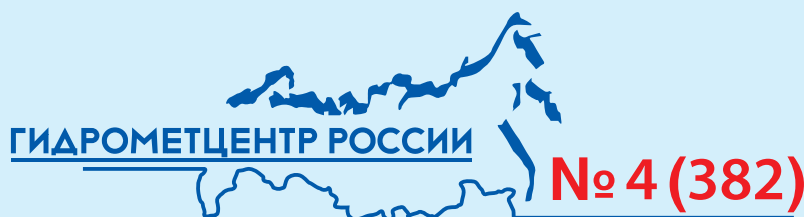


ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ



ISSN 2618-9631

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

Продолжение серии периодического журнала
«Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра
Российской Федерации»

№ 4 (382)

Под редакцией
д-ра геогр. наук А.А. Васильева

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 4 (382)

Москва
2021

Гидрометеорологические исследования и прогнозы – научный рецензируемый журнал, продолжает серию периодического журнала «Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации» (ISSN 0371-7089). Издаётся с 1947 года.

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки с 01.12.2015 года.

Представлены результаты численных прогнозов погоды Гидрометцентра России и метеослужбы Беларуси по территории республики, получены оценки влияния подстилающей поверхности на качество прогнозов. Приводится классификация методов пространственной верификации с их применением для ансамблевых прогнозов, перечисляются соответствующие программные средства. Изложена методика анализа структуры Южноазиатской депрессии с учетом термического режима подстилающей поверхности. Анализируется случай сильного гололеда (ледяного дождя) в г. Владивостоке в ноябре 2020 года. Описан метод долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки. Обсуждается необходимость учета источников аэрозольного загрязнения воздуха при оценке и прогнозировании экологической обстановки в Москве. Приведен анализ загрязнения атмосферы в Приморском крае в 2019–2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA. Анализируется влияние первой волны пандемии COVID-19 на экосистему Европы. В информационном разделе впервые публикуется обзор текущих и ожидаемых сезонных климатических аномалий по результатам оценок метеослужб стран СНГ. Представлен консенсусный прогноз в вероятностной форме для температуры воздуха и осадков на предстоящий зимний сезон 2021/2022 гг. по территории Северной Евразии.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: *Вильфанд Р.М.*, д-р техн. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: *Васильев А.А.*, д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Болгов М.В., д-р техн. наук, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

Борщ С.В., канд. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Варданян Л.Р., канд. техн. наук, Национальная служба Армении по гидрометеорологии и мониторингу, г. Ереван, Армения

Васильев П.П., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Зайцева Н.А., д-р геогр. наук, Отделение наук о Земле РАН, г. Москва, Россия

Иванова А.Р., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Калинин Н.А., д-р геогр. наук, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Клещенко А.Д., д-р геогр. наук, ВНИИСХМ Росгидромета, г. Обнинск, Россия

Козьмо К., PhD, Центр прогнозов погоды и климатических исследований, Сан-Жозе дос Кампос, Бразилия

Кричак С.О., д-р физ.-мат. наук, Тель-Авив, Израиль

Кузнецова И.Н., д-р. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Логинов В.Ф., академик НАН Беларуси, д-р геогр. наук, Центр климатических исследований НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Муравьев А.В., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Нестеров Е.С., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Полевой А.Н., д-р геогр. наук, Одесский государственный экологический университет, г. Одесса, Украина

Полонский А.Б., член-корр. РАН и НАН Украины, д-р геогр. наук, Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия

Реснянский Ю.Д., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Ривин Г.С., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Сокол З., д-р наук, Институт физики атмосферы Академии наук Чешской Республики, Прага, Чешская Республика

Страшная А.И., канд. геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Толстых М.А., д-р физ.-мат. наук, Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

Успенский А.Б., д-р физ.-мат. наук, НИЦ «Планета», г. Москва, Россия

Хан В.М., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Христофоров А.В., д-р геогр. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Шакина Н.П., д-р физ.-мат. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Hydrometeorological Research and Forecasting – the scientific peer-reviewed journal continues the series «Proceedings of the Hydrometcenter of Russia» established in 1947.

The results of developing short-range numerical weather prediction based on the COSMO-RuBy (Hydrometcenter of Russia) and WRF-ARW (Belhydromet) atmosphere models for creating unified products are presented. The classification of spatial verification methods with their application for ensemble forecasting is given, the corresponding software tools are listed. Estimates of the Earth surface influence on the accuracy of numerical prediction of air temperature on the territory of Belarus are obtained. The method for analyzing the structure of the South Asian Low is described, taking into account the thermal regime of the underlying surface. The case of severe glaze ice (ice pellets) in Vladivostok in November 2020 is analyzed. The method for long-range forecasting of the time of breakup in the Vyatka River basin is described. A need to take into account the sources of aerosol air pollution for assessing and forecasting environmental conditions in Moscow is discussed. The analysis of air pollution in Primorsky Krai in 2019–2020 according to GMAO/NASA satellite monitoring data is presented. The impact of the first wave of the COVID-19 pandemic on the European ecosystem is analyzed. For the first time, the informational section publishes an overview of current and expected seasonal climatic anomalies based on the results of assessment by the meteorological services of the CIS countries. A consensus probabilistic forecast for air temperature and precipitation on the territory of Northern Eurasia is presented for the upcoming winter season of 2021/2022.

EDITOR IN CHIEF: **Roman M. Vilfand**, Doctor of Engineering Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

EDITORIAL BOARD:

Vasiliev A.A., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Bolgov M.V., Doctor of Engineering Sciences, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Borsch S.V., PhD in Geography, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Vardanyan L.R., PhD in Engineering, National Monitoring and Weather Service of Armenia

Vasiliev P.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Zaytseva N.A., Doctor of Geographical Sciences, Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russia

Ivanova A.R., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Kalinin N.A., Doctor of Geographical Sciences, Perm State University, Perm, Russia

Kleshchenko A.D., Doctor of Geographical Sciences, All-Russian Scientific-Research Agricultural Institute, Obninsk, Kaluga region

Coelho C., PhD, Center for Weather Forecasts and Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, San Jose dos Campos, Brazil

Krichak S.O., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Tel-Aviv, Israel

Kuznetsova I.N., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Loginov V. F., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Center of Climate Research, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Muraviev A.V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Nesterov E.S., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Polevoy A.N., Doctor of Geographical Sciences, State Ecological University, Odessa, Ukraine

Polonsky A.B., Associate Member of RAS and National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Geographical Sciences, Institute of Natural-Technical Systems, Sevastopol, Russia

Resnyansky Yu.D., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Rivin G.S., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Sokol Z., Doctor Science, Institute of Atmospheric Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic

Strashnaya A.I., PhD in Geography, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Tolstykh M.A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow, Russia

Uspensky A.B., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, State Research Center "Planeta", Moscow, Russia

Khan V.M., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Khristoforov A. V., Doctor of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Russia

Shakina N.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Гидродинамический прогноз погоды

