Information about the authors

Imanov Farda Ali — Grand PhD (Geogr. Sci.), Professor, Vice-rector on educational process and teaching technologies, Baku State University

Aliyeva Irada Sabir — PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor of the Department of Hydrometeorology, Baku State University

Nuriyev Anar Atakhan — Lecturer of the Department of Hydrometeorology, Baku State University.

Nagiyev Zahid Abbasgulu — Head of Department of water supply, sewerage system and hydraulic engineering constructions, “Sukanal” Scientific-Research and Design Institute, “Azersu” JSC.

УДК 551.465.7:551.513.22:[551.510.41:546.264-311] doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70

**О межгодовой изменчивости
наиболее интенсивных очагов источников и стока CO₂
в океане на основе данных наблюдений**

В.Н. Малинин¹, П.А. Вайновский²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, malinin@rshu.ru

² ООО «Прогноз», Санкт-Петербург

В статье выполнен статистический анализ межгодовой изменчивости потока CO₂ в наиболее интенсивных очагах его выделения (область Эль-Ниньо — Южное колебание, ЭНЮК) и поглощения (севернее 36° Северная Атлантика) в океане на основе данных наблюдений за период 1983—2016 гг. Показано, что усредненный по области ЭНЮК поток CO₂ во время Эль-Ниньо резко усиливается, а во время Ла-Нинья также резко ослабевает. В Северной Атлантике абсолютный максимум поглощения CO₂ океаном отмечается на широте 60° с.ш. вблизи побережья Гренландии. Выявлен вклад температуры воды и климатических индексов на изменчивость потока CO₂. Установлено наличие отрицательной значимой связи между потоками CO₂ в ЭНЮК и Северной Атлантике.

Ключевые слова: Северная Атлантика, ЭНЮК, поток CO₂, межгодовая изменчивость, тренды.

**On the interannual variability of the most intense sources and
sinks of CO₂ in the ocean based on observational data**

V.N. Malinin¹, P.A. Vainovsky²

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

² LLC “Prognoz”, Saint Petersburg, Russia

The article presents the statistical analysis of the interannual variability of the CO₂ flux in the most intense sources of its release (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) and absorption (water area north of 36° North Atlantic) in the ocean based on observational data for 1983—2016. For this purpose, the Global Surface pCO₂ Database V2016 at Lamont–Doherty Earth Observatory (LDEO) database was used. The maximum estimates of CO₂ emissions into the atmosphere are observed near the coast of South America. Averaged over the ENSO region, the CO_{2,av} flux has a significant positive trend and a high correlation with the ENSO indices. Therefore, during El Niño, it sharply increases, during La Niña, also sharply weakening. This made it possible to build a regression model based on the easily determined indices of MEI, N₃₊₄, N₁₊₂, allowing to calculate the flux of CO_{2,av} released into the atmosphere with high accuracy. In the North Atlantic, the absolute maximum absorption of CO₂ by the ocean is at a latitude of 60° N off the coast of Greenland, its maximum trend being observed in the Labrador Sea. The contribution of water temperature and climatic indices to the variability of the CO₂ flux is revealed. A negative significant relationship has been established between the CO₂ fluxes in the ENSO and the North Atlantic, which is associated with the presence of trends. Their comparison showed that the rate of CO₂ uptake in the North Atlantic is 2 times faster than the release of CO₂ into the atmosphere in the ENSO region. It is quite obvious that the sources and sinks of CO₂ through the

ocean surface considered in this paper are primarily due to regional processes of interaction between the ocean and the atmosphere.

Keywords: North Atlantic, ENSO, CO₂ flux, interannual variability, trends.

For citation: *V.N. Malinin, P.A. Vainovsky.* On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO₂ in the ocean based on observational data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2022, 66: 57—70. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70

Введение

Углеродный цикл — это глобальный круговорот потоков CO₂, метана и других малых углеродосодержащих газов в климатической системе Земли. Он имеет исключительное значение в понимании проблем, связанных с современным изменением климата, которое выражается в виде глобального потепления и обычно характеризуется трендом годовых значений осредненной для земного шара температуры воздуха. Главная причина современного потепления, по мнению экспертов МГЭИК [1], — это усиление парникового эффекта (ПЭ) вследствие экспоненциального роста выбросов в атмосферу CO₂ за счет деятельности человека. Действительно, концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась примерно с 277 частей на миллион (ppm) в 1750 г. [2], который принимается за начало индустриальной эры, до 410 ppm в 2019 г. [3], т. е. возросла почти в 1,5 раза.

В общем случае уравнение глобального баланса CO₂ можно записать как:

$$E_{FOS} + E_{LUC} = G_{ATM} + S_{OCEAN} + S_{LAND} + B_{IM} \quad (1)$$

где члены уравнения слева означают эмиссию CO₂ в атмосферу за счет сжигания топлива (E_{FOS}) и изменений в землепользовании (E_{LUC}); G_{ATM} — накопление CO₂ в атмосфере; S_{OCEAN} и S_{LAND} — результирующий обмен CO₂ с атмосферой Мирового океана и биоты суши; B_{IM} — суммарная невязка расчетов компонент баланса. Подробные обзоры глобального углеродного баланса даются ежегодно, начиная с 2013 г. Последний обзор опубликован в 2021 г. [4]. Относительно надежные оценки отдельных компонент баланса CO₂ известны с 1960 г. В табл. 1 приводятся оценки глобальных источников и стоков CO₂ для периода 1960—2019 гг. в млрд т С/год (1 млрд т С·год⁻¹ = Пг С·год⁻¹ = 10¹⁵ г С·год⁻¹ ≈ 0,25 моль С·м⁻²·год⁻¹) по данным [5].

Таблица 1

Изменчивость глобальных источников и стоков потока CO₂ для периода 1960—2019 гг. в млрд т С/год по данным [5]

Variability of global sources and sinks of CO₂ flux for the period 1960—2019 in billion t C/year according to [5]

Источники	1960—69	1970—79	1980—89	1990—99	2000—09	2008—17	2019
Сжигание ископаемого топлива	3,0	4,7	5,4	6,3	7,7	9,4	9,7
Изменения в землепользовании	1,5	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,8
Суммарная эмиссия	4,5	5,9	6,7	7,6	9,1	10,9	11,5
Накопление в атмосфере	1,8	2,8	3,4	3,2	4,1	5,1	5,4
Поглощение океаном	1,0	1,3	1,7	2,0	2,1	2,5	2,6
Поглощение суши	1,3	2,1	2,0	2,6	2,9	3,4	3,1
Невязка	0,5	-0,2	-0,4	-0,1	0	-0,1	0,3

Как видно из табл. 1, в 1960-е гг. накопление CO_2 в атмосфере при суммарной эмиссии равной 4,5 млрд т С/год составляло всего лишь 1,8 млрд т С/год. В дальнейшем происходил быстрый рост содержания CO_2 , прежде всего, за счет сжигания ископаемого топлива, вследствие чего оно увеличилось в 3 раза. При этом изменения в землепользовании остались практически на уровне 60-х годов. В результате относительный рост CO_2 в атмосфере $G_{\text{АТМ}} / (E_{\text{FOS}} + E_{\text{LUC}})$ повышался более медленными темпами. Одновременно с увеличением суммарной эмиссии происходило повышение поглощения CO_2 Мировым океаном (МО) и биотой суши (БС). Так, за рассматриваемый период поглощение CO_2 БС повысилось почти в 3 раза, а поглощение CO_2 океаном — в 2,5 раза. Отсюда следует, что МО и БС ослабляют рост CO_2 в атмосфере и в определенной степени служат стабилизатором ПЭ в климатической системе.

Но если рост поглощения CO_2 биотой суши понятен и прозрачен, поскольку он связан с заметным усилением процесса фотосинтеза, то повышение поглощения CO_2 океаном в работе [5] не объясняется. Известно, что рост температуры поверхности океана и его теплосодержания хорошо выражен [6, 7], а в этом случае поглощение CO_2 должно уменьшаться.

Отметим, что БС и МО являются не только стоками, но также источниками потоков CO_2 для атмосферы. Результирующий поток углерода между атмосферой и наземными экосистемами определяется фотосинтезом за вычетом дыхания растений (автотрофного дыхания), выделения в атмосферу CO_2 при разложении органического вещества и при природных пожарах [8].

Поток углекислого газа (на единицу площади) из атмосферы в океан описывается законом Генри:

$$f_o = k\text{CO}_2 \alpha (p\text{CO}_{2,a} - p\text{CO}_{2,o}), \quad (2)$$

где $k\text{CO}_2$ — коэффициент обмена, который зависит от скорости ветра в приводном слое и характеристик устойчивости этого слоя, α — растворимость CO_2 в морской воде, $p\text{CO}_{2,o}$ и $p\text{CO}_{2,a}$ — парциальное давление CO_2 в воде и в воздухе соответственно. Парциальное давление CO_2 в воздухе ($p\text{CO}_{2,a}$) в соответствии с уравнением состояния идеального газа линейно связано с содержанием CO_2 в атмосфере. Таким образом, повышение концентрации CO_2 в атмосфере приводит к поглощению его океаном, а уменьшение — к выделению углекислого газа из океана. Растворимость CO_2 в морской воде уменьшается при увеличении температуры.

Согласно (2) поглощение углекислого газа морской водой происходит в регионах, где $p\text{CO}_{2,o} < p\text{CO}_{2,a}$. Это происходит при переносе морской воды от поверхности океана вглубь, например, в средних широтах Северного и Южного полушарий, а также в регионе Атлантики к югу от Гренландии. Углекислый газ выделяется из океана в атмосферу в регионах, где восходящие течения выносят из глубины на поверхность богатую CO_2 морскую воду в тропиках, в Южном океане и на северо-западе Тихого океана [8].

В работах [9, 10] показано, что зонально-осредненный поток CO_2 направлен в атмосферу в приэкваториальных широтах (18° ю.ш. — 14° с.ш.), с максимальными значениями вблизи 8° ю.ш. В средних и высоких широтах результирующий поток CO_2 направлен в океан. Наибольшее значение поглощения потока CO_2

в Южном полушарии отмечается в зоне $38\text{--}42^\circ$ ю.ш., а в Северном полушарии он достигает абсолютного максимума в широтном поясе $66\text{--}70^\circ$ с.ш., т. е. вблизи границы Северной полярной области. По разным оценкам МО выделяет в атмосферу 78 [8] — 90 [11] ПгС год^{-1} , а поглощает 80 [8] — 92 ПгС год^{-1} [11].

На рис. 1 приводится пространственное распределение результирующего среднесноголетнего годового потока CO_2 между океаном и атмосферой за период $1982\text{--}2007$ гг. [12]. Данная карта стала итогом гигантской работы группы исследователей, обработавших многомиллионные серии измерений $p\text{CO}_2$. Как видно из рис. 1, самый мощный очаг выделения CO_2 в атмосферу приурочен к области действия явления Эль-Ниньо, а более мелкие локальные очаги находятся в северо-западной части Аравийского моря и в районе южнее экватора в Атлантическом океане, примыкающим к побережью Бразилии. Как и следовало ожидать, значительно более обширными являются очаги поглощения CO_2 . Максимальный очаг приурочен к умеренным и высоким широтам Северной Атлантики (севернее 40°). Другие очаги поглощения CO_2 концентрируются вдоль 40° южного полушария и северной части Тихого океана.

В дальнейшем подобные карты строились неоднократно, но все они принципиально не отличаются от карты на рис. 1. На рис. 2 представлена карта среднесноголетнего годового потока CO_2 для МО за $2011\text{--}2020$ гг. [4]. Нетрудно видеть, что заметно расширились и усилились очаги выделения CO_2 в атмосферу, в частности в Атлантике. Одновременно существенно увеличился очаг поглощения CO_2 в Северной Атлантике, но несколько ослаб очаг в северной части Тихого

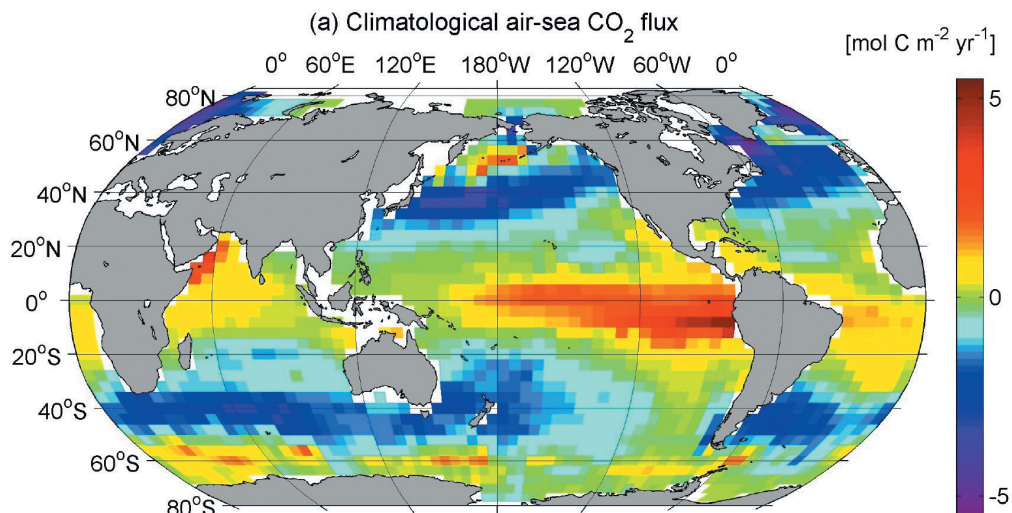


Рис. 1. Результирующий среднесноголетний поток CO_2 между океаном и атмосферой за период $1982\text{--}2007$ гг. в моль $\text{C m}^{-2} \text{год}^{-1}$ [12].

Fig. 1. The resulting average long-term CO_2 flux between the ocean and the atmosphere for the period $1982\text{--}2007$ in $\text{mol C m}^{-2} \text{year}^{-1}$ [12].

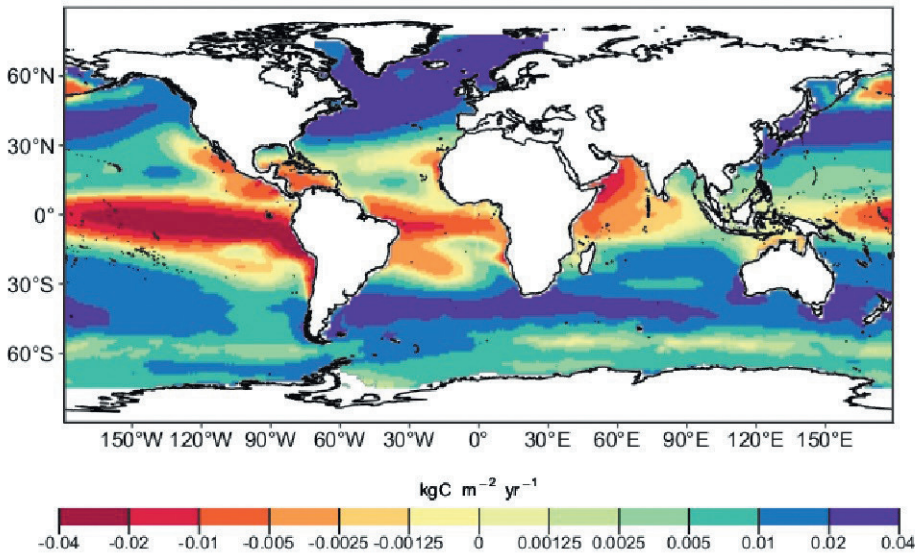


Рис. 2. Результирующий среднемноголетний поток CO₂ между океаном и атмосферой за период 2011—2020 гг. в кг C м⁻² год⁻¹ [4]. Положительные потоки CO₂ означают поглощение их океаном.

Fig. 2. The resulting average long-term CO₂ flux between the ocean and the atmosphere for the period 2011—2020 in kg C m⁻² year⁻¹ [4]. Positive CO₂ fluxes means their absorption by the ocean.

океана. Очевидно, повышение потока CO₂ в атмосферу связано с общим потеплением поверхности океана. Цель данной работы состоит в анализе межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов выделения (район Эль-Ниньо — Южное колебание, ЭНЮК) и поглощения (севернее 40° CA) CO₂ в океане на основе данных наблюдений.

Материалы и методы

В настоящее время главным источником данных о $p\text{CO}_2$ является глобальный проект SOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas), который объединил в едином формате все общедоступные данные о $p\text{CO}_2$ для МО. Это позволило потребителям получать среднемесячные значения $p\text{CO}_2$ поверхностных вод океана на сетке 1°×1° без временной или пространственной интерполяции. Первая версия SOCAT была опубликована в 2011 г., последняя — в 2021 г., которая включает 30,6 млн измерений $p\text{CO}_2$ у поверхности океана с контролем качества с 1957 по 2020 г., а также откалиброванные данные датчиков. Подробная документация проекта SOCAT представлена в работе [13]. Составной частью SOCAT стала база данных Global Surface $p\text{CO}_2$ Database V2016 at Lamont–Doherty Earth Observatory (LDEO), созданная Taro Takahashi, которая к 2010 г. содержала до 3 млн измерений $p\text{CO}_2$ [14]. На основе этих данных группа исследователей осуществила расчет потоков CO₂

в узлах географической сетки с пространственным разрешением 4° широты \times 5° долготы за 1982—2007 гг. [15]. В данной работе использована именно эта база [14] за период 1983—2016 гг., поскольку пространственное разрешение 4° широты \times 5° долготы более рационально с точки зрения изучения крупномасштабной изменчивости потоков CO_2 .

Дополнительно в работе использовалась следующая информация:

— характеристики температуры воздуха (ТВ) и температуры поверхности океана (ТПО) были взяты из архива NCEP—DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) [16], который охватывает спутниковый период наблюдений с 1979 г. по настоящее время с пространственным разрешением $1,9^\circ$ по широте и долготе;

— N_{3+4} — ТПО в районе, ограниченном 5° с.ш. — 5° ю.ш. и 120° з.д. — 170° з.д.;

— N_{1+2} — ТПО в районе, ограниченном 0 — 10° ю.ш. и 80° з.д. — 90° з.д.;

— SOI (South Oscillation Index) — индекс южного колебания, который рассчитывается как разность атмосферного давления между о. Таити и г. Дарвин на севере Австралии;

— MEI (multivariate ENSO index) — комплексный индекс, представляющий 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.;

— API (atmospheric pressure index) — индекс силы экваториальной депрессии в Тихом океане, определяемый как аномалии атмосферного давления в регионе 5° с.ш. — 5° ю.ш., 35° в.д. — 25° з.д. [32];

— PDO (Pacific decadal oscillation) — индекс, характеризующий долгопериодную изменчивость ТПО в северной части Тихого океана;

— АМО (Атлантическая мультидекадная осцилляция) представляет долгопериодное изменение температуры поверхности в Северной части Атлантического океана (0 — 70° с.ш.);

— САК (Североатлантическое колебание) представляет собой разность атмосферного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом;

— АО (арктическая осцилляция) определяется как первая мода разложения на естественные ортогональные функции давления на уровне моря в Северном полушарии (20 — 90° с.ш.);

— W, C, E — формы атмосферной циркуляции Вангейгейма—Гирса для Атлантико-евразийского сектора северного полушария.

Особенности межгодовой изменчивости потока CO_2 в области ЭНЮК

Область ЭНЮК является уникальным гидрометеорологическим объектом. Она представляет собой самую крупную и наиболее мощную энергоактивную зону МО, которая имеет исключительно важное влияние на формирование долгопериодных колебаний погоды и короткопериодные колебания климата. Посредством атмосферных дальних связей ЭНЮК может в значительной степени влиять

на климатическую изменчивость во всем мире [17]. Подробный анализ дальних связей ЭНЮК с климатическими процессами за его пределами обсуждается в работе [18]. Однако эти связи абсолютно не касаются выделяемого океаном потока CO_2 в атмосферу, изучение колебаний которого практически не выходит за пределы данного региона. Можно назвать лишь работы [19, 20, 21], в которых рассматривается влияние фаз PDO (потепления / похолодания ТПО северной части Тихого океана) на изменчивость потока CO_2 . В работе [19] показано, что в междесятилетних колебаниях потока CO_2 ключевую роль играет скорость ветра, а влияние $\Delta p\text{CO}_2$ незначительно. В среднем за год с акватории ЭНЮК поток CO_2 в атмосферу составляет 0,44—0,52 Пг $\text{C}\cdot\text{год}^{-1}$ [22, 23]. При этом его вклад в межгодовую изменчивость суммарного потока CO_2 в атмосферу с поверхности МО достигает 70 % [24, 25 и др.]. Отметим, что до настоящего времени сохраняются существенные неопределенности, особенно в междесятилетних вариациях потока CO_2 , из-за ограниченного временного диапазона наблюдаемых данных и недостаточной надежности биогеохимических моделей [23, 24, 26].