Формирование продукции систем негидростатического моделирования атмосферы COSMO-RuBy (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного прогноза погоды	6
<i>Розинкина И.А., Ривин Г.С., Бурак Р.Н., Астахова Е.Д., Алферов Ю.В., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Васькова Д.В., Волкова В.А., Воробьева Е.В., Зайко П.О., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Прохареня М.И., Елисеев Г.В.</i>	
Обзор методов пространственной верификации и их применение для ансамблевых прогнозов	30
<i>Бундель А.Ю., Муравьев А.В., Ольховая Е.Д.</i>	
Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF	50
<i>Лысенко С.А., Зайко П.О.</i>	

Общая циркуляция и характеристики атмосферы

Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года	69
<i>Леонов И.И., Соколичина Н.Н.</i>	
Методика анализа обобщенных характеристик структуры Южноазиатской депрессии с учетом термического режима подстилающей поверхности	84
<i>Шипко Ю.В., Колычев О.В., Дьяков С.А., Кузнецов И.Е., Закусилов В.П.</i>	

Гидрологические прогнозы

Опыт разработки методики долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки	99
<i>Павроз Ю.А.</i>	

Загрязнение атмосферы

Влияние первой волны пандемии COVID-19 на экосистему Европы	112
<i>Кривошеев В.В., Столяров А.И.</i>	
Аномальное аэрозольное загрязнение воздуха в Москве вблизи локального антропогенного источника в июле 2021 года	134
<i>Губанова Д.П., Виноградова А.А., Скороход А.И., Иорданский М.А.</i>	
Анализ загрязнения атмосферы в Приморском крае в 2019–2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA	149
<i>Василевский Д.Н., Василевская Л.Н., Лисина И.А., Мушта Б.Б.</i>	

Информационные сообщения

Обзор текущих и ожидаемых сезонных климатических аномалий на зиму 2021/2022 гг. с оценками возможных последствий в сферах экономики по заключению метеослужб стран СНГ	163
<i>Хан В.М., Вильфанд Р.М., Емелина С.В., Каверина Е.С., Куликова И.А., Сумерова К.А., Тищенко В.А., Толстых М.А.</i>	

CONTENTS

Hydrodynamic weather forecast

Forming of the products of non-hydrostatic modelling systems for short-range weather prediction COSMO-RuBy (Hydrometcentre of Russia) и WRF-ARW (Belhydromet)	6
<i>Rozinkina I.A., Rivin G.S., Burak R.N., Astakhova E.D., Alferov Yu.V., Blinov D.V., Bykov Ph.L., Vaskova D.V., Volkova V.A., Vorob'eva E.V., Zayko P.O., Zhabina I.I., Nedachina A.Yu., Prockharenya M.I., Eliseev G.V.</i>	
Overview of spatial verification methods and their application to ensemble forecasting	30
<i>Bundel A.Yu., Muraviev A.V., Olkhovaya E.D.</i>	
Estimates of the Earth surface influence on the accuracy of numerical prediction of air temperature in Belarus using the WRF model	50
<i>Lysenko S.A., Zaiko P.O.</i>	

General circulation and characteristics of the atmosphere

Formation conditions of an ice storm in Vladivostok in November 2020	69
<i>Leonov I.I., Sokolikhina N.N.</i>	
A method for analyzing generalized characteristics of the South Asia Low structure taking into account a thermal regime of underlying surface	84
<i>Shipko Yu.V., Kolychev O.V., Dykov S.A., Kyznetsov I.E., Zakusilov V.P.</i>	

Hydrological forecasts

Experience in developing a method for long-term forecasting of the ice breakup time for the Vyatka River basin	99
<i>Pavroz Y.A.</i>	

Air pollution

The influence of the COVID-19 first wave on the European ecosystem	112
<i>Krivosheev V.V., Stoliarov A.I.</i>	
Abnormal aerosol air pollution in Moscow near the local anthropogenic source in July 2021	134
<i>Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Skorokhod A.I., Iordanskii M.A.</i>	
Analysis of air pollution in Primorsky Krai in 2019-2020 according to GMAO/NASA satellite monitoring	149
<i>Vasilevsky D.N., Vasilevskaya L.N., Lisina I.A., Mushta B.B.</i>	

Informational notes

Overview of current and expected seasonal climatic anomalies for the winter 2021/2022 with their possible impact on the economy, as estimated by the meteorological services of the CIS countries	163
<i>Khan V.M., Vil'fand R.M., Emelina S.V., Kaverina E.S., Kulikova I.A., Sumerova K.A., Tishchenko V.A., Tolstykh M.A.</i>	

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-6-29>

УДК 551.509.32+551.509.51

**Формирование продукции
систем негидростатического моделирования атмосферы
COSMO-RuBy (Гидрометцентр России)
и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного
прогноза погоды**

***И.А. Розинкина^{1,3}, Г.С. Ривин^{1,3}, Р.Н. Бурак², Е.Д. Астахова¹,
Ю.В. Алферов¹, Д.Б. Блинов¹, Ф.Л. Быков¹, В.А. Волкова¹,
Е.В. Воробьева¹, П.О. Зайко², И.И. Жабина¹, А.Ю. Недачина¹,
М.И. Прохареня², Г.В. Елисеев¹***

¹ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

² *Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного
загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет),
г. Минск, Республика Беларусь;*

³ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

Рассматриваются результаты работ по созданию продуктов систем негидростатического краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) в Гидрометцентре России – COSMO-RuBy с шагом вычислительной сетки 2,2 км и в Белгидромете – WRF-ARW с шагом сетки 3 км. Важными результатами являются организация обмена унифицированной продукцией между странами и создание в Гидрометцентре России двух технологий для получения объединенного продукта: ансамблевого лагированного прогноза и системы комплексной коррекции результатов моделирования на основе машинного обучения. На основе обратной связи с прогнозистами обеих стран в Гидрометцентре России создан специализированный Интернет-сайт, обеспечивающий удобную работу прогнозистов с результатами COSMO-RuBy и объединенными продуктами. В Белгидромете реализованы системы совместной визуализации и верификации результатов COSMO-RuBy и WRF-ARW.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, ансамблевый прогноз, визуализация, машинное обучение

Forming of the products of non-hydrostatic modelling systems for short-range weather prediction COSMO-RuBy (Hydrometcentre of Russia) и WRF-ARW (Belhydromet)

I.A. Rozinkina^{1,3}, G.S. Rivin^{1,3}, R.N. Burak², E.D. Astakhova¹, Yu.V. Alferov¹, D.V. Blinov¹, Ph.L. Bykov¹, D.V. Vaskova¹, V.A. Volkova¹, E.V. Vorob'eva¹, P.O. Zayko², I.I. Zhabina¹, A.Yu. Nedachina¹, M.I. Prockharenya², G.V. Eliseev¹

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²Center of Hydrometeorology, Radioactive Contamination and Environmental Monitoring of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus;

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper considers the results of activities on the development of output products for the non-hydrostatic short-range numerical weather prediction systems: COSMO-RuBy with a grid spacing of 2.2 km at the Hydrometcentre of Russia and WRF-ARW with a grid spacing of 3 km in Belhydromet. The important results of the activities are the organization of the exchange of unified products between the countries and the development at the Hydrometcentre of Russia of two technologies for obtaining the unified products: the multi-model lagged ensemble system and the system for the complex correction based on machine learning of model results. A specialized web-site providing convenient work of forecasters with the COSMO-RuBy results and unified products was created at the Hydrometcentre of Russia based on the feedback from forecasters. The systems of common visualization and verification of COSMO-RuBy and WRF-ARW results are implemented in Belhydromet.