На рис. 3 приводится распределение годовых значений потока CO_2 в атмосферу в пределах тропической зоны Тихого океана за период 1983—2016 гг. Нетрудно видеть, что очаг наибольших значений потока CO_2 вытянут от 170° з.д. к побережью Америки с небольшим наклоном к югу. При этом очаг имеет ячеистую структуру и состоит из 4 районов. Максимальные оценки потока CO_2 отмечаются в двух восточных районах. В каждом из районов были выделены центры с наибольшим потоком CO_2 и для них рассчитаны статистические характеристики, которые представлены в табл. 2.

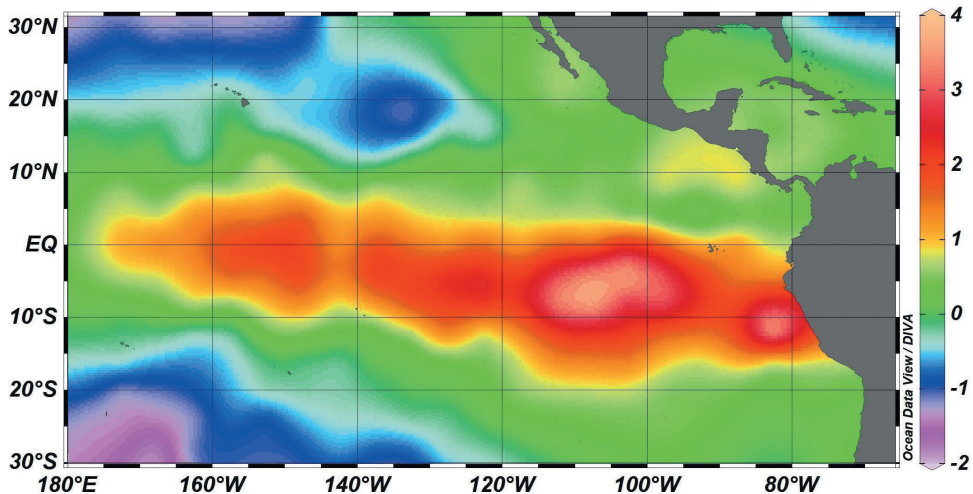


Рис. 3. Пространственное распределение среднееголетнего потока CO_2 в атмосферу с акватории океана в области ЭНЮК за период 1983—2016 гг. в $\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$.

Fig. 3. Spatial distribution of the average long-term CO_2 flux into the atmosphere from the ocean in ENSO for the period 1983—2016 in $\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$.

Распределение статистических характеристик временных рядов с наибольшим потоком CO_2 в центрах районов на рис. 2 ($X_{\text{ср}}$ — среднее арифметическое, СКО — среднее квадратическое отклонение, Tr — оценка тренда, R^2 — оценка вклада в дисперсию исходных рядов) и коэффициентов корреляции между годовым значениями (нижний треугольник) и среднемесячными значениями (верхний треугольник)

The distribution of statistical characteristics of time series with the highest CO_2 flux in the centers of regions in Fig. 2 ($X_{\text{ср}}$ — mean, СКО — standard deviation, Tr — trend estimate, R^2 — estimate of the contribution to the variance of the original series) and correlation coefficients between annual values (lower triangle) and monthly average values (upper triangle)

Координаты	$X_{\text{ср}}$	СКО	Tr , моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}^2$	R^2	Коэффициенты корреляции			
4 с.ш., 147 з.д.	2,26	0,41	0	0	1	0,75	0,39	0,04
4 с.ш., 127 з.д.	2,75	0,38	0,61	0,05	0,66	1	0,68	0,01
8 с.ш., 107 з.д.	5,44	0,67	1,32	0,48	0,38	0,75	1	0,07
12 с.ш., 82 з.д.	5,46	0,58	0,63	0,24	0,60	0,69	0,73	1
ЭНЮК	2,10	0,22	0,34	0,19	0,81	0,86	0,82	0,87

Как видно из табл. 2, поток CO_2 в двух восточных районах в 2 раза больше, чем в западных. Межгодовая изменчивость в них тоже существенно выше. Значимые положительные тренды отмечаются только в восточных районах. Поскольку в восточной части ЭНЮК потоки CO_2 значительно отличаются от его левой части, то область ЭНЮК можно вполне объективно разделить на два квазиоднородных региона. Если же рассматривать степень статистической связности между районами, то здесь ситуация иная. Корреляция между всеми районами для годовых значений потока CO_2 , исключая ее между первым и третьим районами, довольно высокая и примерно одинаковая, причем с потоком CO_2 , осредненным для всей области ЭНЮК, она еще выше ($r > 0,80$). Это означает, что осредненный поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ довольно точно характеризует межгодовую изменчивость каждого из выделенных районов. Кроме того, потоку $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ свойствен значимый положительный тренд, формирующийся в восточной части ЭНЮК.

В ряде работ показано, что между выделяемым в атмосферу потоком CO_2 и ТПО в области ЭНЮК отмечается положительная корреляция (15, 19, 27 и др.]. На рис. 4 приводится межгодовой ход стандартизированных (безразмерных) значений $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ и индекса N_{3+4} , характеризующего ТПО между 120° з.д. — 170° з.д. Корреляция между $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ и N_{3+4} действительно довольно высокая ($r = 0,74$). С повышением ТПО поток CO_2 в атмосферу увеличивается. Важно, что практически все экстремумы обоих временных рядов почти совпадают. Это означает, что во время Эль-Ниньо поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ резко усиливается, а во время Ла Нинья также резко ослабевает. Различие между этими временными рядами состоит в том, что в N_{3+4} тренд отсутствует, а в $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ он есть.

Отметим, что был выполнен корреляционный анализ потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ с другими индексами ЭНЮК, а также с параметрами тепло и влагообмена в системе океан—атмосфера в зоне 20° с.ш. — 20° ю.ш. Тихого океана, заимствованными из работы [28]. Максимальная корреляция отмечается с индексом MEI ($r = 0,81$). Впрочем,

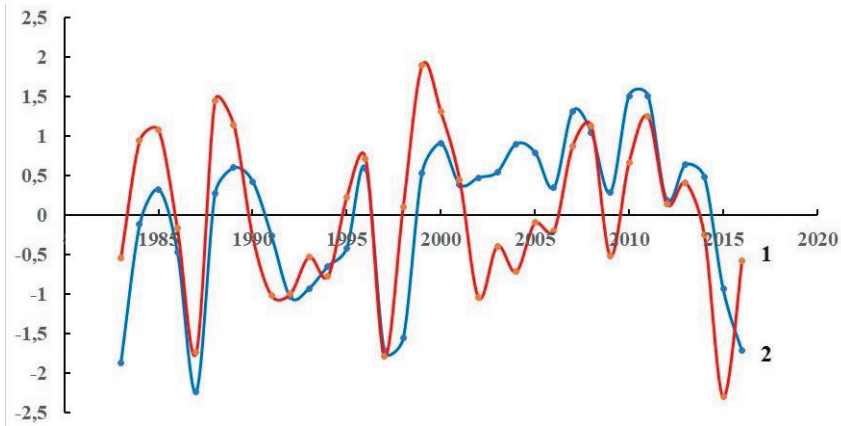


Рис. 4. Межгодовой ход стандартизированных значений ТПО в районе N_{3+4} (1) и потока $CO_{2, \text{опр}}$ в атмосферу (2).

Fig. 4. Interannual variation of standardized SST values in the region N_{3+4} (1) and $CO_{2, \text{опр}}$ to the atmosphere (2).

это понятно, поскольку он включает 6 основных параметров взаимодействия между океаном и атмосферой, в том числе скорость ветра в приводном слое, который напрямую используется для расчета потока CO_2 . Значимая корреляция ($r > 0,70$) имеет место для индексов SOI, N_{1+2} , а также для индекса PDO. Корреляция с параметрами зоны 20° с.ш. — 20° ю.ш. выявила значимую статистическую связь для ТПО, ТВ и ВА. Исходя из полученных результатов, был выполнен расчет пошаговой регрессионной модели методом включения с указанными выше параметрами. Уже на втором шаге $R^2 = 0,75$, на третьем $R^2 = 0,82$. На четвертом шаге увеличение R^2 идет на 0,01, а включаемая переменная становится незначимой по критерию Стьюдента. На наш взгляд, оптимальная модель регрессии может быть принята уже на втором-третьем шаге, т. е.

$$CO_{2, \text{опр}} = 5,22 + 1,50 \text{ MEI} - 0,78 N_{3+4},$$

$$CO_{2, \text{опр}} = 3,54 + 1,30 \text{ MEI} - 0,79 N_{3+4} + 0,34 N_{3+4}.$$

Стандартная ошибка оценки потока $CO_{2, \text{опр}}$ в долях СКО соответственно равна 0,44 и 0,36, т. е. является малой. Итак, по довольно легко определяемым индексам ЭНЮК можно с достаточной для практических целей точностью рассчитать выделяемый в атмосферу поток CO_2 .

Особенности межгодовой изменчивости потока CO_2 в акватории Северной Атлантики

Как было указано выше, акватория СА (севернее 36°) является самым интенсивным очагом стока CO_2 в океане, причем максимальные оценка поглощения CO_2 отмечаются в Гренландском, Норвежском морях и море Лабрадор. Межгодовая изменчивость потока CO_2 в пределах СА обсуждалась в ряде работ [15, 29—31],

причем наиболее подробно в работе авторов [32]. Обратимся к рис. 5, на котором дается карта среднемноголетнего годового результирующего потока CO_2 в СА за 1983—2016 гг. Нетрудно видеть, что выделяются два обширных очага максимальных значений поглощения океаном потока CO_2 . Первый — это Норвежское и Гренландское моря, на границе которых, севернее о. Ян-Майен, он превышает $5,2$ моль $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{год}$. Другой очаг — это море Лабрадор. Максимальные оценки потока CO_2 здесь отмечаются на широте 60° с.ш. вблизи южного побережья Гренландии, где они превышают 6 моль $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{год}$. Величина среднемноголетнего потока CO_2 в этом море и его межгодовая изменчивость выше, чем в Норвежском и Гренландском морях (табл. 3).

Обращают на себя внимание малые оценки поглощения CO_2 в море Ирмингера. Дополнительный анализ межгодовых колебаний потока CO_2 для этого моря показал знакопеременный характер газообмена. В течение 1983—1995 гг. отмечался поток CO_2 , направленный в атмосферу. Затем вплоть по 2014 г. включительно осуществлялось достаточно интенсивное поглощение его океаном. В последние два года (2015 и 2016 гг.) поток CO_2 опять был направлен вверх.

Как видно из табл. 3, наименьшая межгодовая изменчивость потока CO_2 , свойственна Норвежскому морю. В Гренландском море тренд отсутствует, т. е. межгодовые колебания потока CO_2 носят преимущественно случайный характер. Это связано с тем, что происходит компенсация положительных и отрицательных

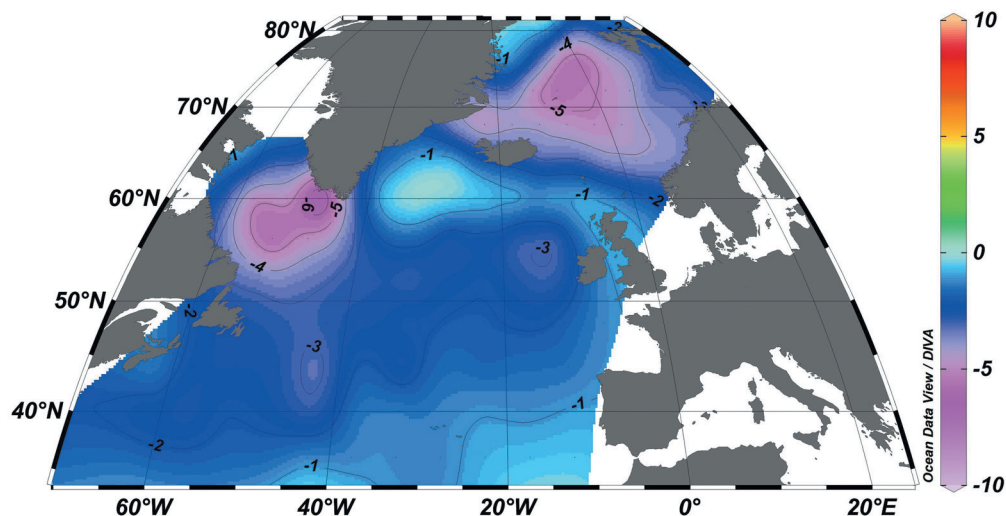


Рис. 5. Пространственное распределение среднемноголетнего годового результирующего потока CO_2 на акватории Северной Атлантики за 1983—2016 гг. в моль $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{год}$.

Знак минус означает поглощение потока CO_2 океаном.

Fig. 5. Spatial distribution of the mean long-term annual net CO_2 flux in the waters of the North Atlantic for 1983—2016 in $\text{mol C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$.

The minus sign means the sink of the CO_2 flux by the ocean.

трендов, свойственных разным районам моря. Отметим, что наибольшая корреляция между потоками CO_2 имеет место между морями Лабрадор и Ирмингера ($r = 0,72$). Для осредненного потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ характерна тесная связь с Норвежским морем ($r = 0,81$) и морем Ирмингера ($r = 0,79$) и ее полное отсутствие с Гренландским морем ($r = 0,14$).

Таблица 3

Оценки статистических характеристик результирующего потока CO_2 и температуры поверхности воды осредненные по акватории морей Северной Атлантики за 1983—2016 гг.

Estimates of the statistical characteristics of the resulting CO_2 flux and water surface temperature averaged over the water area of the North Atlantic seas for 1983—2016.

CO_2 , море	Хср, моль $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{год}$	СКО, моль $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{год}$	Tr , моль $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{год}^2$	R^2
Норвежское	-3,30	0,32	-0,0233	0,52
Гренландское	-3,07	0,44	0,0034	0,00
Лабрадор	-3,80	0,58	-0,0319	0,30
Ирмингера	-0,43	0,84	-0,0490	0,35
Северная Атлантика (36–80°)	-2,50	0,50	-0,0131	0,43

Обратимся к табл. 4, в которой приводятся оценки коэффициентов корреляции ряда гидрометеорологических параметров с потоками CO_2 для рассматриваемых морей. Наибольшее влияние температуры воды на изменчивость потока CO_2 имеет место в море Лабрадор ($r = -0,86$), наименьшее — в Гренландском

Таблица 4

Оценки выборочных коэффициентов корреляции потоков CO_2 в разных морях с гидрометеорологическими параметрами за 1983—2016 гг. [32] (курсивом отмечены значимые коэффициенты корреляции при уровне значимости $\alpha = 0,05$, превышающие $r_{кр} = 0,33$)

Estimates of sample correlation coefficients of CO_2 fluxes in different seas with hydrometeorological parameters for 1983—2016 [32] (significant correlation coefficients are marked in italics at a significance level of $\alpha = 0.05$, exceeding $r_{cr} = 0.33$)

Параметр	Результирующий поток CO_2 через поверхность воды				
	Норвежское море	Гренландское море	Море Лабрадор	Море Ирмингера	Северная Атлантика
Температура поверхности воды моря (акватории СА)	<i>-0,74</i>	<i>-0,51</i>	<i>-0,86</i>	<i>-0,79</i>	<i>-0,63</i>
Атлантическая мультидекадная осцилляция	<i>-0,72</i>	<i>-0,06</i>	<i>-0,42</i>	<i>-0,68</i>	<i>-0,58</i>
Арктическое колебание	-0,19	-0,32	0,32	0,31	0,04
Североатлантическое колебание	0,05	<i>-0,41</i>	<i>0,46</i>	<i>0,62</i>	0,22
Температура воздуха Арктики	<i>-0,69</i>	0,10	<i>-0,63</i>	<i>-0,53</i>	<i>-0,61</i>
Форма циркуляции W	<i>-0,57</i>	0,03	<i>-0,30</i>	<i>-0,31</i>	<i>-0,46</i>
Форма циркуляции С	<i>0,65</i>	<i>-0,02</i>	<i>0,35</i>	<i>-0,13</i>	<i>-0,22</i>
Давление в Исландском минимуме	0,10	0,33	<i>-0,32</i>	<i>-0,35</i>	<i>-0,02</i>

море ($r = -0,51$). Скорее всего, это связано с более значительной пространственной неоднородностью в распределении температуры воды, обусловленной соседством холодного Восточно-Гренландского течения и сравнительно теплых Западно-Исландского и Западно-Шпицбергенского течений, наличием циклонического круговорота вод и многочисленных фронтальных зон. Именно в этих морях за счет глубокой конвекции формируются холодные глубинные воды, которые распространяются в Южную Атлантику, т. е. дают начало глобальному конвейеру Брокера [33]. При этом очаги повышенного поглощения CO_2 в Гренландском море и особенно в море Лабрадор совпадают с зонами мощной осенне-зимней конвекции. Поскольку изменчивость температуры воды рассматривается в качестве показателя интенсивности глубокой конвекции [34], то это означает, что может отмечаться соответствие аномалий потока CO_2 и аномалий количества формирующейся глубинной водной массы в этих морях.

Помимо ТПО определенное влияние на поток CO_2 оказывают и другие гидрометеорологические процессы и параметры. Увеличение поглощения CO_2 в Норвежском море сопровождается ослаблением АМО, уменьшением температуры воздуха в Арктике, ослаблением атмосферной зональной циркуляции формы W и усилением меридиональной циркуляции формы C. Увеличение поглощения CO_2 в море Ирмингера происходит при усилении САК и ослаблении АМО. Значительно хуже связан с климатическими индексами поток CO_2 в Гренландском море. Так, при ослаблении САК происходит некоторое увеличение поглощения потока CO_2 в Гренландском море.

Дальние связи между ЭНЮК и Северной Атлантикой

Подробно дальние связи ЭНЮК с гидрометеорологическими процессами в СА обсуждаются в работе [18]. Несмотря на достаточно обширное число публикаций, посвященных этим дальним связям, в ряде работ приводятся свидетельства, что они оказываются довольно слабыми и во многих случаях сопоставимы с климатическим шумом [35, 36 и др.]. Возможно, поэтому И.В. Серых [18] обозначает эти связи как «кажущееся влияние ЭНЮК на Северную Атлантику». В настоящей работе на основе имеющихся данных была осуществлена проверка наличия статистически значимых связей между рассматриваемыми регионами. На рис. 6 представлен межгодовой ход результирующих потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в ЭНЮК и СА. Нетрудно видеть наличие между ними явно выраженной отрицательной значимой связи ($r = -0,60$). После исключения трендов корреляция становится незначимой ($r = -0,21$). Это означает, что «внутренняя» межгодовая изменчивость потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в этих областях МО, не связанная с трендами, обусловлена региональными процессами.

При этом каждому временному ряду потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ свойствен тренд: положительный для области ЭНЮК и отрицательный для области СА. Но интенсивность трендов разная. Для их сравнения оценим изменения потоков CO_2 за период 30 лет (1985—2015 гг.). За указанный период поток CO_2 в СА увеличивается на $0,40$ моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$, а в зоне ЭНЮК — на $0,20$ моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$. Отсюда видно, что

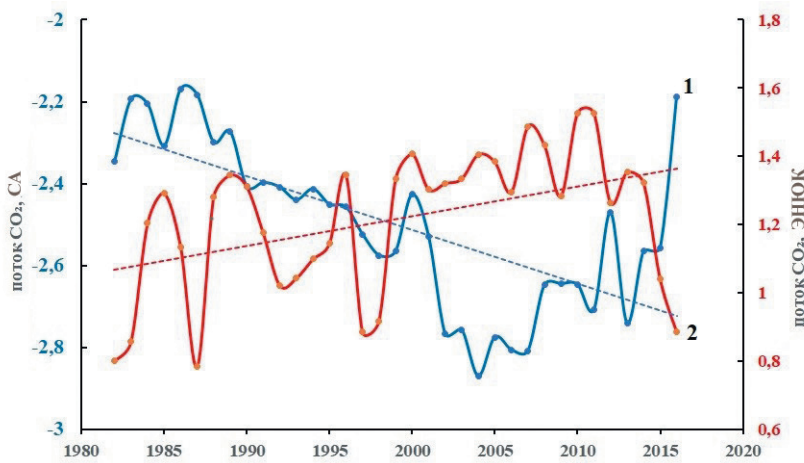


Рис. 6. Сопоставление межгодового хода результирующих потоков $\text{CO}_{2,\text{опр}}$ в СА (1) и ЭНЮК (2), в моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$.