Keywords: numerical weather prediction, ensemble forecasting, visualization, machine learning

Введение

Важной областью сотрудничества Российской Федерации и Республики Беларусь в сфере гидрометеорологии более 20 лет является участие в программах Союзного государства. С 2017 года выполняется программа «Развитие системы гидрометеорологической безопасности Союзного государства» на 2017–2021 годы (далее – Программа). В рамках 1-го мероприятия Программы «Повышение качества гидрометеорологических прогнозов и обнаружения опасных гидрометеорологических явлений» выполняются работы по развитию негидростатического моделирования атмосферных процессов в региональном масштабе с высокой пространственной и временной детализацией.

В Российской Федерации (ФГБУ «Гидрометцентр России») и в Республике Беларусь (ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», далее Белгидромет) созданы конфигурации (версии) негидростатических мезомасштабных моделей атмосферы высокой детализации, адаптированные для краткосрочного прогнозирования погоды по территории

Республики Беларусь и западной части Российской Федерации. Система негидростатического численного прогноза Гидрометцентра России (модель COSMO-RuBy) была создана на основе негидростатической мезомасштабной модели COSMO-Ru [5], являющейся национальным вариантом модели COSMO, развиваемой одноименным международным консорциумом COSMO (Consortium for Small-scale atmospheric Modeling, сайт: www.cosmo-model.org), членом которого является Российская Федерация [4]. Программный комплекс модели COSMO эффективно использует суперкомпьютерные вычислительные ресурсы, что обеспечивает достаточно быстрый оперативный счет с высоким разрешением для обширных территорий. Версия Белгидромета была создана на основе мезомасштабной модели WRF-ARW [<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>].

Области прогнозирования моделей COSMO-RuBy и WRF-ARW представлены на рис. 1.

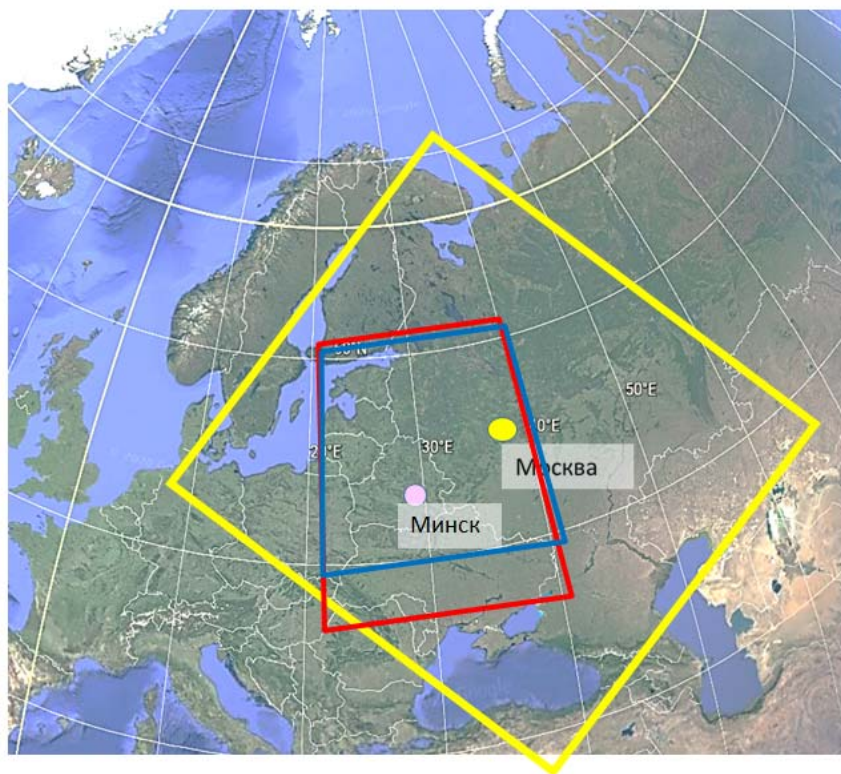


Рис. 1. Области прогнозирования COSMO-RuBy Гидрометцентра России (выделена желтой линией), WRF-ARW Белгидромета (выделена красной линией) и область формирования продукции для взаимного обмена (выделена синей линией).

Fig. 1. Domains of COSMO-RuBy, Hydrometcenter of Russia (yellow contour); WRF-ARW, Belhydromet (red) and common area for exchanges of modelling results between Hydrometcenter of Russia and Belhydromet (blue).

Согласованная со специалистами Белгидромета область вычислений модели COSMO-RuBy охватывает территорию Республики Беларусь, запад и центр Европейской территории России и ряд прилегающих регионов. При этом учитывалось, что для прогнозистов Республики Беларусь актуальнее оказалось включение более западных регионов, а для прогнозистов западных регионов России – северо-западных и южных. За счет реализации согласованной области прогнозирования, продукция модели COSMO-RuBy оказалась востребованным информационным ресурсом для синоптиков Росгидромета и Белгидромета. При этом синоптики Росгидромета используют продукцию COSMO-RuBy не только для прогнозирования погоды по соседствующим с Республикой Беларусь Центральному и Северо-Западному федеральным округам, но также по Южному и частично Приволжскому федеральным округам.

На рис. 1 также представлена выделенная синей линией область, для которой производится обмен информацией между Белгидрометом и Гидрометцентром России, необходимый для объединения (комплексирования) прогностической продукции моделей COSMO-RuBy и WRF-ARW. Обмен прогностическими данными между Белгидрометом и Росгидрометом ведется начиная с IV квартала 2020 года через ftp-сервер в формате GRIB1. Стороны обмениваются информацией, вычисленной по начальным срокам 00.00 и 12.00 ч ВСВ. Для формирования совместных продуктов в Гидрометцентре России используются результаты вычислений COSMO-RuBy по начальным данным по срокам 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ.

1. Краткое описание новых технологий численного прогнозирования и визуализации Гидрометцентра России и Белгидромета

Система прогнозирования COSMO-RuBy создана специалистами Гидрометцентра России в рамках выполнения Программы в период с 2017 по 2019 год. Основные характеристики системы прогнозирования: используется «сдвинутая» сферическая система координат [4], шаг расчетной сетки составляет 2,2 км; продукция выпускается четыре раза в сутки по начальным данным за сроки 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ и включает в графических форматах прогностические карты метеорологических полей, метеограммы, аэрологические диаграммы; цифровая продукция кодируется в формате GRIB2; в рамках технологии производится дополнительное усвоение данных синоптической сети и сети доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ).

Начальные поля и данные на границах для модели COSMO-RuBy формируются с использованием продукции модели COSMO-Ru6ENA с более грубым разрешением (шаг расчетной сетки 6.6 км). Модель COSMO-Ru6ENA с 2018 года функционирует на суперкомпьютере CRAY «Росгидромет». Конфигурация COSMO-Ru6ENA имеет область прогнозирования, охватывающую всю территорию России и обширные

прилегающие регионы [5]; период прогнозирования модели – до 120 часов. Согласно решению ЦМКП от 11 марта 2021 г., данная система рекомендована в качестве основного метода численного краткосрочного прогноза погоды для прогностических организаций Росгидромета. Информация на границах и начальные поля для модели COSMO-Ru6ENA поступают в Росгидромет из системы глобального моделирования Немецкой службы погоды в соответствии с уставом Консорциума COSMO. Обе конфигурации модели (COSMO-RuBy и COSMO-Ru6ENA) функционируют в рамках единой технологической системы COSMO-Ru.