Fig. 6. Comparison of the interannual course of the resulting $\text{CO}_{2,\text{опр}}$ fluxes, in the North Atlantic (1) and ENSO (2), in $\text{mol C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$.

скорость поглощения CO_2 в СА идет в 2 раза быстрее выделения CO_2 в атмосферу в области ЭНЮК. Исходя из этих оценок, становится понятным ускорение поглощения CO_2 океаном (см. табл. 1) при общем росте потепления МО.

Проверка дальних связей влияния ЭНЮК на СА показала, что все они в статистическом плане являются не значимыми. Исключение составляет только отрицательная корреляция ($r = -0,62$) между PDO и АМО. Вероятно, влияние ЭНЮК на климат чуть ли не всего земного шара является преувеличением. Достаточно очевидно, что рассмотренные в данной работе источники и стоки CO_2 через поверхность МО обусловлены региональными процессами взаимодействия между океаном и атмосферой.

Заклучение

В данной работе проведен статистический анализ межгодовой изменчивости потока CO_2 в наиболее интенсивных очагах его выделения (область Эль-Ниньо — Южное колебание) и поглощения (севернее 36° — Северная Атлантика) в океане на основе данных наблюдений за период 1983—2016 гг. С этой целью использовалась база данных Global Surface $p\text{CO}_2$ Database V2016 at Lamont–Doherty Earth Observatory (LDEO) [14], которая имеет пространственное разрешение 4° широты \times 5° долготы. Кроме того, к анализу привлекались различные климатические индексы, описывающие ЭНЮК и СА.

Показано, что очаг максимальных потоков CO_2 в области ЭНЮК имеет ячеистую структуру и состоит из четырех квазигомогенных районов. Для двух восточных районов характерны более высокие оценки потоков CO_2 и положительные

тренды. Осредненный для области ЭНЮК поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ достаточно точно характеризует межгодовую изменчивость каждого из выделенных районов и имеет значимый положительный тренд. Наиболее высокая корреляция потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ отмечается с индексом MEI ($r = 0,81$), чуть ниже корреляция ($|r| > 0,70$) с индексами SOI, N_{1+2} , N_{3+4} и PDO. Поскольку экстремумы $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ почти совпадают с экстремумами индексов ЭНЮК, то это означает, что во время Эль-Ниньо поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ резко усиливается, а во время Ла-Нинья также резко ослабевает. Исходя из полученных результатов, по легко определяемым индексам MEI, N_{3+4} , N_{1+2} построена регрессионная модель, позволяющая с достаточно высокой точностью рассчитывать количество выделяемого в атмосферу $\text{CO}_{2,\text{оср}}$.

В СА абсолютный максимум поглощения CO_2 океаном отмечается на 60° с.ш. вблизи побережья Гренландии. Сильные отрицательные тренды, означающие усиление поглощения CO_2 океаном, свойственны Норвежскому морю и морю Лабрадор. В Гренландском море отрицательные и положительные тренды компенсируют друг друга, вследствие чего результирующий тренд оказывается близким к нулю. Выявлен вклад температуры воды и других гидрометеорологических параметров в изменчивость потоков CO_2 . Наиболее высокая корреляция с температурой воды отмечается для моря Лабрадор ($r = -0,86$), а наименьшая — для Гренландского моря ($r = -0,51$). В Норвежском море существенное влияние на поток CO_2 оказывают АМО, температура воздуха в Арктике и формы атмосферной циркуляции W и C.

Сопоставление результирующих потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в ЭНЮК и СА показало наличие между ними явно выраженной отрицательной значимой связи ($r = -0,60$), которая становится незначимой после исключения трендов ($r = -0,21$). Это означает, что «внутренняя» межгодовая изменчивость потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в этих областях МО, не связанная с трендами, обусловлена региональными процессами. Тренды показывают увеличение выделения потока CO_2 в атмосферу в области ЭНЮК и поглощение его в области СА. Их сравнение выявило, что скорость поглощения CO_2 в СА идет в 2 раза быстрее выделения CO_2 в атмосферу в области ЭНЮК. Достаточно очевидно, что рассмотренные в данной работе источники и стоки CO_2 через поверхность океана обусловлены процессами взаимодействия между океаном и атмосферой и скорее всего не связаны с выбросами CO_2 в атмосферу за счет антропогенной деятельности.

Обратимся теперь к фундаментальному выводу, сформулированному в Пятом отчете МГЭИК (IPCC, 2013): «... в высшей степени вероятно (*extremely likely*, 95—100 %), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия». Отсюда следует полное игнорирование природных (естественных) факторов в формировании глобального потепления, единственной причиной которого считаются выбросы CO_2 в атмосферу за счет человеческой деятельности. Но так ли это?

Парниковый эффект, обусловленный углекислым газом, состоит из двух компонент: естественной и антропогенной. Примем эмиссию CO_2 в атмосферу из МО и БС по данным [8, 11] равной 84 и 118 млрд т/год. Антропогенные выбросы равны примерно 9 млрд т/год. Даже без учета вулканических извержений и природных

лесных пожаров антропогенный вклад в ПЭ оказывается равным 4,5 %. Как известно, полное перемешивание в атмосфере в глобальном масштабе оценивается примерно неделей. Поэтому уже в течение месяца парниковые газы перемешиваются в атмосфере не менее четырёх раз. В связи с этим корректное разделение ПЭ на естественную и антропогенную компоненты практически нереально. Исходя из этого нельзя утверждать, что антропогенный CO_2 с его вкладом в ПЭ менее 5 % является доминирующим фактором глобального потепления.

Другое принципиально ошибочное суждение состоит в том, что, признавая доминирующий вклад водяного пара в ПЭ (до 75 %), эксперты МГЭИК [11] упорно утверждают, что вклад водяного пара в радиационный форсинг, а следовательно и в ПЭ, пренебрежимо мал, поэтому *увеличение концентрации водяного пара не является причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними*. Но обратные связи, как мы знаем, предполагают взаимное влияние процессов друг на друга. В данном случае речь идет только об одностороннем влиянии температуры воздуха на влагосодержание атмосферы. Однако еще в 70-е годы нобелевский лауреат С. Манабэ [37] показал, что при удвоении концентрации CO_2 температура воздуха без учёта водяного пара (для сухой атмосферы) повышается на 1,3 °С, а при его учёте — на 2,3 °С, т. е. её рост идёт почти в 2 раза быстрее! По сути, влагосодержание атмосферы является значимым климатообразующим фактором и в значительной степени определяется не обратной связью с ТВ, а изменчивостью влагообмена в системе океан—атмосфера. Другие доказательства важной роли водяного пара в современных изменениях климата можно найти в [29, 38—40 и др.]

В действительности, формирование глобального потепления обусловлено внутренней изменчивостью климатической системы за счет процессов крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают. Главенствующей является положительная обратная связь между влагосодержанием атмосферы и температурой воздуха. Роль углекислого газа состоит в том, что он является своеобразным катализатором глобального потепления. Его рост — это фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания [41].

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Joos F., Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years, P. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. № 105. P. 1425—1430. doi: 10.1073/pnas.0707386105,
3. Dlugokencky E., Tans P. Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (accessed 16.11.2020).

4. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M. et al. Global Carbon Budget 2021 // *Earth System Science*. doi: 10.5194/essd-2021-386.
5. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2020 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. № 12. P. 3269—3340. doi: 10.5194/essd-12-3269-2020.
6. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: РГГМУ, 2012. 260 с.
7. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. 3949 p.
8. Елисеев А.В. Глобальный цикл CO₂: основные процессы и взаимодействие с климатом // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 4. С. 5—27.
9. Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Образцова А.А. Пространственно-временные изменения потока CO₂ в системе океан—атмосфера // *Изв. РГО*. 2012. Т. 144. Вып. 5. С. 27—36.
10. Karlin L.N., Malinin V.N., Gordeeva S.M. On the Influence of the Sea Surface Temperature on the Carbon Dioxide Exchange with the Atmosphere // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, No. 1. P. 11—19.
11. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
12. Park G., Wanninkhof R., Triñanes J. Procedures to create near real-time seasonal air-sea CO₂ flux maps // NOAA Technical Memorandum, OAR AOML-98. 2010. 14 p.
13. Bakker et al. A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) // *Earth System Science Data*. 2016. № 8. P. 383—413. doi: 10.5194/essd-8-383-2016.
14. Takahashi T., Sutherland S.C., Wanninkhof R. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans // *Deep Res. Part II. Top Stud. Oceanogr*. 2009. № 56. P. 554—577. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
15. Park G.-H., Wanninkhof R., Doney S.C., Takahashi T., Lee K., Feely R.A., Sabine C.L., Trinanes J., Lima I.D. Variability of global net sea-air CO₂ fluxes over the last three decades using empirical relationships // *Tellus*. 2010. № 62B(5). P. 352—368.
16. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // *Bul. of the Atmos. Met. Soc.* 2002. No. 83. P. 1631—1643.
17. McPhaden M.J. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences // *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Vol. 1. Chichester, UK: John Wiley and Sons, LTD, 2002. P. 353—370.
18. Серых И.В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 63. С. 329—370.
19. Tian F., Zhang R.-H., Wang X. Factors affecting interdecadal variability of air-sea CO₂ Fluxes in the tropical Pacific, revealed by an ocean physical-biogeochemical model // *Climate Dynamics*, 2019. doi: 10.1007/s00382-019-04766-5.
20. Bordbar M.H., Martin T., Latif M., Park W. Role of internal variability in recent decadal to multidecadal tropical Pacific climate changes // *Geophys. Res. Lett.* 2017. № 44. P. 4246—4255. doi: 10.1002/2016GL072355.
21. England M.H., McGregor S., Spence P. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim. Chang.* 2014. № 4. P. 222—227. doi: 10.1038/NCLIMATE2106.
22. Wang X., Murtugudde R., Hackert E., Wang J., Beauchamp J. Seasonal to decadal variations of sea surface pCO₂ and sea-air CO₂ flux in the equatorial oceans over 1984—2013: A basin-scale comparison of the Pacific and Atlantic Oceans // *Global Biogeochem. Cycles*. 2015. № 29(5). P. 597—609. doi: 10.1002/2014GB005031.
23. Ishii M., Feely R.A., Rodgers K.B. et al. Air-sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990—2009. *Biogeosciences*. 2014. №11. P. 709—734. doi: 10.5194/bg-11-709-2014.
24. Wanninkhof R., Park G.H., Takahashi T. et al. Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends. *Biogeosciences*. 2013. № 10. P. 1983—2000. doi: 10.5194/bg-10-1983-2013.

25. Feely R.A., Takahashi T., Wanninkhof R. et al. Decadal variability of the air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean // *J. Geophys. Res.* 2006. 111:C08S90. doi: 10.1029/2005jg003129.
26. McKinley G.A., Fay A.R., Lovenduski N.S., Pilcher D.J. Natural variability and anthropogenic trends in the ocean carbon sink // *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2017. № 9. P. 125—150. doi: 10.1146/annur-ev-marine-010816-060529.
27. Valsala V., Roxy M., Ashok K., Murtugudde R. Spatiotemporal characteristics of seasonal to multidecadal variability of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2014. № 119. P. 8987—9012. doi: 10.1002/2014JC010212. Received.
28. 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.
29. Benson N.U., Osibanjo O.O., Asuquo F.E., Anake W.U. Observed trends of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the North Atlantic Ocean // *International Journal of Marine Science.* 2014. Vol. 4, No. 72. P. 1—7. doi: 10.5376/ijms.2014.04.0072.
30. Breeden M.L., McKinley G.A. Climate impacts on multidecadal pCO₂ variability in the North Atlantic: 1948—2009 // *Biogeosciences.* 2016. № 13. P. 3387—3396.
31. De Vries T., Le Quéré, Andrews C., Berthet O., Hauck S., Ilyina J., Landschützer T., Lenton P., Lima A., Nowicki I.D., Schwinger M., Séférian J. Decadal trends in the ocean carbon sink // *P. Nat. Acad. Sci. USA.* 2019. № 116. P. 11646—11651. doi: 10.1073/pnas.1900371116.
32. Малинин В.Н., Вайновский П.А. Изменчивость обмена углекислым газом между океаном и атмосферой в Северной Атлантике // *Общество. Среда. Развитие.* 2021. № 4. С. 103—112.
33. Федоров А.М., Башмачников И.Л., Белоненко Т.В. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингер // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле.* 2018. Т. 63, Вып. 3. С. 345—362. doi: 10.21638/spbu07.2018.306.
34. Li F., Lozier M.S. On the linkage between Labrador Sea Water volume and overturning circulation in the Labrador Sea: a case study on proxies // *J. Climate.* 2018. № 31. P. 5225—5241. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0692.1.
35. Rodriguez-Fonseca B., Suárez-Moreno R., Ayarzagüena B., López-Parages J., Gómara I., Villamayor J., Mohino E., Losada T., Castaño-Tierno A. A review of ENSO influence on the North Atlantic. A non-stationary signal. *Atmosphere.* 2016. № 7 (7). P. 87.
36. Broennimann S. Impact of El Niño–Southern Oscillation on European climate // *Rev. Geophys.* 2007. № 45. RG3003.
37. Manabe S. Role of greenhouse gas in climate change // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2019. № 71. P. 1, 1620078. doi: 10.1080/16000870.2019.1620078.
38. Логинов В.Ф., Лысенко С.А. Современные изменения глобального и регионального климата. Минск: Беларуская навука, 2019. 318 с.
39. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата. М.: ИД Интеллект, 2017. 400 с.
40. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15, № 3. С. 243—251. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251.
41. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // *Ученые записки РГТМУ.* 2017. № 48. С. 11—32.

References

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
2. Joos F., Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years. *P. Natl. Acad. Sci. USA.* 2008, 105: 1425—1430. doi: 10.1073/pnas.0707386105.

3. *Dlugokencky E., Tans P.* Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (accessed 16.11.2020).
4. *Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M. et al.* Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science*. 2021. doi: 10.5194/essd-2021-386.
5. *Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al.* Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020, 12: 3269—3340. doi: 10.5194/essd-12-3269-2020.
6. *Malinin V.N. Uroven' okeana: nastoiashchee i budushchee.* The ocean level: present and future. Saint-Petersburg: RGGMU, 2012: 260 p. [In Russian].
7. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, 2021: 3949 p.
8. *Eliseev A.V.* Global CO₂ cycle: basic processes and interaction with climate. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya.* Fundamental and Applied Climatology. 2017, 4: 5—27. [In Russian].
9. *Karlin L.N., Malinin V.N., Obratsova A.A.* Spatio-temporal changes in the CO₂ flux in the ocean—atmosphere system. *Izvestiya RGO. Bulletin of RGS.* 2012, 144(5): 27—36. [In Russian].
10. *Karlin L.N., Malinin V.N., Gordeeva S.M.* On the Influence of the Sea Surface Temperature on the Carbon Dioxide Exchange with the Atmosphere. *Oceanology.* 2015, 55(1): 11—19.
11. IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 2007: 996 p.
12. *Park G., Wanninkhof R., Triñanes J.* Procedures to create near real-time seasonal air-sea CO₂ flux maps. NOAA Technical Memorandum, OAR AOML-98. 2010: 14 p.
13. *Bakker et al.* A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data.* 2016, 8: 383—413. doi: 10.5194/essd-8-383-2016.
14. *Takahashi T., Sutherland S.C., Wanninkhof R.* Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂ and net sea—air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Res. Part II. Top Stud. Oceanogr.* 2009, 56: 554—577. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
15. *Park G.-H., Wanninkhof R., Doney S.C., Takahashi T., Lee K., Feely R.A., Sabine C.L., Trinanes J., Lima I.D.* Variability of global net sea-air CO₂ fluxes over the last three decades using empirical relationships. *Tellus.* 2010, 62B(5): 352—368.
16. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bul. of the Atmos. Met. Soc.* 2002, 83: 1631—1643.
17. *McPhaden M.J.* El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. In: *Encyclopedia of Global Environmental Change.* Vol. 1. Chichester, UK: John Wiley and Sons, LTD, 2002: 353—370.
18. *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 Russian].
19. *Tian F., Zhang R.-H., Wang X.* Factors affecting interdecadal variability of air—sea CO₂ Fluxes in the tropical Pacific, revealed by an ocean physical—biogeochemical model. *Climate Dynamics.* 2019. doi: 10.1007/s00382-019-04766-5.
20. *Bordbar M.H., Martin T., Latif M., Park W.* Role of internal variability in recent decadal to multidecadal tropical Pacific climate changes. *Geophys. Res. Lett.* 2017, 44: 4246—4255. doi: org/10.1002/2016GL072355.
21. *England M.H., McGregor S., Spence P. et al.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim. Chang.* 2014, 4: 222—227. doi: 10.1038/NCLIMATE2106.
22. *Wang X., Murtugudde R., Hackert E., Wang J., Beauchamp J.* Seasonal to decadal variations of sea surface pCO₂ and sea-air CO₂ flux in the equatorial oceans over 1984—2013: A basin-scale comparison of the Pacific and Atlantic Oceans. *Global Biogeochem. Cycles.* 2015, 29(5): 597—609. doi: 10.1002/2014GB005031.
23. *Ishii M., Feely R.A., Rodgers K.B. et al.* Air-sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990—2009. *Biogeosciences.* 2014, 11: 709—734. doi: 10.5194/bg-11-709-2014.

24. Wanninkhof R., Park G.H., Takahashi T. et al. Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends. *Biogeosciences*. 2013, 10: 1983—2000. doi: 10.5194/bg-10-1983-2013.
25. Feely R.A., Takahashi T., Wanninkhof R. et al. Decadal variability of the air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* 2006, 111: C08S90. doi: 10.1029/2005j c003129.
26. McKinley G.A., Fay A.R., Lovenduski N.S., Pilcher D.J. Natural variability and anthropogenic trends in the ocean carbon sink. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2017, 9: 125—150. doi: 10.1146/annur ev-marine-01081 6-06052 9.
27. Valsala V., Roxy M., Ashok K., Murtugudde R. Spatiotemporal characteristics of seasonal to multidecadal variability of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2014, 119: 8987—9012. doi: 10.1002/2014J C0102 12. Received.
28. 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 Russian].
29. Benson N.U., Osibanjo O.O., Asuquo F.E., Anake W.U. Observed trends of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the North Atlantic Ocean. *International Journal of Marine Science*. 2014, 4(72): 1—7. doi: 10.5376/ijms.2014.04.0072.
30. Breeden M.L., McKinley G.A. Climate impacts on multidecadal pCO₂ variability in the North Atlantic: 1948—2009 // *Biogeosciences*. 2016, 13: 3387—3396.
31. De Vries T., Le Quéré, Andrews C., Berthet O., Hauck S., Ilyina J., Landschützer T., Lenton P., Lima A., Nowicki I.D., Schwinger M., Séférian J. Decadal trends in the ocean carbon sink. *P. Nat. Acad. Sci. USA*. 2019, 116: 11646—11651. doi: 10.1073/pnas.1900371116.
32. Malinin V.N., Vainovsky P.A. Variability of the exchange of dioxide the and ocean and atmosphere in the North Atlantic. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye. Society. Environment. Development*. 2021, 3: 103—112. [In Russian].
33. Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V. Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2018, 63(3): 345—362. doi: 10.21638/spbu07.2018.306. [In Russian].
34. Li F., Lozier M.S. On the linkage between Labrador Sea Water volume and overturning circulation in the Labrador Sea: a case study on proxies, *J. Climate*. 2018, 31: 5225—5241. doi: 10.1175/JC-LI-D-17-0692.1.
35. Rodríguez-Fonseca B., Suárez-Moreno R., Ayarzagüena B., López-Parages J., Gómara I., Villamayor J., Mohino E., Losada T., Castaño-Tierno A. A review of ENSO influence on the North Atlantic. A non-stationary signal. *Atmosphere*. 2016, 7 (7): 87.
36. Broennimann S. Impact of El Niño–Southern Oscillation on European climate. *Rev. Geophys.* 2007, 45: RG3003.
37. Manabe S. Role of greenhouse gas in climate change. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019, 71: 1, 1620078. doi: 10.1080/16000870.2019.1620078.
38. Loginov V.F., Lysenko S.A. *Sovremennye izmeneniia global'nogo i regional'nogo klimata. Modern changes in the global and regional climate*. Minsk: Belarusian Science, 2019: 318 p. [In Russian].
39. Smirnov B.M. *Fizika global'noi atmosfery. Parnikovyi effekt, atmosfernoie elektrichestvo, evoliutsiia klimata. Physics of the global atmosphere. Greenhouse effect, atmospheric electricity, climate evolution*. Moscow: ID Intellect, 2017: 400 p. [In Russian].
40. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Naumov L.M. Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2018, 15(3): 243—251. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251. [In Russian].
41. Malinin V.N. Global ecological crisis and climate. *Uchenyye zapiski RGGMU. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017, 48: 11—32. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.12.2021

Принята в печать 20.02.2022

Сведения 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.

Вайновский Павел Антонович, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ООО «Прогноз», pv974@yandex.ru.

Information about authors

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

Vainovskii Pavel Antonovich, PhD (Geogr. Sci.), senior researcher, LLC «Prognoz».

УДК [502.3:613.15](520)

doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-71-80

К оценке потенциального риска загрязнения атмосферы на о. Хоккайдо (Япония)

А.И. Банчева

Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, ban-sai@mail.ru

Статья посвящена оценке территории с точки зрения ее уязвимости к загрязнению воздуха, выполненной на примере острова Хоккайдо, Япония. На основании формулы, предложенной Ю. Пыхом и И. Малкиной-Пых, рассчитан потенциальный риск загрязнения атмосферы для 134 метеорологических станций, равномерно покрывающих всю территорию острова. В расчетах были использованы суточные данные января и июля за 31-летний временной промежуток: скорость ветра, минимальная и максимальная температуры, количество осадков. Установлено, что лучшие условия для самоочищения атмосферы характерны для юго-западной и западной части острова, а также побережий в целом, худшие — для центральной и юго-восточной части острова. Показатель может быть использован для комплексных оценок устойчивости территории к техногенному загрязнению, в том числе и зарубежных территорий.

Ключевые слова: самоочищение атмосферы, уязвимость, устойчивость, потенциал загрязнения атмосферы, ассимиляционный потенциал атмосферы, экологическая климатология.

On the potential risk of air pollution of Hokkaido island, Japan

A.I. BanchevaLomonosov Moscow State University, Department of Geography, Moscow, Russia,
ban-sai@mail.ru

The paper deals with the assessment of the index of air pollution risk potential using the example of Hokkaido Island, Japan. According to the methodology of Yu. Pykh and I. Malkina-Pykh, both factors of accumulation and dispersion of pollution in the atmosphere are analyzed. These features are estimated through climatological characteristics of daily mean data of maximum and minimum temperatures, precipitation and wind speed from the 134 meteorological stations of the Hokkaido prefecture for 31 years (1985—2015), data for which are available at the Japan Meteorological Agency. The research results show that the territory has a stronger difference by the index in the winter season. In January, the south-eastern part of Hokkaido is characterized by high values of the index, which means low self-purification capacity of the atmosphere. The maximum of index values is noted for the station Hombetsu, located in the north-eastern part of Tokachi valley, between the Hidaka Mountains and the Shiranuko Highlands. Here, the wind velocity and precipitation are not high, the accumulation of pollutants dominating the diffusion. On the contrary, the Japan Sea side of Hokkaido is characterized by low index value. The minimum of the index values is found in the Oshima peninsula, station Matsumae, with a lot of precipitation and strong winds, which increase the assimilative capacity of the place. In the summer season, the difference between meteorological stations is not so strong, the seashore territories all over Hokkaido having the best self-purification abilities. The advantage of the method is open-source meteorological data and quite a small number of elements taken into account. It can be of use for regional studies and comprehensive research on the assimilative ca-

capacity of landscapes and their resistance to industrial pressure. It might be used as a preliminary assessment of a region during its industrial development and environmental management. Ecological technologies and monitoring might be recommended especially for the regions with high index of air pollution risk potential.

Keywords: air pollution, assimilative capacity of the atmosphere, environmental climatology, self-purification capacity, environmental impact assessment, regional development, unfavorable meteorological conditions.

For citation: *A.I. Bancheva.* The diffusing capacity of the atmosphere through the index of air pollution risk potential: Hokkaido, Japan. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2022, 66: 71—80. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-71-80

Введение

В условиях возрастающего антропогенного давления на окружающую среду и загрязнения природных сред чрезвычайно важным является вопрос, касающийся способности природы нейтрализовать данное воздействие. Этот вопрос рассматривался, например, в работах [1—5] и др. В контексте проблемы загрязнения одного из компонентов среды — воздуха, а также его способности / неспособности к самоочищению используют понятие регенерационного потенциала атмосферы, который возможно оценить по одному из нескольких похожих показателей.

Одним из наиболее общепризнанных и широко используемых в научных и практических задачах является показатель потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА), разработанный Э.Ю. Безуглой [6]. Показатель рассчитывается на основе повторяемости неблагоприятных для самоочищения факторов — туманов, слабых ветров, застоев воздуха и инверсий [7].

В оценке самоочищающихся свойств атмосферы может быть реализован и несколько другой подход, учитывающий соотношение неблагоприятных и благоприятных для самоочищения факторов (например, по осадкам). Формулы могут различаться набором слагаемых, т. е. учитываемыми метеорологическими характеристиками и показателями их интенсивности. Так, Селегей Т.С. рассматривает метеорологический потенциал атмосферы [8], Григорьева Е.А. — коэффициент метеорологического загрязнения атмосферы [9], Пых Ю.А. — индекс потенциального риска загрязнения атмосферы [10] и др. Однако в целом, в работах применяется единый подход — сравнение различных факторов, с учетом региональных особенностей [11, 12].

Над обозначенной тематикой, а также смежными вопросами работают и японские ученые [13—15], а также коллективы научно-исследовательских институтов: JICA Ogata Research Institute, National Institute for Environmental Studies [16, 17]. Многие работы посвящены столичному региону, г. Осака и другим крупным агломерациям. Так, Кавамура предложил методику оценки метеорологических характеристик для потенциала загрязнения атмосферы на примере региона Канто [14]. Ряд научно-исследовательских проектов посвящен моделированию загрязнения атмосферы с учетом существующих выбросов и транспортировки загрязняющих веществ, обусловленной метеорологическими условиями [15].

Главным преимуществом формулы Ю.А. Пыха, как кажется автору данной статьи, является то, что в качестве косвенного индикатора температурных

инверсий (непосредственные данные о которых не всегда представлены в открытом доступе в сети Интернет), авторы предлагают использовать показатель суточной амплитуды температуры воздуха. При этом постулируется следующий тезис: если перепад суточных температур составляет более девяти градусов, то предполагается, что в этот день наблюдается инверсия, если перепад составляет менее пяти градусов – инверсия отсутствует. Данный подход был апробирован авторами методики на территории Японии, регионе Тохоку, индекс рассчитан по данным 18 метеостанций за 1978—1998 гг. [12].

Цель настоящего исследования состоит в изучении распределения индекса потенциального риска загрязнения атмосферы на острове Хоккайдо за многолетний период с помощью методики Ю. Пыха и И. Малкиной-Пых.

Методика исследования

В формуле для расчета индекса потенциального риска загрязнения атмосферы (ПРЗА) в числителе сведены условия накопления загрязняющих веществ, в знаменателе — условия рассеивания [12]:

$$\text{ПРЗА} = \frac{P(V \leq 1) + P(A \geq 9) + P(Q \leq 1)}{P(V \geq 3) + P(A \leq 5) + P(Q \geq 3)},$$

где ПРЗА — индекс потенциального риска загрязнения атмосферы, безразмерный показатель;

$P(V \leq 1)$ — число дней в году со скоростью ветра ≤ 1 м/с;

$P(V \geq 3)$ — число дней в году со скоростью ветра ≥ 3 м/с;

$P(A \geq 9)$ — число дней в году с суточной амплитудой температур ≥ 9 °С;

$P(A \leq 5)$ — число дней в году с суточной амплитудой температур ≤ 5 °С;

$P(Q \leq 1)$ — число дней в году с осадками ≤ 1 мм,

$P(Q \geq 3)$ — число дней в году с осадками ≥ 3 мм.

Таким образом, исходными данными для расчетов послужили среднесуточные показатели скорости ветра (м/с), суточное количество осадков (мм), максимальная суточная температура (°С) и минимальная суточная температура (°С) [18]. Данные собраны за 31 год (1985—2015 гг.) для двух месяцев (январь и июль) с 134 метеостанций (соблюдено условие полного ряда наблюдений за указанный период), преобразованы в рабочий формат и сведены в несколько итоговых таблиц: с исходными данными (табл. 1), условиями накопления и условиями рассеивания загрязнителей (табл. 2). Как известно, согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации 30-летний временной промежуток может быть принят в качестве климатической нормы.

Таблицы с данными по условиям накопления и рассеивания загрязнителей были составлены с помощью инструментов «Функция СЧЕТ» и «Функция ЕСЛИ» в программе MS Excel. Например, условия накопления веществ представлены в табл. 2: если скорость ветра в указанный день не превышала 1 м/с, то этому дню присваивалось значение «1», если превышала — «0». Аналогичная процедура выполнялась по двум другим показателям.

Таблица 1

Исходные метеорологические данные по станции Нэмуру (фрагмент)

Initial data for Nemuro meteostation (fragment)

Год	Месяц	День	Средняя скорость ветра (м/с), V	Максимальная температура (°C), T_{\max}	Минимальная температура (°C), T_{\min}	Количество осадков (мм), Q
1985	1	1	3,80	-4,10	-10,90	0
1985	1	2	6,10	-5,70	-8,50	0
1985	1	3	2,40	-3,60	-12,70	0
1985	1	4	5,20	-5,20	-8,80	0
1985	1	5	6,00	-7,40	-13,00	0
...						
2015	1	31	11,70	0,60	-1,50	17,00

Таблица 2

Данные по условиям накопления загрязнителей (фрагмент)

Information regarding conditions for the pollutants accumulation (fragment)

Год	Месяц	День	Дни со скоростью ветра ≤ 1 м/с	Суточная амплитуда температуры (°C)	Дни с амплитудой ≥ 9 °C	Дни с количеством осадков ≤ 1 мм
1985	1	1	0	6,80	0	1
1985	1	2	0	2,80	0	1
1985	1	3	0	9,10	1	1
1985	1	4	0	3,60	0	1
1985	1	5	0	5,60	0	1
...						
2015	1	31	0	2,10	0	0
Число дней в году по каждому из параметров (осредненное за 31 год)			0,06	-	3,35	25,16

В результате, из всего ряда данных для каждой метеостанции подсчитано количество дней, когда:

- 1) суточная амплитуда температура воздуха превышает 9 °C;
- 2) суточная амплитуда температуры менее 5 °C;
- 3) количество осадков менее 1 мм;
- 4) количество осадков более 3 мм;
- 5) скорость ветра менее 1 м/с;
- 6) скорость ветра более 3 м/с.

После этого вычислено среднее за 31 год количество дней в году (повторяемость явления), удовлетворяющее каждому из шести условий. Так, например, для станции Нэмуру число дней с ветром менее 1 м/с составило 0, с суточной амплитудой температуры, превышающей 9 °C — 3, а с осадками менее 1 мм — 25. Аналогичная таблица была составлена и с данными по условиям рассеивания, после чего рассчитан индекс потенциального риска загрязнения атмосферы для января. Аналогичная работа была проведена с данными по июлю, и в итоге

рассчитан индекс ПРЗА. На основе полученных результатов были рассчитаны среднегодовые значения индекса.

Ранжирование значений проводилось методом заданных интервалов в программе *ArcGIS*. Диапазон полученных значений индекса (от 0,2 до 14,5) разделен на девять категорий.

Результаты исследований

В результате проведения расчетов по вышеописанной методике для 134 метеостанций о. Хоккайдо получены значения индексов потенциального риска загрязнения атмосферы.

Первичный анализ результатов, выполненный по *среднегодовым значениям индекса*, позволил выявить несколько закономерностей. Во-первых, для территории характерен большой диапазон значений ПРЗА по метеостанциям, т. е. дифференциация территории по способности самоочищения атмосферы достаточно велика (рис. 1). Это объясняется существенными различиями в климате

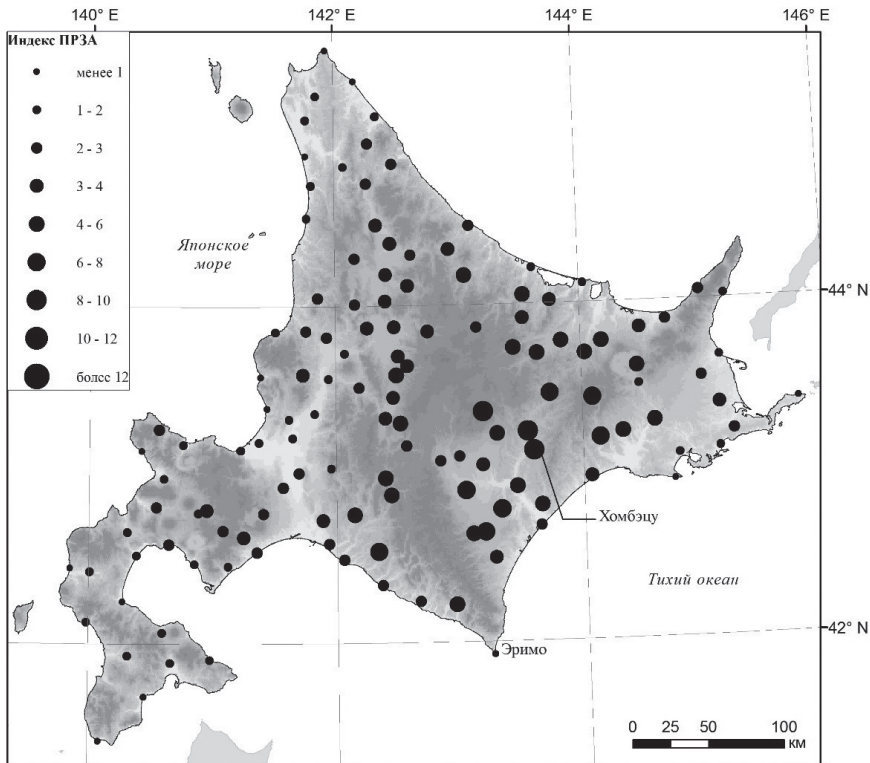


Рис. 1. Распределение индекса потенциального риска загрязнения атмосферы на острове Хоккайдо в среднем за 1985—2015 гг.

Fig. 1. The air pollution risk potential for Hokkaido island, 1985—2015 average, all seasons.

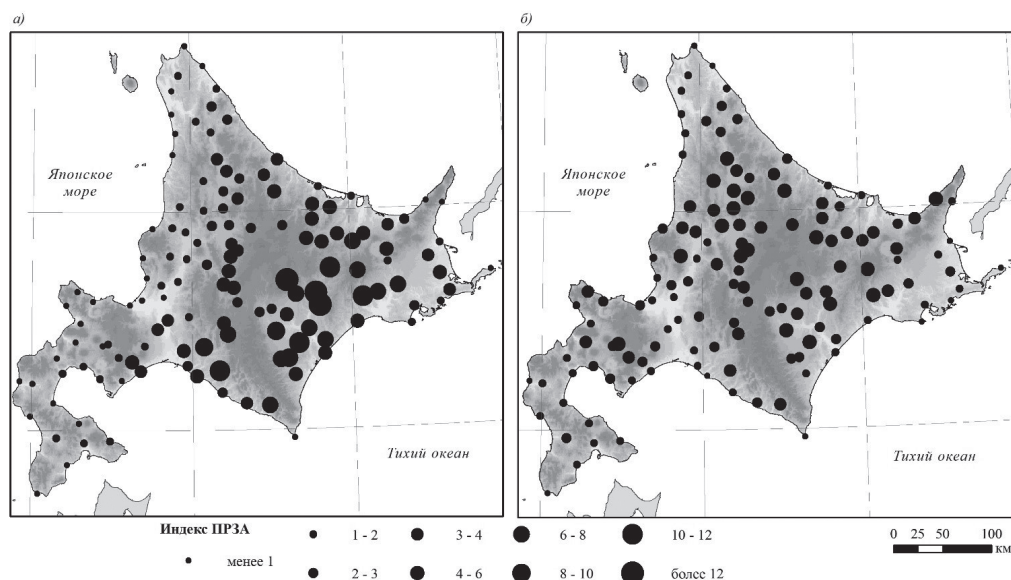


Рис. 2. Среднегодовое (1985—2015) распределение индекса потенциального риска загрязнения атмосферы на острове Хоккайдо в январе (а) и июле (б).

Fig. 2. The air pollution risk potential for Hokkaido island, 1985—2015 average, January (a) and July (b).

различных частей острова. Во-вторых, абсолютное большинство станций (90 %) имеет невысокое значение индекса (ниже среднего по острову). Лишь на юго-востоке острова сконцентрированы станции, характеризующиеся наименее благоприятными для самоочищения атмосферы условиями (например, метеостанция Хомбэцу).

Более подробное рассмотрение результатов, а именно по сезонам года, позволяет отметить, что зимой на острове наблюдаются гораздо более сильные различия в климатических характеристиках и диапазон ПРЗА, чем в летний сезон (рис. 2).

Так, относительно благоприятные по ассимиляционному потенциалу атмосферы локации четко ограничены западной частью острова — полуостров Осима, нагорье Сирибеси, равнины Исикари и Румой. Напротив, неблагоприятные условия отмечаются в остальных регионах — это юг (регион Хикава), центральная часть острова (котловина Камикава), северо-восток (низменность и впадина Китами), юго-восток (равнины Токати и Кусиро).

Весомый вклад в дифференциацию условий атмосферы по очищению от загрязнителей вносит, по-видимому, различное количество осадков в западной и восточной части острова. На западные побережья осадки приносят воздушные массы Азиатского антициклона, насыщенные влагой Японского моря. Благодаря этому на западе Хоккайдо и Хонсю в зимние месяцы выпадает до 300 мм, в то

время как на восточных — не более 150 мм. Так, согласно метеоданным, используемых в настоящей работе, количество осадков на метеостанции Саппоро в январе составляет 114 мм, на метеостанции Обихиро — всего 41 мм [18].

Для станций, расположенных во впадине Китами (между горами Тайсецу и возвышенностью Сирануко) — юго-восток острова — важным фактором является также низкая скорость ветра. В зимний период барьером для воздушных масс, приходящих с запада, выступают горы Тайсецу, Исикари и Хидака, а в летний — возвышенность Сирануко (она блокирует юго-восточные ветра с Тихого океана). В результате, для расположенных здесь метеостанций получены максимальные на острове значения ПРЗА.

Так, на основе осреднения суточных метеоданных можно сказать, что на станции «Нукабира гэнсэн гоу» среднемноголетняя скорость ветра в январе составляет 0,65 м/с, количество осадков — 50 мм; на станции «Хомбэцу» — 1 м/с и 31 мм; на станции «Асёро» — 1,3 м/с и 28 мм [18].

В летний сезон дифференциация территории по индексу ПРЗА значительно меньше, диапазон значений составляет от 0,3 до 6 единиц. Относительно высокие значения ПРЗА (до 6 единиц) характерны для внутренних частей острова, относительно низкие (менее 2) — для прибрежных. Распределение осадков летом не так дифференцировано, как зимой: летний муссон до Хоккайдо практически не доходит, а скорости ветра и суточные амплитуды температур распределены согласно общим закономерностям. Можно отметить, что в целом по острову условия для рассеивания загрязнителей летом несколько лучше.

В итоге можно отметить, что остров Хоккайдо достаточно дифференцирован по условиям накопления загрязняющих веществ в воздухе, и потенциальный риск загрязнения атмосферы различается на порядок в западных и юго-восточных частях острова. Наибольшие различия проявляются в зимний сезон, а летом они более сглажены, и в целом условия для рассеивания загрязнителей существенно лучше. Территории с максимально высоким ПРЗА приурочены к центральной и юго-восточной части острова (горы Тайсецу, долина Токати). Западная часть острова, а именно полуостров Осима, нагорье Сирибеси и равнина Румой, а также равнина Консен и прибрежные ландшафты в целом имеют невысокий потенциальный риск загрязнения атмосферы.