Результаты опытной эксплуатации COSMO-RuBy свидетельствуют о высокой надежности прогнозирования явлений погоды на ближайшие сутки, в том числе – с применением специальных индексов, характеризующих степень угроз опасных явлений конвективной природы – гроз, града, порывов ветра, сильных осадков.

Для визуализации и представления информации системы COSMO-Ru в Гидрометцентре России создан специализированный интернет-сайт (с авторизованным доступом), на котором размещается графическая продукция системы COSMO-RuBy, продукция других компонент прогностической системы COSMO-Ru, а также объединенная ансамблевая продукция систем негидростатического моделирования обеих стран, (<https://u2019.meteoinfo.ru/services/belarus/index.php>), рассматриваемая в дальнейших разделах. При разработке сайта учитывался опыт и рекомендации прогнозистов Белгидромета и Гидрометцентра России. С учетом этих рекомендаций был реализован двухоконный интерфейс представления информации, позволяющий синоптикам эффективнее и быстрее анализировать большие объемы информации. Примеры представления информации на сайте приведены на рис. 2.

В верхней части рисунка представлена стартовая страница (слева) и карта для всей области вычислений прогноза для температуры воздуха (справа). В нижней части рисунка в качестве примера представлена страница, включающая карту прогнозов порывов ветра (левое «окно») и прогностическая аэрологическая диаграмма (правое «окно»).

В Белгидромете была реализована прогностическая система близкого класса на основе модели WRF-ARW. Реализованная в Белгидромете конфигурация получила наименование «рабочая версия WRF-ARW». Основные характеристики этой системы прогнозирования: используется расчетная сетка в проекции Ламберта, шаг расчетной сетки составляет 3 км; продукция выпускается два раза в сутки по срокам начальных данных 00 и 12 ч ВСВ.

Вычисления по рабочей версии WRF-ARW производятся с использованием начальных и боковых условий, получаемых по конфигурации модели WRF-ARW с шагом расчетной сетки 15 км для более крупной области прогноза, в свою очередь использующей в качестве начальных данных и данных на границах области прогноза результаты глобального моделирования NCEP.

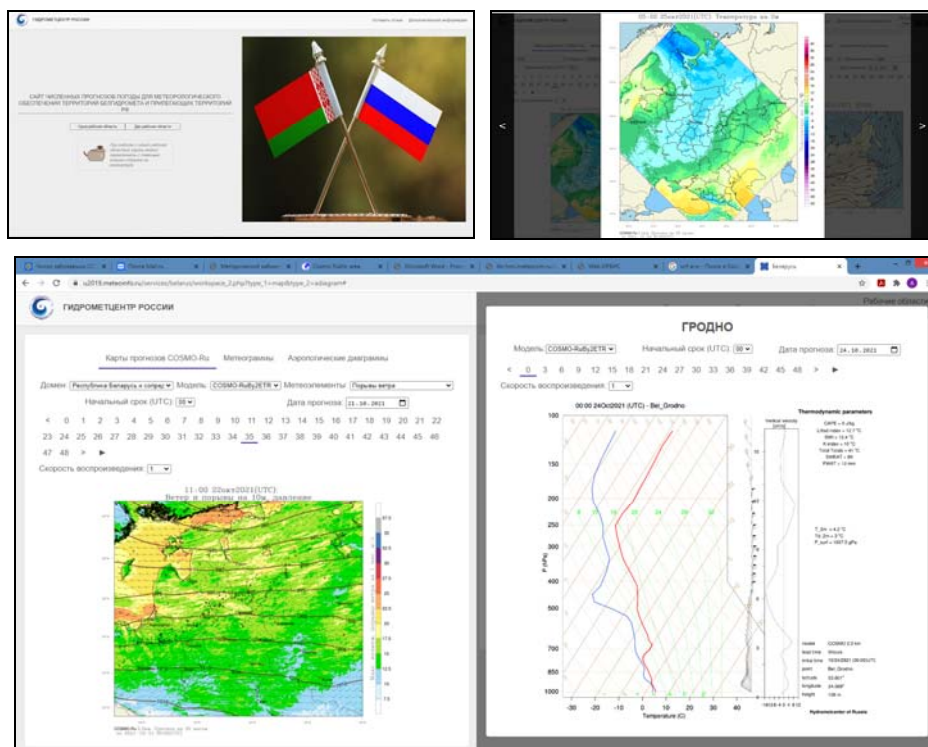


Рис. 2. Страницы сайта, на котором представлена продукция модели COSMO-RuBy.

Fig. 2. Examples of pages of the site with COSMO-RuBy products.

Специалистами Белгидромета для создания рабочей версии WRF-ARW был выполнен ряд настроек для формирования необходимого района прогнозирования, а также произведен выбор схем параметризаций физических процессов в атмосфере для адаптации к особенностям территории прогнозирования.

Продукция Рабочей версии визуализируется с помощью пакета GrADS в виде метеограмм, аэрологических диаграмм, карт, часть продукции размещается на сайте <https://www.meteoinfo.by/wrf3/> (рис. 3).

Цифровая продукция Рабочей версии кодируется в формате GRIB1. Ряд продуктов Рабочей версии WRF-ARW визуализируются также в виде карта-схем, таблиц, графиков на основе АРМ синоптика-прогнозиста, разработанного специалистами Белгидромета и функционирующего в прогностических подразделениях. При создании визуализированных продуктов специалисты Белгидромета применили ряд важных с методической точки зрения приемов, облегчающих интерпретацию результатов. Например, прогностические карты ряда параметров сопровождаются таблицами соответствия. В частности, для отображаемых на картах значений

Близкий класс прогностических моделей Гидрометцентра России и Белгидромета, различающихся алгоритмическим наполнением и источниками начальных данных, создал предпосылки для возможного объединения (комплексирования) продукции этих моделей по общей области вычислений (см. рис. 1).

Такое объединение позволяет рассчитывать на повышение надежности прогнозирования, а также обеспечивает получение прогностической продукции в вероятностной форме, т. е. важной информации об априорной неопределенности прогнозов. Комплексирование продукции обеих моделей также может снизить риски ошибок детерминированных прогнозов, обусловленных приближениями численного моделирования и стохастической природой атмосферных процессов.

2. Создание технологий для получения объединенных продуктов

Объединение продукции, выпускаемой системами ЧПП COSMO-RuBy (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) потребовало решения ряда методических и технологических вопросов.

Указанные модели имеют различные области вычислений, разную топографическую основу, различаются шагом расчетных сеток, имеют разные регламенты выпуска и форматы кодирования продукции. Область вычислений Белгидромета несколько больше распространена на запад, а Росгидромета – на восток, при этом подавляющая часть области Рабочей версии WRF-ARW находится внутри домена COSMO-RuBy (см. рис. 1).

В 2019 году специалистами Гидрометцентра России и Белгидромета была согласована общая область прогнозирования для обмена, в которой производится интерполяция результатов прогнозирования по двум моделям на единую географическую широтно-долготную сетку высокого пространственного разрешения с шагом $0,025^\circ$, согласовано использование для кодирования продукции формата GRIB1, реализован обмен результатами прогноза через сервер ГВЦ Росгидромета (на основании ftp протокола) на широтно-долготной сетке с шагом 0.025° (ориентировочным объемом 4 Гб в сутки).

Для организации взаимного обмена и дальнейшего объединения (комплексирования) информации в прогностические системы Гидрометцентра России и Белгидромета понадобилось включить дополнительные процессы, которые представлены в табл. 1.

Также была согласована номенклатура передаваемой продукции, включающая все ключевые метеорологические параметры, необходимые для краткосрочного прогноза элементов приземной погоды.

Таблица 1. Характеристики новых технологических процессов для организации взаимного обмена продукцией ЧПП

Table 1. The new technological processes for non-hydrostatic NWP product exchanges

Добавленный технологический процесс	Технология COSMO-RuBy	Технология WRF- ARW
Модификации в технологии вычислений и формирования результатов		
Периодичность	Для каждого сеанса счета 4 раза в сутки. Шаг 1 час	Для каждого сеанса счета 2 раза в сутки. Шаг 1 час
Раскодирование	Из файлов GRIB2 по всей области вычислений	Из файлов GRIB1 по всей области вычислений
Отбор результатов моделирования	По координатам согласованного региона по согласованной номенклатуре	
Интерполяция	С вычислительной сетки модели на согласованную широтно-долготную сетку 0.025°×0.025°	
Формирование результатов	Запись в базу данных Гидрометцентра России	Формирование GRIB1 из массивов отобранной продукции
Изменения в системах передачи-данных. Отправка данных		
Периодичность	По мере готовности продукции, 2 раза в сутки, не позднее 05 и 19 ч ВСВ	По мере готовности продукции 2 раза в сутки, не позднее 07 и 21 ч ВСВ
Источник данных	Базы данных Гидрометцентра России	Формирование в процессе счета
Кодирование	Формат GRIB1	Выполнено на этапе формирования результатов
Размещение продукции	На ftp сервере ФГБУ «ГВЦ Росгидромета»	
Изменения в системах передачи-данных. Получение данных		
Периодичность, время	2 раза в сутки, по мере поступления	2 раза в сутки, по мере поступления
Источник продукции	ftp-сервер ФГБУ «ГВЦ Росгидромета»	
Раскодирование	Раскодирование из GRIB1	
Размещение	В пользовательских базах данных Гидрометцентра России	В пользовательских базах данных Белгидромета

3. Создание объединенных продуктов в Белгидромете и Гидрометцентре России

3.1. Технология визуальной комплексации и верификации Белгидромета

В Белгидромете поступающие из Гидрометцентра России цифровые данные были включены в систему визуализации в АРМ синоптика-прогнозиста Белгидромета в виде карт, таблиц, графиков. Была выполнена работа по интерполяции данных в пункты метеостанций Республики Беларусь для представления их на карта-схеме согласно пуансону наноски (пример на рис. 4).

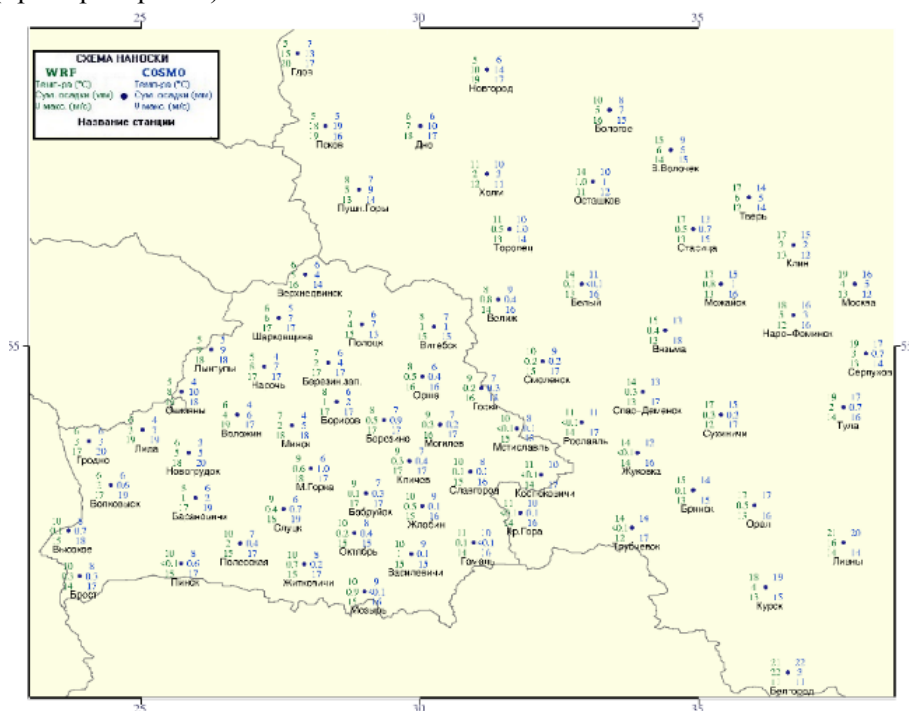


Рис. 4. Пример карты с наноской для пунктов Республики Беларусь прогностических значений метеопараметров, рассчитанных по двум моделям. В пуансоне пункта в колонке слева: результаты модели WRF-ARW, справа: модели COSMO-RuBy.

Fig. 4. Example of mapped forecast values for points of Belarus by WRF-ARW (left columns) and COSMO-RuBy (right columns).

Такие карты позволяют синоптику одновременно видеть результаты прогнозирования по двум моделям, анализировать разброс в прогностических значениях различных метеопараметров, что особенно важно в случаях быстрых изменений погоды, оценить степень угроз и неопределенностей при прогнозировании быстроразвивающихся опасных явлений.

На рис. 5 представлена визуализация временного хода прогностических и фактических значений сумм осадков за 12 часов (полусуточных) и температуры для выбранного пункта (метеостанции) для двух моделей.

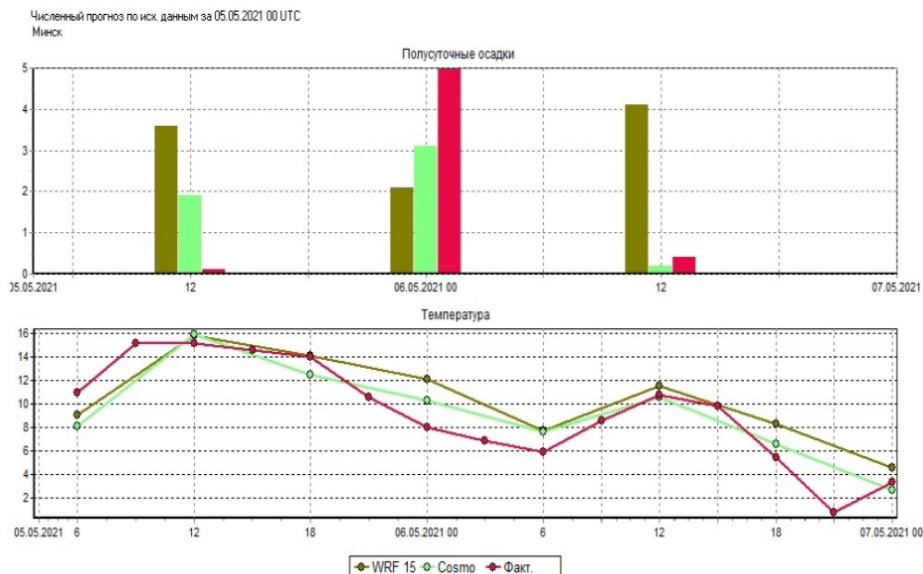


Рис. 5. Пример визуализации временного хода прогностических и фактических значений полусуточных осадков и температуры для выбранного пункта (метеостанции). Темно-зеленым цветом обозначена продукция Рабочей версии WRF-ARW, светло-зеленым цветом – продукция модели COSMO-RuBy, красным цветом – данные измерений в пунктах метеостанций.