Заключение

Индекс потенциального риска загрязнения атмосферы является одним из показателей регенерационного потенциала атмосферы и наряду с уже принятыми и широко используемыми индексами может использоваться в изучении территорий с точки зрения их возможности рассеивания или накопления загрязняющих веществ. Его преимущество заключается в простоте методики и доступности всех необходимых для расчетов данных наблюдений на метеорологических станциях в открытом доступе. В частности, индекс может рассчитываться в случае, если отсутствуют данные по туманам и температурным инверсиям. Индекс ПРЗА также можно рассматривать как одну из характеристик

потенциальной уязвимости ландшафта к загрязнению и использовать в качестве одного из элементов в исследованиях устойчивости территории к техногенному загрязнению.

Список литературы

1. *Downing R., Ramankutty R., Shah J.* RAINS-ASIA. An Assessment Model for Acid Deposition in Asia. The World Bank, 1997. 67 p.
2. *Дмитриев В.В., Огурцов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. № 64(2). С. 162—184. doi: 10.21638/spbu07.2019.201.
3. *Казаков Л.К.* Устойчивость и динамика ландшафтов как факторы природопользования // Рациональное природопользование: теория, практика, образование. М.: МГУ, 2012. С. 40—49.
4. *Васенькина Е.Ю.* Экономико-географическая оценка ландшафтов на основе их природного потенциала: на примере Республики Бурятия: автореф. дисс. ... к.г.н. М., 2008. 247 с.
5. *Банчева А.И.* Геоэкологическая оценка ландшафтов острова Хоккайдо (Япония): автореф. дисс. ... к.г.н. М., 2018. 144 с.
6. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 184 с.
7. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: Справочное пособие / Под ред. Безуглой Э.Ю. и Берлянда М.Е. Л.: Гидрометиздат, 1983. 328 с.
8. *Селегей Т.С.* Метеорологический потенциал самоочищения атмосферы Сибирского экономического района // Труды Зап.-Сиб. регион. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-та. Вып. 86. М.: Гидрометеоздат, 1989. С. 84—89.
9. *Григорьева Е.А., Деркачева Л.Н., Тунеголовец В.П.* Методические подходы к оценке пространственно-временной динамики самоочищающей способности атмосферы южной части Дальнего Востока // Проблемы региональной экологии. 2005. № 3. С. 33—38.
10. *Рух Y., Malkina-Rykh I.* Assessing air pollution risk potential: case study of the Tohoku district, Japan // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2011. Vol. 147. P. 267—276. doi: 10.2495/AIR110251.
11. *Осипова О.П.* Метеорологический потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природные ресурсы. 2020. № 1. С. 185—190. doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2020-1 (185-190).
12. *Аргучинцева А.В., Кочугова Е.А.* Потенциал самоочищения атмосферы // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 3—15. doi: 10.26516/2073-3402.2019.27.3.
13. *Yokoyama O., Hayashi M., Kitabayashi K., Suzuki M.* Comparative study of air pollution potential at various places in Japan. Pollution Control. 1987. № 22. P. 3—14.
14. JICA Ogata Research Institute. Research project on “A Study in Urban Air Pollution Improvement in Asia”: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.jica.go.jp/jica-ri/publication/booksandreports/175nbg00000kjwkk-att/Final_report.pdf. Дата обращения: 10.02.2022.
15. *Kawamura T.* Forecasting of air pollution potential in the South Kanto district in Japan // Atmospheric Environment. 1986. № 20 (10). P. 2068.
16. *Chatani S., Yamaji K., Sakurai T., Itahashi S., Shimadera H., Kitayama K., Hayami H.* Overview of model inter-comparison in Japan’s study for reference air quality modeling (J-STREAM). Atmosphere. 2018. № 9 (1). P. 19. doi: 10.3390/atmos9010019.
17. *Shimadera H., Hayami H., Morino Y., Ohara T., Chatani S., Hasegawa S., Kaneyasu N.* Analysis of summertime atmospheric transport of fine particulate matter in Northeast Asia. Asia-Pacific J Atmos Sci. 2013. № 49. P. 347—360. doi: 10.1007/s13143-013-0033-y.
18. Японское метеорологическое агентство. Метеорологические данные прошлых годов наблюдений: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>. Дата обращения: 08.07.2021.

References

1. *Downing R., Ramankutty R., Shah J.* RAINS-ASIA. An Assessment Model for Acid Deposition in Asia. The World Bank, 1997: 67 p.
2. *Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N.* Approaches to Assessment and GIS Mapping of Sustainability and Environmental Well-Being of Geosystems. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. Vestnik SPbSU. Earth Sciences. 2019, 64(2): 162—184. doi: 10.21638/spbu07.2019.201. [In Russian].
3. *Kazakov L.K.* Nature management factors: sustainability and dynamics of landscapes. *Racional'noe prirodopol'zovanie: teorija, praktika, obrazovanie*. Nature Management: theory, practices, education. Moscow: MSU, 2012: 40—49. [In Russian].
4. *Vasen'kina E.Ju.* *Ekonomiko-geograficheskaja ocenka landshaftov na osnove ih prirodnogo potentsiala: na primere Respubliki Burjatija*. Economical and geographical assessment of landscapes basing on their nature potential: the case of the Republic of Buryatia. PhD thesis. Moscow, 2008: 247 p. [In Russian].
5. *Bancheva A.I.* *Geojekologicheskaja ocenka landshaftov ostrova Hokkajdo (Japonija)*. Geoeological assessment of Hokkaido island landscapes (Japan). PhD thesis. Moscow, 2018: 144 p. [In Russian].
6. *Bezuglaja Je.Ju.* *Meteorologicheskii potentsial i klimaticheskie osobennosti zagriazneniia vozdukhha gorodov*. Meteorological potential and climatic features of urban air pollution. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 184 p. [In Russian].
7. *Klimaticheskie harakteristiki uslovij rasprostraneniya primesej v atmosfere*. Climatic conditions for the assimilation of pollutants in the atmosphere. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 328 p. [In Russian].
8. *Selegej T.S.* Meteorological potential for atmosphere self-purification of the Siberian economic region. *Trudy Zap.-Sib. region. nauch.-issled. gidrometeorol. instituta*. Proc. of the research and development hydrometeorological institute. 1989, 86: 84—89. [In Russian].
9. *Grigor'eva E.A., Derkacheva L.N., Tunegolovec V.P.* Methodological approaches to assessing the spatio-temporal dynamics of the self-purification ability of the atmosphere in the southern part of the Far East. *Problemy regional'noj jekologii*. Regional Environmental Issues. 2005, 3: 33—38. [In Russian].
10. *Pykh Y., Malkina-Pykh I.* Assessing air pollution risk potential: case study of the Tohoku district, Japan. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2011, 147: 267—276. doi: 10.2495/AIR110251.
11. *Osipova O.* Meteorological potential of the diffusing capacity of the atmosphere. *Geografija i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2020, 41 (1): 93—98. doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2020-1(185-190). [In Russian].
12. *Arguchintseva A.V., Kochugova E.A.* Atmospheric Self-Purification Potential. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle*. The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences. 2019, 27: 3—15. doi: 10.26516/2073-3402.2019.27.3. [In Russian].
13. *Yokoyama O., Hayashi M., Kitabayashi K., Suzuki M.* Comparative study of air pollution potential at various places in Japan. *Pollution Control*. 1987, 22: 3—14.
14. JICA Ogata Research Institute. Research project on “A Study in Urban Air Pollution Improvement in Asia”. Available at: https://www.jica.go.jp/jica-ri/publication/booksandreports/175nbg00000kjwkk-att/Final_report.pdf (accessed 10.02.2022).
15. *Kavamura T.* Forecasting of air pollution potential in the South Kanto district in Japan. *Atmospheric Environment*. 1986, 20 (10): 2068.
16. *Chatani S., Yamaji K., Sakurai T., Itahashi S., Shimadera H., Kitayama K., Hayami H.* Overview of model inter-comparison in Japan's study for reference air quality modeling (J-STREAM). *Atmosphere*. 2018, 9 (1): 19. doi: 10.3390/atmos9010019.
17. *Shimadera H., Hayami H., Morino Y., Ohara T., Chatani S., Hasegawa S., Kaneyasu N.* Analysis of summertime atmospheric transport of fine particulate matter in Northeast Asia. *Asia-Pacific J Atmos Sci*. 2013, 49: 347—360. doi: 10.1007/s13143-013-0033-y.
18. Japan Meteorological Agency. Available at: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (accessed 08.07.2021).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 13.07.2021

Принята к публикации после доработки 04.02.2022

Сведения об авторе

Банчева Александра Ивановна, канд. геогр. наук, научный сотрудник, кафедра физической географии мира и геоэкологии, Географический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, ban-sai@mail.ru.

Information about author

Bancheva Alexandra Ivanovna, PhD (Geogr. Sci.), researcher, Department of World Physical Geography and Geoecology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University.

УДК [502.51:627.2:665.61]:621.396.96

doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-81-92

**Дистанционный мониторинг нефтяных разливов
в акватории порта средствами радиолокационных систем*****В.А. Миклуш¹, Т.М. Татарникова²***¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, miklush-v@yandex.ru² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, tm-tatarn@yandex.ru

Обсуждается проблема организации экологической безопасности акватории морского порта средствами систем дистанционного мониторинга. Показано, что основным источником определения загрязнения акватории порта являются радиолокационные системы. Приведена математическая модель, доказывающая, что для надежного обнаружения нефтяных пятен на морской поверхности следует использовать радиолокационные станции миллиметрового и трехсантиметрового диапазонов длин волн. С учетом того, что радары являются неотъемлемой частью системы управления движением судна, то для решения задачи экологического контроля акватории порта предложено привлечь именно эти системы. Приводится сравнение структурного состава комплексной системы мониторинга акватории порта с системой управления движением судна, показывающее состоятельность предложения как по экономической целесообразности, так и техническим характеристикам.

Ключевые слова: система экологического мониторинга, акватория порта, радиолокационная система, обнаружение нефтяного пятна, отношение сигнал-шум, система управления движением судна.

**Remote monitoring of oil spills
in the port area by means of radar systems*****V.A. Miklush¹, T.M. Tatarnikova²***¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia² Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia

The article discusses the problem of organizing ecological safety of a seaport water area by means of remote monitoring systems. The main source for determining the pollution of the port water area is shown to be the radar systems. A mathematical model for calculating the characteristics of oil slick detection is presented. It proves the necessity to use radar stations of millimeter and 3-centimeter wavelength ranges for reliable detection of oil spills on the sea surface. Considering the fact that radars are an integral part of the ship traffic control system, it is proposed to involve these systems in order to solve the problem of environmental control of the port water area. The attractiveness of the considered implementation is determined not only by economic factors, but also by the fact that the existing radar systems as part of the ship's motion control system have a high azimuthal resolution. Vessel traffic control systems can provide complete coverage of the port water area, have redundant subsystems, operate in two wave bands, each radar system having its own processor for primary information processing. At the same time, the integration of data from various sources is already being carried out in the ship's motion control system, providing the possibility

of displaying primary radar information over an electronic map. A comparison is made of the structural composition of the integrated port water area monitoring system with the vessel traffic control system, showing the consistency of the proposal both in terms of economic feasibility and technical characteristics.

Keywords: environmental monitoring system, port water area, radar system, oil slick detection, signal-to-noise ratio, vessel traffic control system.

For citation: *V.A. Miklush, T.M. Tatarnikova. Remote monitoring of oil spills in the port area by means of radar systems. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2022, 66: 81—92. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-81-92*

Введение

Обеспечение экологической безопасности морских экосистем является одним из актуальных направлений развития методов и средств снижения экологических рисков [1, 2]. Основные экологические риски связаны с разливами нефти, буровых растворов и других опасных жидкостей, которые возникают в акваториях морских портов вследствие организации погрузки / разгрузки и транспортировки, возникновения аварий нефтеналивных танкеров, сброса с танкеров балластной воды с высокой концентрацией нефтепродуктов, аварий на буровых скважинах и платформах [3, 4].

Разлив нефтепродуктов должен быть обнаружен в кратчайшие сроки после возникновения аварийной ситуации, поскольку высокая скорость распространения нефтяных пятен в морской среде и ее способность накапливать загрязнения в донных отложениях может привести к гибели значительной части рыб, животного и растительного мира. Оперативное обнаружение нефтяных пятен на водной поверхности при любых погодных условиях и в любое время суток — одно из основных требований контроля за антропогенными нефтяными загрязнениями морской поверхности [5]. Цель статьи заключается в демонстрации возможностей систем управления движением судов при решении задачи обнаружения нефтяных пятен в акватории порта.

Структура системы мониторинга акватории порта

Как правило, структура системы мониторинга акваторий порта строится на множестве датчиков (подсистем) различной физической природы, реализующих активные и пассивные дистанционные методы наблюдения за акваторией. К этим подсистемам относятся [6]:

- телевизионные и инфракрасные;
- оптические (лидары);
- радиолокационные;
- гидроакустические;
- сейсмоакустические;
- метеостанции.

Лидары — оптические системы, осуществляющие контроль за состоянием водной поверхности при помощи оптического зондирования импульсными или непрерывными световыми потоками [7, 8].

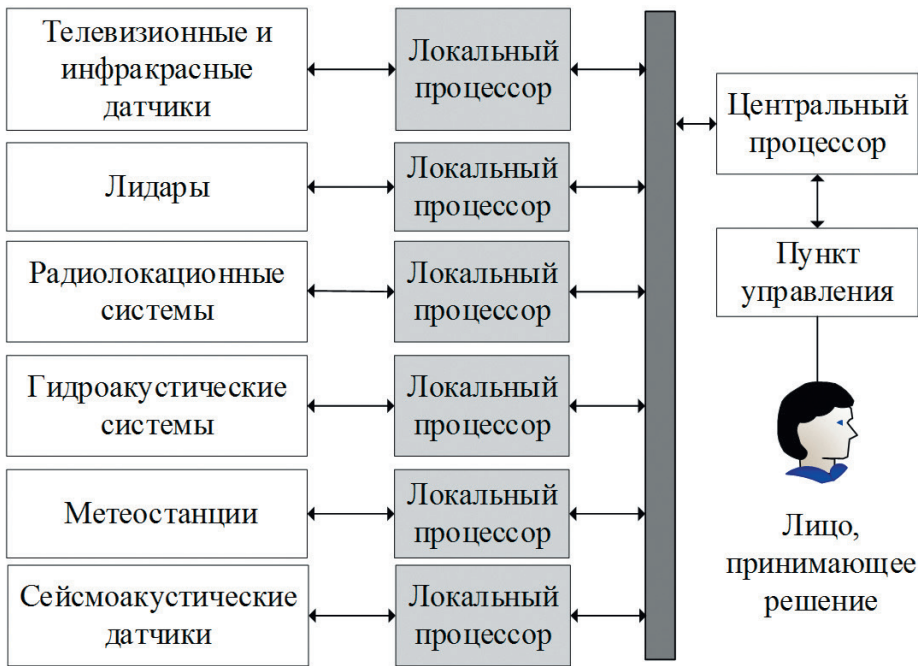


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга акватории порта.

Fig. 1. Structural diagram of the port water area monitoring system.

Радиолокационные системы (РЛС) предназначены для всепогодного дистанционного мониторинга водной поверхности в зоне ответственности и решают задачу обнаружения загрязняющих выбросов (разливов нефти) на водную поверхность с определением координат, размеров и контроля динамики загрязнений, например развитие, перемещение и т.п. [9, 10].

Гидроакустические системы используются для изучения глубинного строения толщи воды и дна, а также для определения и локации мест скопления пролитых нефтепродуктов. Гидроакустические средства наблюдения располагают под водой.

Метеостанция используется для наблюдения за характеристиками и параметрами приземного слоя тропосферы.

Каждая подсистема обладает своим локальным процессором, выполняющим функции обработки получаемых от нее данных [11, 12].

Управление работой локальных процессоров выполняется центральным процессором, который осуществляет совместную обработку данных различных подсистем и анализирует:

- радиолокационные сигналы и изображения, полученные с различных ракурсов на участок акватории;
- оптические изображения от сети телекамер;

- тепловые портреты акватории от сети инфракрасных телекамер;
- портреты акватории, полученные лазерными локаторами;
- результаты поверхностно-частотно-временной обработки сейсмоакустических сигналов;
- результаты объемно-частотно-временной обработки гидроакустических сигналов.

По результатам совместного анализа данных формируется заключение о наличии или отсутствии загрязнений на контролируемом участке акватории, количестве и качественном составе загрязняющих веществ. Заключение транслируется службам предотвращения и ликвидации загрязнений, а также передается обратно на первичные информационные подсистемы экологического мониторинга [13]. Структурная схема системы мониторинга акватории порта приведена на рис. 1.

Предложения по организации системы мониторинга акватории порта

Увеличение числа различных сенсоров и точек пространства, в которых ведется наблюдение, значительно удорожают систему мониторинга акватории порта, и перед разработчиками встает задача построения ее эффективной (но не избыточной) структуры.

Как показано выше, система мониторинга акватории порта является много-сенсорной, следовательно, с экономической точки зрения затратной [14].

Для уменьшения стоимости системы мониторинга акватории порта целесообразно рассмотреть возможность использования уже существующих в порту радиолокационных и других подсистем. Например, системы управления движением судов (СУДС). Привлекательность рассматриваемой реализации определяется не только экономическими факторами, но и тем, что существующие радиолокационные системы СУДС обладают высокой азимутальной разрешающей способностью.

Осуществляющие мониторинг морской поверхности РЛС располагаются, как правило, на берегу и в отдельных случаях на судах. Обычно и береговые, и корабельные РЛС совмещают решение задач мониторинга морской поверхности с основной навигационной задачей. Проблема дистанционного мониторинга акваторий наземными РЛС определяется малым уровнем отражений электромагнитных волн от водной поверхности при малых углах скольжения. То есть решается задача обнаружения объектов с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) и малым радиолокационным контрастом относительно фона. Необходимое качество информации об экологическом состоянии морской поверхности обеспечивается при высоком энергетическом потенциале РЛС, соответствующем требуемым вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги.

В состав оборудования СУДС включаются основные технические средства, обеспечивающие получение, обработку, отображение и регистрацию информации о судоходной и навигационной обстановке и взаимодействии с судами, в том числе береговые РЛС, также установленные на прибрежных инженерных сооружениях, средства видеонаблюдения, метеорологические и гидрологические приборы, радиопеленгаторы, линии связи, средства передачи информации и другие. Кроме

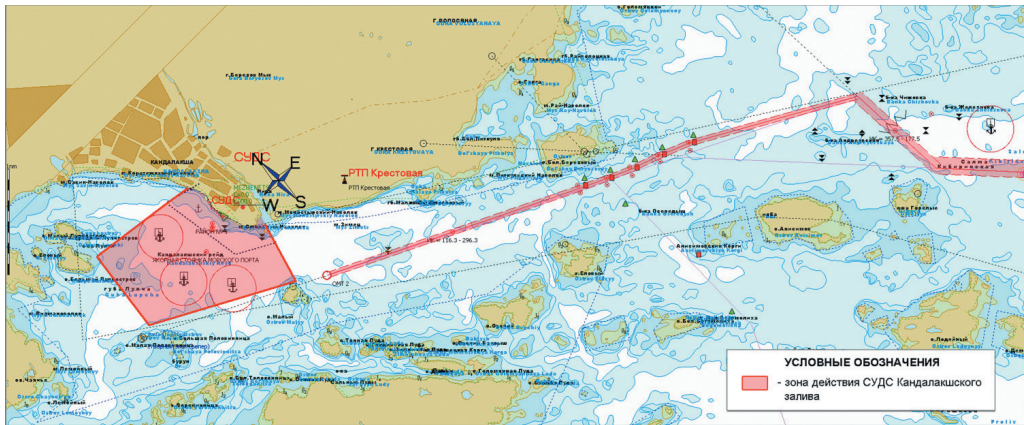


Рис. 2. Зона действия СУДС Кандалакшского залива.

Fig. 2. Coverage of the Kandalaksha Bay Vessel Traffic Control System.

того, средства обработки и отображения информации в СУДС должны обеспечивать отображение первичной радиолокационной информации на экране судовой РЛС кругового обзора на любом рабочем месте операторов с указанием РЛС — источника информации [4].