Fig. 5. Example of visualization of forecast and measured values of 12h-precipitation sums and 2m temperatures. Dark green: forecasts of WRF-ARW of Belhydromet, light-green: forecasts of COSMO-RuBy of Hydrometcenter of Russia, red: observations.

Помимо этого, была расширена система вычисления оценок успешности прогнозов с применением распространяемого на безвозмездной основе пакета MET (Model Evaluation Tools) [<https://dtcenter.org/community-code/model-evaluation-tools-met>] для обеспечения сравнительного мониторинга успешности прогнозов метеопараметров у земной поверхности.

3.2. Создание объединенных продуктов Гидрометцентра России

В Гидрометцентре России на основе прогностической продукции, поступающей от обоих источников, реализованы две технологии ее объединения: 1) лагированного ансамблевого прогноза; 2) комплексной статистической коррекции с применением машинного обучения.

3.2.1. Технология «Ансамблевый лагированный прогноз»

Термин лагирование в данном контексте означает использование прогнозов, вычисленных на один и тот же момент времени от нескольких последовательных начальных сроков. Такое объединение возможно для таких прогнозов, качество которых остается близким на некотором интервале заблаговременностей. Для краткосрочного численного прогноза на сутки вперед допустимо объединение прогнозов, стартовавших в 12-часовом интервале, предшествующем самому последнему сроку начальных данных.

Созданная в рамках данного проекта система ансамблевого прогноза EPS-RuBy является мульти-анализной и мульти-модельной [9]. В ней используются прогнозы по двум различным моделям: COSMO-RuBy и WRF-ARW, в которых используются различные начальные данные (анализы). Однако использование только двух реализаций прогноза недостаточно для функционирования ансамблевой системы. Поэтому для увеличения размера ансамбля в него были включены три последовательных прогноза (с шагом 6 часов) по COSMO-RuBy и два последовательных прогноза (с шагом 12 часов) по модели WRF-ARW, имеющих качество, соизмеримое с качеством самого «нового» прогноза. Итоговая схема ансамбля EPS-RuBy представлена на рис. 6. Максимальная заблаговременность ансамблевого прогноза при таком подходе – 36 часов, размер ансамбля – 5 реализаций.

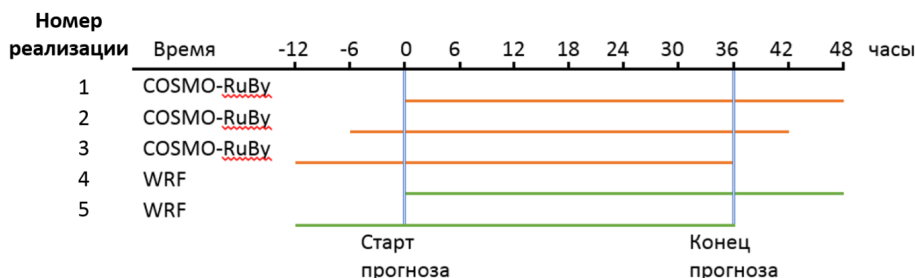


Рис. 6. Схема формирования ансамбля EPS-RuBy.

Fig. 6. EPS-RuBy formation diagram.

Несмотря на небольшой размер ансамбля, данная разработка имеет большое методическое значение как первая технология высокодетального краткосрочного ансамбля прогнозов элементов погоды, реализованная в России.

В Гидрометцентре России для оптимизации работы при построении ансамблей был создан ряд оперативных циклических (ежедневно обновляемых) специализированных баз данных в рамках системы автоматизированной обработки информации Гидрометцентра России [3]. Перечень

и характеристики метеопараметров, прогнозы которых подлежат «ансамблированию», включая их осредненные по всем реализациям, представлены в табл. 2, а ряд результатов совместной обработки детерминированных прогнозов – в табл. 3. Приведенные таблицы раскрывают состав одной из разработанных баз данных (EPSB) для функционирования и выпуска продукции данной ансамблевой системы.

Кроме прогностических реализаций, в базе содержатся значения средних по ансамблю, характеристики разброса прогнозов в ансамбле и прогностические значения вероятностей. Средние по ансамблю рассчитываются как среднее арифметическое значений, полученных во всех реализациях ансамбля. Разброс прогнозов в ансамбле определяется как среднеквадратическое отклонение от среднего по ансамблю [6]. Прогностические вероятности – это число реализаций, в которых наблюдалось наперед заданное событие, деленное на размер ансамбля. События, для которых определялись прогностические вероятности, и соответствующие заблаговременности прогноза представлены в табл. 2.

Таблица 2. Состав базы данных: прогностические реализации и средние по ансамблю

Table 2. Content of database: Ensemble members and mean values

Метеорологическая характеристика	Имя в базе данных EPSB (примеры для максимальной заблаговременности)	Размерность, диапазон значений	Заблаговременность прогноза, часы
Суммарные осадки, аккумулярованные с начала прогноза	B99B036A	мм, 0-2000	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Суммарные осадки (сумма за 12 часов)	I99B036A	мм, 0-400	12, 18, 24, 30, 36 ч
Суммарные осадки (сумма за 24 часа)	J99B036A	мм, 0-800	24, 30, 36 ч
Осадки в виде снега, аккумулярованные с начала прогноза	X99B036A	мм, 0-2000	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Осадки в виде снега (сумма за 12 часов)	S99B036A	мм, 0-200	12, 18, 24, 30, 36 ч
Температура на уровне 2 м	T99B036A	°C, -120° - +60°	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Компоненты скорости ветра на 10 м	U99B036A V99B036A	м/с, -127 - +127	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч
Порывы ветра на 10 м	G99B036A	м/с, 0-127	От 0 до 36 ч с шагом 1 ч

Таблица 3. Состав базы данных EPSB с результатами ансамблевых прогнозов по системе EPS-RuBy: прогностические вероятности
Table 3. Content of database with EPS-RuBy results: forecast probabilities

Метеорологическая характеристика	Имя в базе данных (примеры для различных заблаговременностей)	Размерность, диапазон значений	Заблаговременность прогноза
Вероятность 24-часовых сумм. осадков (снег+дождь), превышающих 1, 10, 20, 50 мм	B24BEXPA	%, 0–100	24, 30, 36 ч
Вероятность 12-часовых сумм. осадков (снег+дождь), превышающих 1, 10, 20, 50 мм	B12BEXPA	%, 0–100	12, 18, 24, 30, 36 ч
Вероятность 12-часовых сумм. осадков в виде снега, превышающих 1, 5, 10, 20 мм	S12BEXPA	% 0–100	12, 18, 24, 30, 36 ч
Вероятность порывов скорости ветра на 10 м, превышающих 5, 10, 15, 25 м/с	G99BEXPA	% 0–100	От 6 до 36 ч с шагом 6 ч

В качестве входной информации для базы EPSB используются не непосредственно файлы прогнозов в форматах GRIB1, а содержимое специально созданных для решения этих задач внутренних баз данных RUS2 и BEL2, что более технологично.

Прогнозы COSMO-RuBy попадают в базу EPSB сразу же после заполнения базы RUS2 (примерно в 2.50 ч ВCB и 14.50 ч ВCB по исходным срокам 00 и 12 ч ВCB соответственно), т. е. когда появляются соответствующие прогнозы на 48 часов. Прогнозы по WRF-ARW Белгидромета берутся из базы данных BEL2, при этом одновременно записываются две прогностические реализации 4 (дата текущая) и 5 (дата 12 часов назад). Прогнозы в базе готовы в 6.00 для срока 00 ч и в 18.00 для срока 12 ч ВCB.

Расчет средних и разбросов в ансамбле, а также прогностических вероятностей осуществляется отдельной задачей, запускаемой через 6 ч 30 мин после срока наблюдений (то есть в 6.30 для срока 00 ч и в 18.30 для срока 12 ч ВCB).

Задача автоматической подготовки карт с результатами ансамблевого прогноза запускается через 7 часов после срока наблюдения, т. е. в 7.00 для срока 00 ч и в 19.00 для срока 12 ч ВCB. Затем полученные карты автоматически пересылаются на специализированный сайт с продукцией COSMO-RuBy (см выше), в раздел ансамблевых прогнозов: http://u2019.meteoinfo.ru/services/belarus/workspace_1.php?type=ensemble.

Системы ансамблевого прогноза предоставляют большое количество выходной продукции. Основная ее привлекательность – возможность априорно оценить меру доверия к прогнозу, увидеть различные сценарии развития событий, получить вероятностную информацию. Кроме того, средние по ансамблю прогнозы обычно оказываются лучшего качества, чем прогнозы детерминированные.

В то же время за счет большого объема ансамблевой продукции, ее трудно анализировать без использования специально разработанных форм ее представления и последующей обработки полученных результатов (ансамблевого постпроцессинга).

Ниже перечислены виды ансамблевой продукции, подготавливаемой и предоставляемой на сайте. Автоматизированная оперативная визуализация проводится с использованием пакета Изограф [1].

Карты «почтовых марок» («Postage stamps»). Все прогнозы ансамбля, представленные на одной карте. Дополнительно на таких картах добавлено поле среднего по ансамблю. Для каждой прогностической реализации ансамбля на этикетках внизу карт приводится название использованной модели, начальный срок детерминированного прогноза и заблаговременность этого прогноза.

При отсутствии некоторых прогностических реализаций ансамбля, возникающих иногда из-за недостаточной стабильности удаленной передачи данных между прогностическими центрами, на соответствующей панели выводится информация об отсутствии данных, а средние поля рассчитываются с использованием меньшего размера ансамбля. Карты в формате «почтовых марок» дают возможность увидеть различные вероятные сценарии развития метеорологических процессов. При составлении прогноза прогнозистам рекомендуется первоначально с помощью этих карт определить, до какой заблаговременности все прогнозы ансамбля близки друг к другу, а затем рассмотреть возможные (альтернативные) варианты последующего развития метеорологических процессов.

Карты в формате «почтовых марок» предоставляются для температуры на уровне 2 м, накопленных за 6 и за 12 ч осадков, порывов ветра на уровне 10 м за час, предшествующий моменту прогноза. Шаг по заблаговременности составляет 6 часов. Пример прогностических карт в форме «почтовых марок» показан на рис. 7.

Карты вероятностей. Вероятности в ансамблевых системах определяются как число прогнозов ансамбля, в которых событие наблюдалось, деленное на размер ансамбля. Например, если 5 из 10 прогнозов ансамбля дают осадки выше 20 мм в сутки, мы можем сказать, что вероятность выпадения за сутки более 20 мм осадков составляет 50 %.

Карты вероятностей предоставляются для событий «суммарные осадки за 12 часов более 1, 10, 20, 50 мм», «порывы скорости ветра на уровне 10 м более 5, 10, 15, 25 м/с». Пример таких карт приведен на рис. 8.