Все СУДС РФ находятся на балансе и обслуживаются персоналом ФГУП «Росморпорт». СУДС присваивается наименование морского порта, где расположен или вблизи которого расположен центр СУДС, или географического объекта, являющегося основной частью зоны действия СУДС (для СУДС, обслуживающих два или более морских порта, или СУДС, не обслуживающих морские порты). Например, в состав Мурманского филиала входят два вида:

- СУДС Кольского залива;
- СУДС Кандалакшского залива.

На рис. 2 представлена зона действия СУДС Кандалакшского залива как пример, показывающий, что зона действия СУДС включает не только акваторию порта, но и судоходные участки акватории, прилегающей к порту.

В соответствии с требованиями к СУДС в состав СУДС входят радиотехнические посты, содержащие наземные РЛС, камеры видеонаблюдения, гидрометеостанции — все те же источники информации, на которых строится система экологического мониторинга акватории порта.

Конкретно в состав СУДС Кольского залива входят:

- центр управления СУДС Кольского залива, расположенный на мысе Абрам-мыс;
- автоматизированный радиотехнический пост «Мишуково»;
- автоматизированный радиотехнический пост «Крестовый»;
- автоматизированный радиотехнический пост «Сеть-Наволоок»;
- радиотехнический пост «Абрам-мыс»;
- выносной радиотехнический пост «Терминал «Абрам-мыс»».

В режиме обособленного объекта СУДС Кольского залива функционирует радиолокационный пост «Обзор», расположенный в двух кабельтовых к северу от мыса Лагерный.

В состав СУДС Кандалакшского залива входят:

- центр СУДС порта Кандалакша;
- автоматизированный радиотехнический пост на юго-западном склоне горы Крестовая.

Результаты сравнения комплексной системы мониторинга акватории порта с СУДС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение подсистем СУДС и комплексной системы мониторинга
Comparison of subsystems of the vessel traffic management system
and the integrated monitoring system

Комплексная система мониторинга акватории порта	СУДС	Примечание
Радиолокационные	РЛС	РЛС 3 см и 10 см диапазона волн
Лидары	—	
Телевизионные и инфракрасные датчики	Система телевидения замкнутого контура	С опциональным тепловизионным каналом
Гидроакустические подсистемы	—	
Гидрометеорологическая подсистема	Гидрометеостанция	
Сейсмоакустические подсистемы	—	

Если учесть, что основным источником определения загрязнения акватории порта являются радиолокационные станции, которые есть в СУДС, то для решения задачи экологического контроля водной поверхности является целесообразным использование СУДС. При этом СУДС они обеспечивают полное перекрытие акватории порта, имеют дублирующие подсистемы, работают в двух диапазонах волн, и каждая РЛС имеет свой процессор для первичной обработки информации. При этом в СУДС уже выполняется интеграция данных от различных источников и предусмотрена возможность отображения первичной радиолокационной информации поверх электронной карты.

Математическая модель расчета характеристик обнаружения нефтяного пятна

Главным параметром для расчета характеристик обнаружения служит отношение сигнал-шум на выходе радиолокационного приемника — обнаружение отражений от водной поверхности. Спектральная плотность теплового шума (N_0 , Дж.) приемника рассчитывается по известной формуле Найквиста [9]:

$$N_0 = kT_{\text{ш}}F_{\text{ш}} \cong 4 \cdot 10^{-21} F_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $T_{\text{ш}}$ — шумовая температура приемной системы по шкале Кельвина (стандартное значение для расчетов $T_S = 290$ К); $F_{\text{ш}}$ — коэффициент шума (шум-фактор) приемника.

Для расчета энергии принимаемого сигнала используем основное уравнение радиолокации [10]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}} G^2 \sigma_{\text{ц}} \lambda^2 F^4}{(4\pi)^3 LR^4}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}}$ — средняя мощность принимаемого сигнала, Вт; $P_{\text{изл}}$ — средняя мощность излучаемого сигнала, Вт; G — коэффициент усиления антенны; $\sigma_{\text{ц}}$ — ЭПР цели, квадратные метры; λ — длина волны, м; F — интерференционный множитель (для рассматриваемой задачи $F \cong 1$); R — расстояние от РЛС до цели, м; L — энергетические потери в РЛС и на трассе распространения сигнала.

Энергия сигнала, принимаемого от точечного объекта, Дж:

$$E_{\text{пр.т}} = \frac{P_{\text{изл}} T_{\text{с}} \sigma_{\text{ц}} \lambda^2 \eta^2}{4\pi \Theta^2 \Psi^2 LR^4}, \quad (3)$$

где $T_{\text{с}}$ — длительность принимаемого сигнала, с; η — коэффициент полезного действия антенны; Θ, Ψ — ширина диаграммы направленности антенны по горизонтали и вертикали соответственно, радианы.

При получении (3) использовано выражение коэффициента усиления антенны через параметры диаграммы направленности антенны [10, 15]:

$$G = \eta \frac{4\pi}{\Theta\Psi}. \quad (4)$$

Энергия сигнала, принимаемого от поверхностно распределенного объекта:

$$E_{\text{пр.р}} = \frac{P_{\text{изл}} T_{\text{с}} \lambda^2 \eta^2 \sigma_0 \Delta R \sec \Phi}{4\pi \Theta \Psi^2 R^3 L}. \quad (5)$$

При выводе (5) учтено соотношение для определения ЭПР поверхностно распределенного объекта в случае зондирования под малыми углами скольжения [10]:

$$\sigma_{\text{р}} = \sigma_0 \Theta R \Delta R \sec \Phi, \quad (6)$$

где σ_0 — удельная ЭПР поверхностно распределенного объекта; ΔR — разрешающая способность РЛС по дальности, м; Φ — угол скольжения (для рассматриваемой задачи $\sec \Phi \cong 1$).

Из (3) и (5) следует, что повышение угловой разрешающей способности (уменьшение Θ и Ψ) целесообразно при обнаружении как точечного, так и поверхностно распределенного объектов. В РЛС систем управления движением судов применяются антенны с высокой разрешающей способностью по азимуту. Однако, в режиме кругового обзора, используемом в РЛС СУДС, длительность сигнала $T_{\text{с}}$ задается временем контакта с объектом при проходе по нему луча антенны:

$$T_C = T_{\text{ВР}} \frac{\Theta}{2\pi}, \quad (7)$$

где $T_{\text{ВР}}$ — период вращения антенны, с. В этом случае (3) и (5) видоизменяются:

$$E_{\text{ПР.Г}} = \frac{P_{\text{ИЗЛ}} T_{\text{ВР}} \sigma_{\text{Ц}} \lambda^2 \eta^2}{8\pi^2 \Theta \Psi^2 L R^4}, \quad (8)$$

$$E_{\text{ПР.Р}} = \frac{P_{\text{ИЗЛ}} T_{\text{ВР}} \lambda^2 \eta^2 \sigma_0 \Delta R}{8\pi^2 \Psi^2 L R^3}. \quad (9)$$

Энергия (8) принимаемого сигнала от точечной цели в режиме кругового обзора обратно пропорциональна ширине диаграммы направленности антенны по азимуту. Энергия (9) принимаемого сигнала от морской поверхности в режиме кругового обзора не зависит от ширины диаграммы направленности антенны по азимуту, но зависит от темпа обзора, определяемого периодом вращения антенны. Итак, выигрыш от повышения разрешающей способности по азимуту остается только для обнаружителя локализованных в пространстве объектов, что, тем не менее, обуславливает необходимость выбора высоконаправленной антенны для решения основных задач судовождения.

Целесообразно оценить возможность использования РЛС СУДС для обнаружения неоднородностей морского волнения, вызванных наличием нефтяных пятен на ее поверхности. Отношение сигнал-шум определяем как удвоенное частное (9) и (1):

$$\frac{2E_{\text{ПР.Р}}}{N_0} = \frac{P_{\text{ИЗЛ}} T_{\text{ВР}} \lambda^2 \eta^2 \sigma_0 \Delta R}{4\pi^2 \Psi^2 L R^3 k T_{\text{Ш}} F_{\text{Ш}}}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлена зависимость отношения сигнал-шум от дальности зондируемого элемента поверхности, рассчитанная в соответствии с (10) при следующих значениях параметров:

- импульсная мощность излучаемого сигнала $P_{\text{ИЗЛ.И}} = 120$ кВт;
- средняя мощность излучаемого сигнала $P_{\text{ИЗЛ}} = P_{\text{ИЗЛ.И}} / Q = 62,4$ Вт;
- период вращения антенны $T_{\text{ВР}} = 3$ с;
- длина волны излучаемого сигнала $\lambda = 3,2$ см;
- ширина ДНА по горизонтали $\Theta = 20'$ (0,0058 рад);
- ширина ДНА по вертикали $\Psi = 18^\circ$ (0,314 рад);
- КПД антенны $\eta = 0,8$;
- разрешение РЛС по дальности $\Delta R = 120$ м;
- удельная эффективная площадь рассеяния морской поверхности $\sigma_0 = 10^{-4}$, 10^{-5} и 10^{-6} ;
- коэффициент шума приемника РЛС $F_{\text{Ш}} = 2$;
- угол скольжения (минимальный) $\Phi = 0,005$ радиан или $0,3^\circ$;
- максимальная дальность до цели $\sigma_{\text{Ц}} = 10$ км;
- интерференционный множитель $F = 1$;
- энергетические потери $L = 10$.

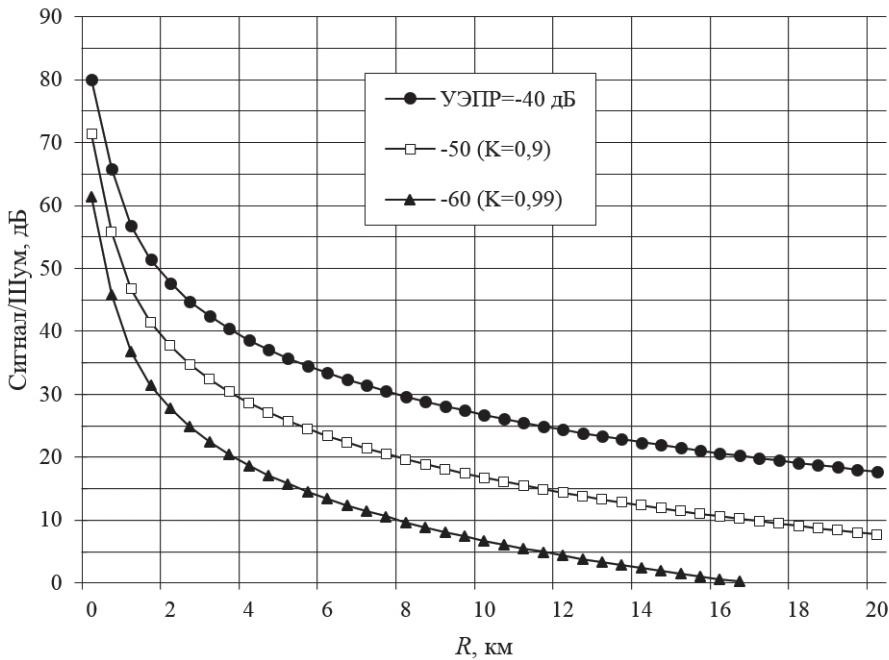


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал-шум от дальности зондируемого элемента морской поверхности для $5 < \Phi < 30$.

Fig. 3. Dependence of the signal-to-noise ratio on the distance to the sounded element of the sea surface for $5 < \Phi < 30$.

Представленные на рис. 3 графические зависимости отношения сигнал-шум рассчитаны по формуле (10) (для однократного прохода антенны) при трех значениях удельной ЭПР: -40 , -50 и -60 дБ. Расчетные данные показывают, что значения отношения сигнал-шум больше 20 дБ, обеспечивающие приемлемые характеристики обнаружения, реализуются в диапазонах дальностей 4, 8 и 17 км, соответственно.

Верхняя кривая отображает ситуацию обнаружения отражений от слабо взволнованной (не более 3 баллов) водной поверхности. Здесь мощность обнаруживаемого сигнала пропорциональна абсолютной величине ЭПР: $P_c \sim \sigma_0$. Две нижние кривые иллюстрируют возможность выявления нефтяного пятна с малым отношением сигнал-шум, равным 0,9 ($-0,5$ дБ) и 0,99 ($-0,05$ дБ). Здесь характеристики обнаружения определяются разностью мощностей обнаруживаемых сигналов от чистой воды и пятна. Разность мощностей пропорциональна разности абсолютных величин ЭПР чистой и грязной поверхностей.

Заклучение

Представленные в разделе расчеты показывают, что для надежного обнаружения неоднородностей (в том числе нефтяных пятен) на морской поверхности

следует использовать длительное накопление принимаемых сигналов. Эффективным средством повышения мощности отражений от слабо взволнованной морской поверхности является использование радиолокаторов миллиметрового и трехсантиметрового диапазонов длин волн. При решении практических вопросов обнаружения распределенных объектов на фоне морской поверхности используют отношение ЭПР распределенной цели к ЭПР фоновой площадки.

Рассмотрев требования, предъявляемые к СУДС, можно сделать вывод, что задачи обеспечения в портовых и прибрежных акваториях дистанционного сбора информации об экологическом состоянии акваторий, в том числе, обнаружение и прогнозирование динамики распространения нефтяных и других загрязнений в прибрежных зонах с интенсивным судоходством, а также другие локальные задачи дистанционного мониторинга акваторий портов, можно успешно решать с помощью радиолокационных средств, входящих в состав СУДС.

Достоинством рассматриваемой реализации мониторинга акватории порта с использованием РЛС, входящих в состав СУДС является:

- во-первых, экономическая целесообразность, обусловленная использованием уже существующих в порту радиолокационных систем;
- во-вторых, оперативность и непрерывность получения информации;
- в-третьих, высокая азимутальная разрешающая способность, существующих радиолокаторов СУДС.

Поскольку небольшие размеры зоны контроля не требуют больших дальностей действия РЛС, то их энергетического потенциала будет достаточно для обнаружения неоднородностей волнения (нефтяных пятен), вызываемых загрязнением водной поверхности при разливе нефтепродуктов.

Список литературы

1. Гурьева М.Н., Журавель Ю.Н., Тишкин Р.В. Алгоритм мониторинга экологического состояния прибрежных акваторий в районе их интенсивного хозяйственного использования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. № 3. С. 223—232. doi: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232.
2. Бескид П.П., Шишкин А.Д. Об опыте проведения экологического мониторинга состояния морской поверхности радиолокационными средствами // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2 (122). С. 20—24.
3. Lozhkina O., Rogozinsky G., Lozhkin V., Malygin I., Komashinsky V. Smart Technologies for Decision-Support in the Management of Environmental Safety of Transportation in Big Port Cities // Marine Intellectual Technologies. 2020. Vol. 1. № 2(48). P. 125—133. doi: 10.37220/MIT.2020.48.2.010.
4. Иванов А., Хлебников Д., Коновалов Б., Клименко С., Терлеева Н. Керченский пролив и его техногенное загрязнение: возможности оптического и радиолокационного зондирования // Экология и промышленность России. 2021. № 25(8). С. 21—27. doi: 10.18412/1816-0395-2021-8-21-27.
5. Коришнова Т.Ю., Логинов О.Н. Нефтяное загрязнение водной среды: особенности, влияние на различные объекты гидросферы, основные методы очистки // Экобиотех. 2019. Т. 2, № 2. С. 157—174. doi: 10.31163/2618-964X-2019-2-2-157-174.
6. Миклуш В.А., Татарникова Т.М., Палкин И.И. Решение задачи экологического мониторинга акватории порта с помощью распределенной системы датчиков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 404—411. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-404-411.
7. Polombi L., Lognoli D., Raimondi V. Fluorescence LIDAR remote sensing of oils: merging spectral and time-decay measurements // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8887. P. 88870F-1—88870F-8. doi: 10.1117/12.2030204.

8. Yang J., Gong W., Shi S., Du L., Sun J., Song S. The effective of different excitation wavelengths on the identification of plant species based on fluorescence lidar // The International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B1. P. 147—150. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-147-2016.
9. Ахияров В.В., Неведов С.И., Николаев А.И., Слукин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю. Радиолокационные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 349 с.
10. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of modern radar. Basic principles. Edison, New Jersey: SciTech Publishing, 2010. 924 p. doi: 10.1049/SBRA021E.
11. Venkatasubramanian P., Adireddy S., Tong L. Sensor networks with mobile access: Optimal random access and coding // IEEE J. Sel. Areas Commun. Special Issue on Sensor Networks. 2004. Vol. 22. P. 1058—1068. doi: 10.1109/JSAC.2004.830899.
12. Бескид П. П., Богданов П.Ю., Миклуш В.А., Татарникова Т.М., Чернецова Е.А., Шишкин А.Д. Результаты исследований в области дистанционных методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности, проводимых в РГГМУ // Гидрометеорология и экология. 2020. № 60. С. 371—391. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-371-391.
13. Беликов В.А., Галанин В.В., Орлов С.П. Анализ данных дистанционного зондирования земли для обнаружения нефтяных разливов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2017. Т. 25. № 2. С. 7—12. doi: 10.14498/tech.2017.2.%u.
14. Dziubenko I.N., Tatarnikova T.M. Algorithm for solving optimal sensor devices placement problem in areas with natural obstacles // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 1—4. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604325.
15. Berenshtein I., Paris C.B., Perlin N., Alloy M.M., Joye S.B., Murawski S. Invisible oil beyond the Deepwater Horizon satellite footprint. Sci Adv. 2020. Vol. 6(7). P. 1—11. doi: 10.1126/sciadv.aaw8863.

References

1. Guryeva M.N., Zhuravel Y.N., Tishkin R.V. Algorithm of monitoring the ecological state of coastal waters in areas of heavy economic use. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016, 15(3): 223—232. doi: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-223-232. [In Russian].
2. Beskid P.P., Shishkin A.D. On the experience of environmental monitoring of the state of the sea surface by radar tools. *Bezopasnost' zhiznedeyate*. Life Safety. 2011, 2(122): 20—24. [In Russian].
3. Lozhkina O., Rogozinsky G., Lozhkin V., Malygin I., Komashinsky V. Smart Technologies for Decision-Support in the Management of Environmental Safety of Transportation in Big Port Cities. *Marine Intellectual Technologies*. 2020, 2(48): 125—133. doi: 10.37220/MIT.2020.48.2.010.
4. Ivanov A., Khlebnikov D., Konovalov B., Klimenko S., Terleeva N. Kerch Strait and Its Technogenic Pollution: Possibilities of Optical and Radar Remote Sensing. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. Ecology and Industry of Russia. 2021, 25(8): 21—27. doi: 10.18412/1816-0395-2021-8-21-27. [In Russian].
5. Korshunova T.Yu., Loginov O.N. Oil pollution of water environment: features, influence of various objects of hydrosphere, main methods for cleaning. *Ekobiotekh*. Ecobiotech Journal. 2019, 2(2): 157—174. doi: 10.31163/2618-964X-2019-2-2-157-174. [In Russian].
6. Miklush V.A., Tatarnikova T.M., Palkin I.I. Solving the problem of environmental monitoring of a port water area using a distributed system of sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroeniye*. Journal of Instrument Engineering. 2021, 64(5): 404—411. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-404-411. [In Russian].
7. Polombi L., Lognoli D., Raimondi V. Fluorescence LIDAR remote sensing of oils: merging spectral and time-decay measurements. *Proceedings of SPIE*. 2013, 8887: 88870F-1—88870F-8. doi: 10.1117/12.2030204.
8. Yang J., Gong W., Shi S., Du L., Sun J., Song S. The effective of different excitation wavelengths on the identification of plant species based on fluorescence lidar. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences*. 2016, XLI-B1: 147—150. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-147-2016.
9. Akhiyarov V.V., Nefedov S.I., Nikolaev A.I., Slukin G.P., Fedorov I.B., Shustikov V.Yu. *Radiolokatsionnyye sistemy*. Radar systems. Moscow: MSTU by N.E. Bauman Publ., 2016: 349 p. [In Russian].

10. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. Principles of modern radar. Basic principles. Edison, New Jersey: SciTech Publishing, 2010: 924 p. doi: 10.1049/SBRA021E.
11. Venkatasubramaniam P., Adireddy S., Tong L. Sensor networks with mobile access: Optimal random access and coding. IEEE J. Sel. Areas Commun. Special Issue on Sensor Networks. 2004, 22: 1058—1068. doi: 10.1109/JSAC.2004.830899.
12. Beskid P.P., Bogdanov P.Yu., Miklush V.A., Tatarnikova T.M., Chernetsova E.A., Shishkin A.D. Results of research in the field of remote sensing methods for detecting oil pollution on the water surface conducted at RSHU. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 60: 371—391. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-371-391. [In Russian].
13. Belikov V.A., Galyanin V.V., Orlov S.P. Analysis of earth remote sensing data for oil spill detection. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2017, 25(2):7—12. doi: 10.14498/tech.2017.2.%u.
14. Dziubenko I.N., Tatarnikova T.M. Algorithm for solving optimal sensor devices placement problem in areas with natural obstacles. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018: 1—4. doi: 10.1109/WECONF.2018.8604325.
15. Berenshtein I., Paris C.B., Perlin N., Alloy M.M., Joye S.B., Murawski S. Invisible oil beyond the Deep-water Horizon satellite footprint. *Sci Adv*. 2020, 6(7): 1—11. doi: 10.1126/sciadv.aaw8863.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 15.01.2022

Принята в печать 02.02.2022

Сведения об авторах

Миклуш Виктория Александровна, старший преподаватель кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского аэрокосмического университета, miklish-v@yandex.ru.

Татарникова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, профессор кафедры Информационные системы Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), tm-tatarn@yandex.ru.

Information about authors

Miklush Victoria Alexandrovna, Senior Lecturer, Department of Information and Network Technologies of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Tatarnikova Tatiana Mikhailovna, Grand PhD (Tech. Sci.), Professor, Department of Information Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК 94(470)"1812"

doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-93-103

**Наполеон и «генерал Мороз» в войне 1812 года
(К 210-й годовщине Отечественной войны 1812 года)***А.И. Угрюмов¹, Е.В. Соколикхина², Н.Н. Соколикхина³*¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, ugrymov-met@mail.ru² «Научно-производственный центр «Мэп Мейкер», Москва, elena.sokolikhina@gmail.com³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, elena.sokolikhina@gmail.com

В статье рассматривается влияние морозов на боеспособность французской армии при ее отступлении из Москвы в 1812 г. На основании сравнительного анализа температуры воздуха на пути отступления французов и численности их воинов, участвовавших в сражениях при Малоярославце, Вязьме и Красном, показано, что морозы начали разрушать дееспособность французской армии уже через две недели после ее выхода из Москвы. Ко времени перехода французской армии через Березину она уже потеряла множество солдат, а дошедшие до переправы представляли собой плохо организованную толпу. Морозы 9—18 ноября, в первый период отступления французов (до Березины), оказались хорошим помощником русской армии в стратегии изгнания Наполеона из России.

Ключевые слова: война 1812 года, французская армия, отступление, морозы, дезорганизация армии.

**Napoleon and «general Frost» in 1812 war
(To 210-year anniversary of the Fatherland War 1812-year)***A.I. Ugrymov¹, E.V. Sokolikhina², N.N. Sokolikhina³*¹ Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia² Science and Production Center «Map Maker», Moscow, Russia³ Moscow State University Lomonosov, Russia

The article considers the comparison of temperature conditions on the way of the retreating French army from Moscow and the quantity of French soldiers in the battles with the Russian army near Maloyaroslavets, Viasma and Krasny. Based on this comparison it was demonstrated that severe frost began to destruct French army two weeks after leaving Moscow. The number of French soldiers in the battle near Maloyaroslavets was approximately the same when leaving Moscow (105 000 people). Air temperature that day was near 3—5 degrees below freezing. In the next battle near Viasma their number decreased to 40 000 people, being the result of the sudden drop of air temperature to 12—17 degrees below freezing since November 9, 1812. These conditions lasted for 9 days. Many of soldiers, having no warm wear and food, deserted or were frozen to death. It was this period when the destruction of the French army began. By the time of forcing the Beresina river the Great army lost a great number of soldiers, and those reaching it represented a badly organized crowd. Therefore, the frosts during November 9—18, 1812 turned out to be a good assistant for the Russian army in the strategy for Napoleon's banishment from Russia.

Keywords: war of 1812, French army, retreat, frost, army destruction.

For citation: *A.I. Ugrumov, E.V. Sokolikhina, N.N. Sokolikhina. Napoleon and «general Frost» in 1812 war. (To 210-year anniversary of the Fatherland War 1812-year). *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2022, 66: 93—103. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-93-103*

Введение

История показывает, что успешность военных действий иногда значительно зависит от условий погоды. Пожалуй, одним из наиболее ярких примеров этой зависимости является военная кампания Наполеона против России в 1812 г. Как известно, Наполеон вторгся в Россию летом 1812 г. с огромной армией, состоявшей не только из французов, но и из множества войск государств-сателлитов покоренной им Европы. Всего на территории России в разное время побывало 610 000 человек так называемой Великой армии Наполеона [1]. Целью Бонапарта было не завоевание страны и лишения ее государственного статуса, а только принуждение к соблюдению континентальной блокады Англии. Не добившись своей цели на первом этапе похода, даже после грандиозного сражения при Бородине и захвата Москвы, Наполеон начал отступление, которое составляет второй этап его неудавшегося похода. Именно во время отступления глубокой осенью и в начале зимы на французскую армию, теснимую искусными действиями фельдмаршала М.И. Кутузова, обрушились холода, к которым французы были совершенно не готовы. Ведь Наполеон планировал кампанию на месяц-полтора и не обеспечил свою армию теплой одеждой.

В русской, а затем и в советской историографии Отечественной войны 1812 года традиционно установилось, что чувствительные для отступающих французов морозы начались только после их перехода через Березину, 28 ноября. На самом деле, влияние морозов на отступающих французов проявилось гораздо раньше, всего через две недели после их выхода из Москвы. Именно с этих морозов началась деморализация и распад французской армии как организованной силы.

Цель статьи — на основе совместного анализа температурных условий и численности боеспособной части французской армии на пути ее отступления из Москвы показать, что именно первые морозы, встреченные французами 9—18 ноября, привели к потере боеспособности значительной части французской армии.

Материалы и методика исследования

Основой полученных выводов послужил совместный анализ температуры воздуха и явлений погоды на пути отступления французской армии и данных о количестве французов-участников боев с русской армией на этом пути.

Временной ход температуры воздуха восстановлен по следующим источникам:

- измерения самих французов [2];
- измерения Виленской обсерватории [2];
- статья советского исследователя С.П. Хромова [3];
- сочинение Д.В. Давыдова «Мороз ли истребил французскую армию в 1812 году?» [4].

Все значения температуры воздуха приведены к градусам Цельсия (в России использовалась шкала Реомюра). Данные перечисленных источников мало отличаются друг от друга, поэтому восстановленный ход температуры воздуха можно считать достоверным.

Численность французской армии взята из реляций об участниках сражений с русскими при ее отступлении, т. е. фактически — о боеспособных воинах. Эти данные взяты из следующих источников:

- обзор войн России от Петра Великого до наших дней (1885 г.) [5];
- *Керсновский А.А.* История русской армии (переиздание 1992 г.) [6];
- *Строков А.А.* История военного искусства (1965 г.) [1].

После анализа исходного материала был составлен совмещенный график временного хода температуры воздуха и численности боеспособной части французской армии. На графике указаны пункты отступления и даты, когда французы их оставили, а также количество французов-участников сражений (рис. 1). Все даты даны по Григорианскому календарю, принятому в Европе (по новому стилю, в русской редакции).

Отечественная война 1812 года в главных чертах

Перешедшие Неман (граница тогдашней России) французские войска уже в первом эшелоне (378 000 чел.) более чем в два раза превосходили по численности русскую армию, сосредоточенную около границы (153 000 чел.) [6]. В этих условиях военный министр и главнокомандующий полевой армией М.Б. Барклай де Толли принял единственно правильное решение к быстрому отступлению, чтобы избежать смертельного для армии генерального сражения. Сменивший его на посту фельдмаршал М.И. Кутузов продолжил стратегию Барклая и даже сдал Москву, стремясь сохранить и усилить армию для дальнейших действий. Пройдя Москву, Кутузов резко повернул к югу и занял позицию около села Тарутино Калужской губернии, тем самым заслонив дорогу французам в богатые продовольствием южные губернии России.

Сдача Москвы произошла не так, как привык Наполеон захватывать столицы, он ждал «бояр» с ключами от города, но они все не шли. Тогда он вступил в Москву и увидел брошенный город, который вскоре загорелся. Многочисленные предложения Наполеона о мире не нашли сочувствия ни у командования русской армии, ни у императора Александра I и остались без ответа. Пробыв в Москве 34 дня, Наполеон решил отступить, ведь впереди маячила зима. И вот 19 октября 1812 г. французская армия, обремененная обозами награбленного, вышла из Москвы в обратный путь.

Все дальнейшие действия Кутузова были направлены на то, чтобы не допустить французов к плодородному югу, а заставить отступить их по ранее разоренной Старой Смоленской дороге [1]. Последовал параллельный французам фланговый марш русской армии, сражения при Тарутино (18 октября), Малоярославце (24 октября), Вязьме (3 ноября) и Красном (15—18 ноября), так и не позволившие Наполеону свернуть в богатые продовольствием южные губернии. Отступая,



Рис. 1. Температура воздуха на пути отступления французской армии и количество ее воинов.

Fig. 1. Air temperature on the way of retreating French army and its soldier's quantity.

французы теряли голодных и обессиливших людей и лошадей, артиллерию и обозы, лишившиеся тяги. Остатки Великой армии, с трудом переправившиеся через Березину 26—28 ноября, кое-как дошли до Немана 14 декабря. Еще раньше 6 декабря в Сморгони Наполеон оставил армию на маршала Мюрата, устремившись в Париж набирать новую военную силу.

Немногие брошенные воины некогда Великой армии ушли в Пруссию. В разных источниках указывается разное число вышедших за пределы России, мы остановимся на цифре одного прусского чиновника, насчитавшего 38 316 человек, прошедших через Восточную Пруссию, т. е. чуть более 6 % от общего числа агрессоров [7]. Многие из них вследствие истощения там же и закончили свой жизненный путь.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, прежде всего, обращает на себя внимание резкое снижение численности французской армии с начала ее отступления из Москвы (19 октября) и до Вязьмы (3 ноября) — со 110 000 до 40 000 чел. В Смоленске Наполеон задержался на четыре дня, и часть отстающих подтянулась к армии, но все равно ее численность при выходе из Смоленска не превышала 50 000 чел. Таким образом, со времени выхода французов из Москвы была потеряна почти половина армии. В чем же заключались эти потери?

За это время состоялось три больших сражения французов с русскими войсками: Тарутино (р. Чернишня), Малоярославец и Вязьма. Подсчитаем потери французов в этих сражениях, считая убитых, раненых и пленных вместе. В результате боя при Тарутине (р. Чернишня) потери французов составили 7 000 чел., боевые потери французов при Малоярославце — 6 000 чел., при Вязьме — 9 000 чел. Итого за три сражения французы потеряли 22 000 чел. При этом мы взяли максимальные по приведенным источникам потери. Следовательно, к Смоленску во французской армии должно было остаться: 110 000 французов, вышедших из Москвы, минус 22 000 чел. боевых потерь = 88 000 чел. А осталось в лучшем случае всего 50 000 чел. Куда же делись остальные 38 000 чел., два полноценных корпуса французской армии?

Обратим внимание на температуру воздуха. От Москвы до Вязьмы (3 ноября) отступление французов происходило при «бодрящих» температурах -3 , -5 °С, распутица была скована, армия продвигалась легко, несмотря на многочисленные обозы. Но уже 4 ноября выпал первый снег, а 6-го установился снежный покров, и температура воздуха начала стремительно падать. Прошел холодный фронт, как говорят метеорологи, и за ним осуществилось вторжение арктического воздуха. Уже в Дорогобуже 9 ноября температура упала до -12 °С, к Смоленску она достигла -17 °С, по достижении Красного 18 ноября была около -10 °С.

Итак, в течение первого периода отступления (Москва—Красный) французам довелось испытать целых девять дней непривычных для них морозов в сочетании с голодом, большими переходами и стоянками под открытым небом. По нашему мнению, именно эти морозы и привели к потере 38 000 боеспособных воинов Великой армии, деморализации, дезертирству и началу ее распада как организованной силы. Действительно, маршал Ней, начальник арьергарда армии на этом этапе отступления, докладывал Наполеону, что уже после Вязьмы за боеспособными частями тянулась толпа безоружных в 30 000 человек [5].

В конце всей эпопеи 1812 г. перед Наполеоном встала задача хоть как-нибудь оправдать впервые с ним случившийся грандиозный провал военной операции.

Обычно все действия Великой армии освещались в специальных Бюллетенях для армии и Франции. И вот 3 декабря в Молодечно Наполеон продиктовал последний 29-й Бюллетень о пребывании французской армии в России. В нем говорилось о том, что могло оправдать гибель армии [8].

«Морозы, начавшиеся с 7-го числа ноября, вдруг увеличились... Дороги покрылись гололедицей, и обозные лошади падали каждую ночь не сотнями, а тысячами. Вся конница осталась пешей, артиллерия и обозы без лошадей. Мы принуждены были большую часть своих пушек, также военных и съестных припасов оставить на дороге или истребить..., поэтому надлежало продолжать поход свой, дабы не быть принужденными вступить в сражение». Основной посыл 29-го Бюллетеня — морозы лишили Великую армию побед. Очевидно, это преувеличение. Именно искусные действия русской армии заставили французов отступать по ранее разоренному пути, испытывая голод и отсутствие теплых стоянок. Однако и сильные морозы сыграли свою роль в деморализации и разложении армии Наполеона.

Версию Наполеона с удовольствием подхватил так называемый «коллективный Запад», и точка зрения, что главным виновником поражения французов стал «генерал Мороз», жива до сих пор. Борьбу с ней начали русские авторы, сами участники Отечественной войны 1812 года. Русский офицер Н.Е. Митаревский, прошедший всю кампанию 1812 г. вплоть до изгнания французов из России, в своих воспоминаниях писал: что «иностранные писатели все почти единодушно приписывают истребление наполеоновской армии голоду и морозам, то это неудивительно. Все почти имели там своих представителей, и не сознаться же им перед целым светом и потомством, что истребили их действия русских армий» [9].



Рис. 2. В.В. Верещагин. Ночной привал Великой армии.

Fig. 2. V.V. Vereshchagin. Night bivouac of Great army.

Наиболее развернутую критику западной версии гибели французской армии только из-за морозов дал легендарный партизан, гусар и поэт Денис Васильевич Давыдов в небольшой книге «Мороз ли истребил французскую армию в 1812 году?» [4]. Как пишет Давыдов: «Все это приводит нас к тому уверению, что не стужа, а другое обстоятельство — причиною разрушения гигантского ополчения... Читая представленные мною выписки (других авторов — А.У.), можно ясно видеть согласие всех историков кампании насчет причин события. Они полагают, что эти причины состоят: во-первых, в голоде, претерпленном французской армиею; во-вторых, в непрерывных усиленных переходах и, в-третьих, в кочевье под открытым небом». Повторим, что в эти условия французов загнали действия русской армии.

По состоянию погоды Давыдов делит отступление французов на две «эпохи», про которые пишет так: «Доказано же, что в течение двадцати шести дней, составляющих первую эпоху, мороз от двенадцати до семнадцати градусов продолжался не более трех или пяти суток, а во второй — мороз достиг от двадцати до двадцати пяти градусов и продолжался двадцать два дня, почти непрерывно... в первой эпохе влияние холода было весьма слабо на неприятельскую армию; во второй — истинно для нее губительно».

Соглашаясь в главном выводе нашего легендарного партизана, что голод и ночлеги под открытым небом были причиной упадка Великой армии вследствие искусных действий Кутузова, не очень верится, что морозы первой «эпохи» отступления тут совсем не причем. Факты, приведенные выше, свидетельствуют об обратном. Здесь мы согласны с положениями 29-го Бюллетеня Наполеона. Ведь Великая армия совершенно не была подготовлена к зимним условиям, отступить с морозами до -17 градусов пришлось практически в летней одежде, едва прикрытой где-то подобранными обносками, а тут еще и голод. Кто-то замерз, кто-то дезертировал или отстал, превратившись в известных «шерамыжников», выпрашивавших милостыню у населения. Некоторые объединялись и силой захватывали в окрестных деревнях, что еще в них осталось. К Смоленску таких накопилось почти 40 000 чел.

Ликвидацией рассеянных вдоль пути отступления французской армии оставших и дезертиров занимались созданные еще раньше партизанские отряды из профессиональных военных. Уже при выходе французов из Москвы она была обложена «партиями» военных партизан, как их тогда называли: Давыдов, Сеславин, Фигнер, Кудашев и др. Позднее в борьбу с деморализованными французами включились стихийно возникшие крестьянские отряды. Д.В. Давыдов считал, что более трети французских пленных взяли именно партизанские отряды [7].

На картине И.М. Прянишникова (рис. 3), созданной им под впечатлением от эпопеи «Война и мир» Л.Н. Толстого, изображены пленные, взятые известной старостихой Василисой именно в первый период отступления французов, еще до Березины, когда морозы можно было перетерпеть. Но разложение армии захватчиков уже было очевидно. Еще как-то держалась гвардия Наполеона, снабжаемая им пищей и ночлегом в первую очередь [10].



Рис. 3. И.М. Прянишников. Французы в 1812 году.

Fig. 3. I.M. Pryanischnikov. Frenches in 1812-year.



Рис. 4. Януарий Суходольский. Переход Наполеона через Березину. 1866 г.

Fig. 4. January Suchodolski. Napoleon forcing of Beresina-river. 1866.

Часто приходится слышать, что русские солдаты терпели те же морозы. Однако они были снабжены шинелями, которые ввел в армии император Павел I, кроме того, заботливые начальники войск заказывали солдатам шерстяные и даже меховые жилеты под холодные мундиры. Это не французы в летнем одеянии, кое-как прикрытые добытыми в Москве и по дороге лохмотьями.

После поражения Великой армии в трехдневном бое при Красном была оттепель, но это уже ничего не меняло, разве что затруднило переправу французов через Березину, поскольку она не замерзла. Несмотря на, казалось бы, полное окружение Бонапарта при Березине — Кутузов с тыла, 40 000 свежих русских войск Чичагова подошли с юга и закрыли дорогу французам на запад, с севера подходил Витгенштейн — Наполеону удалось обмануть всех. Чичагов ждал его у Борисова, а он, устроив там демонстрацию, начал переправу севернее, у деревни Студянка. Саперам пришлось навести два моста, по которым остатки Великой армии и переправились. Но по ним отступала уже не армия, а 45 000 деморализованных людей, из которых 30 000 погибли или были взяты в плен [7, 11].

Уже в конце переправы 28 ноября произошло еще одно арктическое вторжение, и температура воздуха понизилась до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потом и до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой она и держалась вплоть до 14 декабря, до перехода французов через Неман и выхода за пределы России.

Великая эпопея 1812 года закончилась славой для русского оружия, стратегия Кутузова успешно выгнала французов из России. Но не следует, однако, забывать и о природных факторах, о «генерале Морозе», помогавшем русской армии уже на первом этапе отступления французов.

Заключение

В дореволюционной русской, а затем и в советской историографии Отечественной войны 1812 года традиционно считалось, что при отступлении французов из Москвы пагубное влияние на них морозов началось только после форсирования Березины. В настоящей работе показано, что деморализация и распад бывшей Великой армии Наполеона начались значительно раньше, на переходе от Вязьмы до Смоленска и Красного, когда 9—18 ноября ударили первые арктические морозы от -12 до -17 градусов Цельсия. Плохо одетая, голодающая армия французов, лишенная теплых ночлегов, не смогла вынести этого удара стихии, и число ее боеспособных воинов к переходу через р. Березину сократилось с 110 000 чел., вышедших из Москвы, до 45 000 чел. Остальные погибли в сражениях, но большинство бросило оружие и рассеялось по пути отступления, либо замерзло, а достигшие Березины превратились за малым исключением в плохо организованную толпу. Вот что сделали первые морозы 9—18 ноября 1812 г. с французами во время отступления. Это, конечно, не умаляет мудрую стратегию



Рис. 5. В.В. Верещагин. Наполеон в зимнем одеянии.

Fig. 5. V.V. Vereshchagin. Napoleon in the winter crouth.

М.И. Кутузова, направившую французов на разоренную Старую Смоленскую дорогу, где они почти сразу встретили и первые арктические морозы.

Список литературы

1. *Строков А.А.* История военного искусства. Капиталистическое общество. От Французской буржуазной революции до периода империализма. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1965. 690 с.
2. *Михайловский-Данилевский А.И.* Описание Отечественной войны в 1812 году. Часть четвертая. СПб., 1839. 397 с.
3. *Хромов С.П.* Морозы и война 1812 г. // *Погода*. 1941. № 8. С. 18—22.
4. *Давыдов Д.В.* Мороз ли истребил французскую армию в 1812 году? // *Давыдов Д.В.* Сочинения. М., 1962. С. 407—421.
5. Обзор войн России от Петра Великого до наших дней Часть I / Под. ред. генерал-лейтенанта Леера. СПб., 1885. 459 с.
6. *Керсновский А.А.* История русской армии. Том первый. От Нарвы до Парижа, 1700—1814 гг. М.: Голос, 1992. 303 с.
7. *Давыдов Д.В.* Дневник партизанских действий 1812 года // Соч. М.: Гос. изд-во худ. литературы, 1962. С. 310—406.
8. *Markham D.* Imperial Glory: Napoleon's Army Bulletin 1805—1814. L.: Greenhill, 2003. 118 с.
9. *Митаревский Н.Е.* Воспоминания о войне 1812 года. М., 1871. 176 с.
10. *Тарле Е.В.* Наполеон. М.: Воениздат, 1939. 520 с.
11. *Манфред А.З.* Наполеон Бонапарт. М.: Мысль, 1987. 734 с.

References

1. *Strokov A.A.* Istorია voennogo iskustva. Kapitalisticheskoe obshchestvo. Ot Frantsuzskoi burzhuaznoi revoliutsii do perioda imperializma. History of military art. Capitalistic society. From the French Revolution to imperialism period. Moscow: Military publishing house of the Defense Ministry of USSR, 1965: 690 p. [In Russian].
2. *Mikhailovskiy-Danilevskiy A.I.* Opisanie Otechestvennoy voiny 1812 goda. Chast chetvertaya. Description of the Patriotic war 1812-year. Chapter fourth. St-Petersburg, 1839: 397 p. [In Russian].
3. *Hromov S.P.* Frosts and the war 1812-year. *Pogoda*. Weather, 1941, 8: 18—22. [In Russian].
4. *Davidov D.V.* Was it frost destroyed the French army in 1812-year? *Denis Davidov. Sochineniya*. Denis Davidov. Essay. Moscow, 1962: 407—421. [In Russian].
5. *Obzor voyn Rossii ot Petra Velikogo do nashih dney*. Survey of Russian wars from Peter the Great to our times. Edited by general-lieutenant Leer. Chapter I. St-Petersburg, 1885: 459 p. [In Russian].
6. *Kersnovskiy A.A.* Istorია Russkoy armii. Tom perviy. Ot Narvy do Parija, 1700—1814. History of Russian army. Volume first. From Narva to Paris, 1700—1814. Moscow: Publishing house Golos, 1992: 303 p. [In Russian].
7. *Davidov D.V.* The Diary of partisan actions of 1812-year. *Denis Davidov. Sochineniya*. Denis Davidov. Essay. Moscow, 1962: 310—406. [In Russian].
8. *Markham D.* Imperial Glory: Napoleon's Army Bulletin 1805—1814. Leningrad: Greenhill, 2003: 118 p.
9. *Mitarevskiy N.E.* Vospominaniya o voine 1812 goda. Memories on the War 1812-year. Moscow, 1871: 176 p. [In Russian].
10. *Tarle E.V.* Napoleon. Moscow: Military publishing house, 1939: 520 p. [In Russian].
11. *Manfred A.Z.* Napoleon Bonapart. Napoleon Bonaparte. Moscow: Mysl, 1987: 734 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.12.2021
Принята в печать 14.02.2022

Сведения об авторах

Угрюмов Александр Иванович, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ugriumov-met@mail.ru.

Соколикхина Елена Владимировна, канд. геогр. наук, ведущий метеоролог, «Научно-производственный центр «Мэп Мейкер», Москва, elena.sokolikhina@gmail.com.

Соколикхина Наталья Николаевна, канд. геогр. наук, доцент, доцент кафедры метеорологии и климатологии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, elena.sokolikhina@gmail.com.

Information about authors

Ugriumov Aleksander Ivanovich, Grand PhD (Geogr. Sci.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg.

Sokholikhina Elena Vladimirovna, PhD (Geogr. Sci.), Science and Production Center «Map Maker», Moscow.

Sokholikhina Natalia Nikolaevna, PhD (Geogr. Sci.), Associate Professor, Moscow State University Lomonosov.

УДК 001.891:550.3

doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-104-109

К инициативе проведения Пятого международного полярного года

А.Н. Чилингаров, В.Л. Михеев, Ю.Ф. Сычев

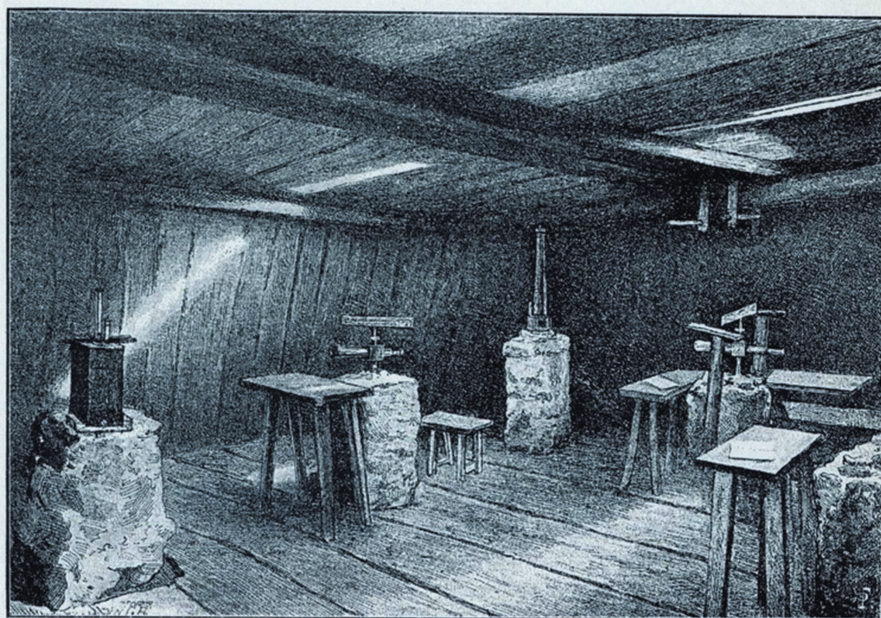
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
yury.sychev@gmail.com

Интерес человечества к полярным областям Земли, особенно к Арктике, имеет многовековую историю. Однако лишь в конце XIX в. произошел перелом в понимании необходимости исследований обеих полярных областей планеты. Так, в 1875 г. известный австрийский полярный исследователь Карл Вайпрехт предложил провести комплексные исследования на основе широкого международного сотрудничества по общей программе и единой методике одновременно в Арктике и Антарктике. Идея получила поддержку, и в 1882 г. дан был старт Первому международному полярному году (МПГ). Это произошло на конференции Международной полярной комиссии в Петербурге.

В течение Первого международного полярного года (1882—1883 гг., участие принимали 12 стран) наблюдения выполнялись на 11 станциях в Северном полушарии (рис. 1) и на двух станциях в Субантарктике. Он проводился под руководством Международной полярной комиссии, созданной Международной метеорологической организацией (ММО) и возглавлявшейся вначале Г. фон Неймайером (Германия), а затем Г. Вильде (Россия).

Второй Международный полярный год проводился в 1932—1933 гг. Объем наблюдений был существенно уменьшен из-за мировой депрессии, разразившейся в эти годы. Тем не менее, Второй МПГ сыграл большую роль в развитии методов гидрометеорологических и ледовых прогнозов, в определении особенностей гидрометеорологического режима Арктики, в исследованиях геомагнитного поля, распространении радиоволн. В нем принимали участие 44 страны, а также специальные экспедиции с использованием судов и самолетов. Следствием Второго МПГ стало создание в мае 1937 г. первой дрейфующей станции на Северном полюсе, открывшей целую эпоху наблюдений на дрейфующих льдах в Центральной Арктике.

Принято считать, что Третий МПГ был частью программы Международного геофизического года 1957—1958 гг., когда исследования в полярных областях Земли достигли беспрецедентного размаха. В эти годы в обеих полярных областях Земли были получены новые сведения об атмосфере, океане и оледенении, был инициирован ряд крупных международных проектов по изучению различных компонентов окружающей среды полярных областей, началась эра космических исследований. Именно результаты Третьего МПГ привели в разгар холодной



Помѣщеніе съ приборами Купфера. — Jurte mit den Kupferschen Instrumenten.



»Паузокъ« и »Карбазъ«. — »Pausok« und »Karbas«.

Рис. 1. Выполнение исследований российскими учеными во время Первого международного полярного года.

войны к созданию системы международного обмена данными и мировых центров данных.

Спустя почти 50 лет, в 2001 г., Россия выступила с инициативой проведения широкомасштабных исследований в Арктике и Антарктике в рамках проведения Четвертого МПГ. Эта инициатива была поддержана Всемирной метеорологической организацией на 14-м Всемирном метеорологическом конгрессе (2003 г.) и Исполнительным комитетом Международного совета научных союзов (2004 г.). В 2005 г. Всемирная метеорологическая организация (WMO) и Международный совет по науке (ICSU) учредили Объединенный организационный комитет МПГ, и 1 марта 2007 г. в офисе Межправительственная океанографическая комиссия ЮНЕСКО в Париже было объявлено об официальном начале Международного полярного года. Таким образом, понадобилось всего шесть лет, чтобы пройти путь от выступления России с этой инициативой до ее успешного воплощения.

Четвертый МПГ (2007—2008 гг.) (рис. 2) представлял собой крупномасштабный международный научный эксперимент, включающий в себя проведение согласованных по времени, пространству и методическому обеспечению научных мероприятий по сбору и анализу фактических данных о состоянии окружающей среды в ключевых районах полярных областей Земли. В рамках Четвертого МПГ было выполнено 228 международных проектов, в которых приняли участие 50 тыс. ученых из более чем 60 стран. При проведении МПГ многие страны существенно расширили полярные исследования. На рис. 3 приводятся схемы маршрутов российских научно-исследовательских судов и дрейфующих станций СП-35 и СП-36 за период проведения Четвертого МПГ. В результате были получены новые научные данные, возникла научная инфраструктура, получили развитие новые технологии моделирования и наблюдений.

Необходимость продолжения наблюдений в полярных областях стало ядром инициативы проведения Международного полярного десятилетия (МПД), с которой выступила Российская Федерация на завершающем этапе Четвертого МПГ. В отличие от МПГ, который являлся единовременной кампанией, Международное полярное десятилетие должно было стать согласованной программой, реализуемой в течение длительного периода. Необходимость организации МПД была



Рис. 2. Четвертый международный полярный год 2007—2008.



Рис. 3. Схемы маршрутов научно-исследовательских судов и дрейфующих станций СП-35 и СП-36 в течение Четвертого международного полярного года.

также отмечена в Нуукской декларации по случаю Седьмой Министерской сессии Арктического совета 12 мая 2011 г. Данная инициатива была одобрена специальной резолюцией XVI Всемирного метеорологического конгресса (16 мая — 3 июня 2011 г., Женева). Однако по ряду причин она так и не была реализована, поэтому сегодня мы вновь возвращаемся к пониманию необходимости целенаправленного и системного изучения полярных областей планеты.

Известно, что полярные области являются естественным усилителем климатического сигнала. Изменения тут происходят быстрее, а масштабы этих изменений значительно больше, чем в среднем по планете. Так, например, температура воздуха в северной полярной области в настоящее время растет в 3—3,5 раза быстрее, чем глобальная температура. Однако крайне разреженная сеть наблюдений

в полярных регионах не позволяет получить статистически обоснованные оценки климатического сигнала, что, естественно, сказывается на точности долгосрочных климатических прогнозов. Учитывая, что результаты этих прогнозов ложатся в основу принимаемых на международном уровне политических решений в области изменения климата и декарбонизации глобальной экономики, то проведение крупномасштабного международного эксперимента по изучению полярных областей, каковым является Международный полярный год, представляется необходимым.

Четырнадцатая конференция парламентариев Арктического региона, прошедшая в онлайн-режиме 13—14 апреля 2021 г в Осло, поддержала инициативу Антарктической парламентской ассамблеи (декабрь 2019 г.) о проведении в 2032/2033 гг. очередного, Пятого Международного полярного года — через 25 лет после проведения Четвертого МПГ в 2007/2008 гг.

Проведение МПГ в 2032/2033 гг. позволит всесторонне изучить произошедшие за четверть века изменения в полярных регионах, являющихся «кухней погоды», и объективно оценить результаты усилий, предпринимаемых международным сообществом в рамках Парижского соглашения по климату. Представляется исключительно важным учесть также совместное предложение Международного арктического научного комитета (IASC), Международной арктической ассоциации социальных наук (IASSA) и Университета Арктики о реализации в ходе подготовки к Пятому МПГ элементов Международного полярного десятилетия.

Основные задачи, на решение которых направлена инициатива МПД:

— разработка более совершенных систем краткосрочного и среднесрочного прогнозирования полярной погоды и климата и их использование для практического обслуживания и поддержки принятия решений;

— лучшее понимание предсказуемости полярного климата и роли полярных регионов в изменениях глобального круговорота углерода и уровня моря;

— оптимизация и развитие методов наблюдений, систем и сетей в полярных регионах;

— интеграция нового понимания природных процессов в развитие и культуру коренных народов, что улучшит условия существования и состояния их здоровья и позволит сохранить хрупкие полярные экосистемы.

Подготовка к проведению Пятого МПГ даст также хорошую возможность имплементации Соглашения по укреплению международного арктического научного сотрудничества. В частности, при проведении научных исследований в исключительных экономических зонах Арктических государств для экспедиций, входящих в программу МПГ, может быть установлено специальное регулирование проведения исследований, что в значительной мере облегчит вопросы их согласования, как это было сделано в период проведения Четвертого МПГ.

Поддерживая инициативу проведения пятого Международного полярного года, Российская Федерация как страна, председательствующая в Арктическом совете, может взять на себя координирующую роль в ее обсуждении и вынести рассмотрение этого вопроса на встречу министров науки стран-членов Арктического совета. Также целесообразно организовать широкое обсуждение

инициативы в научной и университетской среде с привлечением международных организаций: Международного научного совета (ISC), Всемирной метеорологической организации, ЮНЕСКО, а также Международного арктического научного комитета (IASC), Международной арктической ассоциации социальных наук (IASSA), Научного комитета по изучению Антарктики (SCAR), Университета Арктики, Ассоциации молодых полярных ученых (APECS), Секретариата коренных народов (IPS), и включить эту инициативу в повестку дня крупных международных форумов.

Статья поступила 01.02.2022

Принята в печать 20.02.2022

Памяти Л.И. Дивинского



12 января 2022 г. на 83-ом году ушел из жизни один из старейших и заслуженных работников Российского государственного гидрометеорологического университета, доктор физико-математических наук, профессор Леонид Исаевич Дивинский — талантливый ученый и наставник, искренний и неравнодушный человек. Леонид Исаевич работал в РГГМУ с 1966 г. и прошел путь от ассистента до профессора кафедры экспериментальной физики атмосферы (ЭФА). В течение многих лет он был деканом метеорологического факультета и очень много сделал для его развития. Он был руководителем, который вдохновлял, мотивировал и побуждал преодолевать все трудности в получении результатов. Его организационные способности устраняли все препятствия на этом пути.

Несмотря на большую занятость учебными делами, Леонид Исаевич много времени уделял научной работе. Он являлся ученым мирового уровня. Область его научных интересов — изучение особенностей развития опасных природных явлений радиотехническими средствами и методами. Под его руководством реализовывались совместные международные научные и образовательные проекты по исследованию радиолокационных характеристик зимних кучевых облаков и осадков, а также подспутниковых наблюдений совместно со специалистами из Японии, Швеции и Канады.

Л.И. Дивинский — автор более 100 научных работ, 11 учебных пособий, 7 научно-методических разработок и 1 монографии. Признанием научных заслуг стало присвоение Леониду Исаевичу званий действительного члена Российской академии естественных наук, заслуженного метеоролога Российской Федерации, почетного работника гидрометеослужбы России и родного университета.

Многие годы Л.И. Дивинский являлся ведущим преподавателем кафедры ЭФА, отвечающим за подготовку студентов-метеорологов в области электротехники и

радиоэлектроники. Леонид Исаевич был научным руководителем большого числа выпускников метеорологического факультета, работающих в настоящее время по всему миру. Под его руководством были защищены многочисленные диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Леонид Исаевич пользовался огромным авторитетом среди коллег, был примером для студентов. Его доброжелательность и простота в общении создавали вокруг него особую атмосферу.

Коллектив метеорологического факультета выражает искренние соболезнования родным и близким профессора Дивинского Леонида Исаевича. Его смерть — огромная утрата для всех, кто его знал. Светлая память о профессоре Дивинском Леониде Исаевиче навсегда сохранится в наших сердцах!

Коллеги, друзья, ученики

Памяти А.И. Погорельцева



С глубоким прискорбием сообщаем, что 27 января 2022 г. скончался доктор физико-математических наук, профессор кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ Александр Иванович Погорельцев — выдающийся учёный в области физики верхней и средней атмосферы.

После окончания в 1980 г. физического факультета ЛГУ Александр Иванович начал свою исследовательскую деятельность в Институте ионосферы Министерства образования и науки Республики Казахстан (г. Алматы). За время работы в Институте ионосферы он быстро завоевал уважение коллег и был избран заместителем директора по научной работе.

В 1986 г. А.И. Погорельцев защитил кандидатскую диссертацию по теме «Модель глобальной структуры стационарных планетарных волн». В 1993 г. получил звание доцента по специальности «Геофизика». С 2000 по 2004 г. работал в университете Уэльса (г. Абериствит) и в Институте метеорологии Лейпцига (Германия).

В 2004 г. он вернулся в Россию и стал работать в НИИ физики им. В.А. Фока СПбГУ, где сразу же защитил докторскую диссертацию по теме «Взаимодействие волн глобального масштаба в средней атмосфере и их влияние на среднезональную циркуляцию». С апреля 2004 г. Александр Иванович начал работать на кафедре метеорологических прогнозов метеорологического факультета РГГМУ в должности профессора, а затем заведующего кафедрой.

Основные научные интересы Александра Ивановича связаны с вопросами генерации, распространения и нелинейного взаимодействия волн глобального

масштаба, а также оценки вклада атмосферных волн в формирование средних полей. Он является одним из авторов трехмерной нелинейной модели COMMA-LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere — Leipzig Institute for Meteorology). Научные заслуги А.И. Погорельцева были признаны Комитетом по науке и высшей школе СПб, который утвердил его руководителем ведущей научно-педагогической школы города «Динамические и фотохимические процессы в атмосфере Земли».

Большинство научных интересов А.И. Погорельцева со временем превратились в официальные направления научных исследований кафедры метеорологических прогнозов. Особенно следует отметить прикладной характер исследования влияния сезонных закономерностей циркуляции стратосферы на формирование длительных аномалий погоды на Европейской территории России.

Александром Ивановичем опубликовано более 100 научных работ, причем большая часть в ведущих зарубежных журналах. Им подготовлено 7 кандидатов наук, которые работают сейчас в РГГМУ, СПбГУ, а также в Германии, Канаде и США. А.И. Погорельцев являлся руководителем грантов РФФИ и Международного научного фонда, а также исполнителем многих других грантов и проектов. За время своей преподавательской деятельности Александр Иванович подготовил и читал 4 кафедральных курса лекций по разным аспектам физики атмосферы и руководил аспирантской программой.

В 2014 г. Александр Иванович организовал лабораторию моделирования средней и верхней атмосферы в РГГМУ, целью которой было повышение эффективности проведения научных исследований и образовательной деятельности в области анализа данных наблюдений и численного моделирования взаимодействия радиационных, динамических и химических процессов. В течение последних 15 лет он являлся членом Учёного Совета РГГМУ и членом диссертационного Совета, участником Государственных и аттестационных комиссий, а также был заместителем главного редактора журнала «Гидрометеорология и экология».

Окружающих Александра Ивановича людей всегда привлекала его подлинная интеллигентность, открытость, честность отношений, безусловное желание помочь не только в науке, но и в простых житейских ситуациях. Мы всегда будем помнить Александра Ивановича как прекрасного человека и друга.

Коллеги, ученики, друзья

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

№ 66

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Подписано в печать 30.03.2022. Формат 70×100 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,2625. Тираж 500 экз. Заказ № 1202.
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет