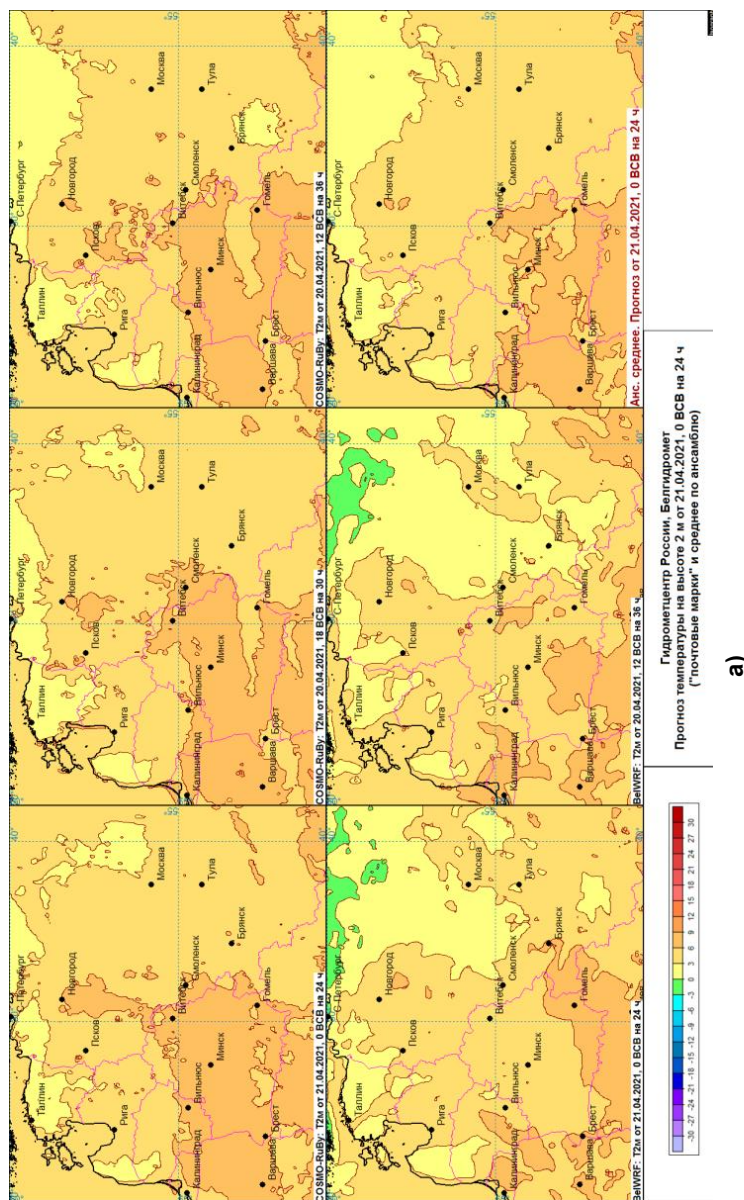
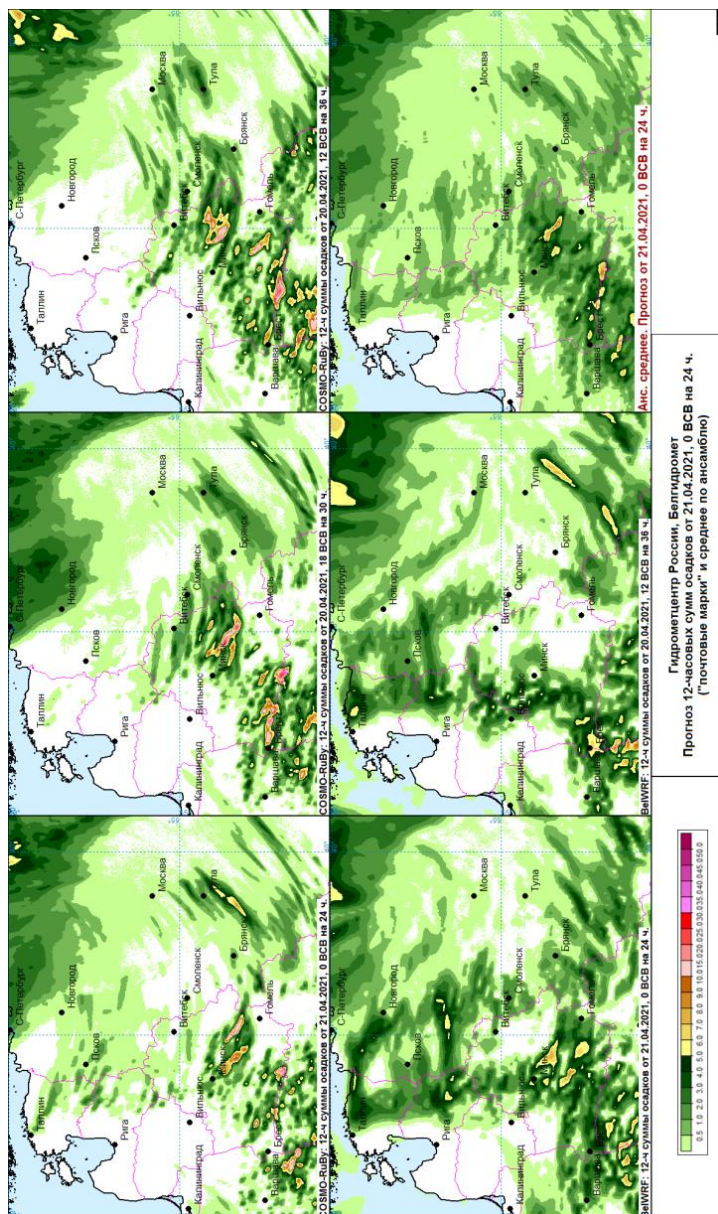


Рис. 7. Пример карт ансамблевого прогноза от 21.04.2021 г., 00 ч ВСВ на 24 ч. «Почтовые марки» и средние по ансамблю для температуры на высоте 2 м (а), 12-часовых сумм осадков (б). В верхнем ряду – лагированные прогнозы COSMO-RuBy, в нижнем – WRF, в нижнем правом углу – средние по всем реализациям.



б)

Fig. 7. Example of ensemble 24-h forecast (Postage Stamps) of T2m (a), 12h precipitation sums (б), started a 21.04.2021, 00:00 UTC. Top row: lagged forecasts, bottom row: WRF-ARW, bottom right corner: ensemble mean.

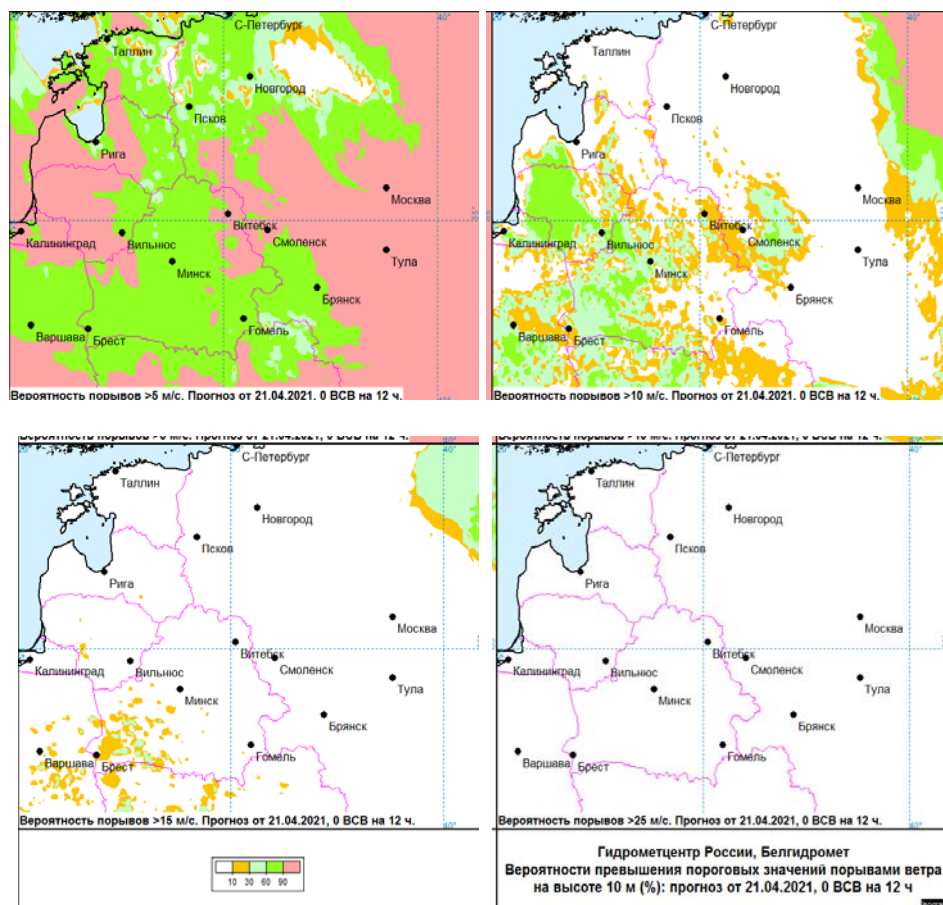


Рис. 8. Пример карт вероятностей превышения пороговых величин для порывов ветра на высоте 10 м.

Fig. 8. Example of ensemble forecast (probability maps) for gusts with thresholds 5 m/s (a), 10 m/s (б), 15 m/s (в), 25 m/s (г).

Так, 21 апреля днем в юго-западной части Республики Беларусь прогнозировалась вероятность свыше 60–90 % усиления ветра более 5 м/с, 30–60 % – более 10 м/с, 15–30 % – свыше 15 м/с только в районе Бреста. В результате в аэропорту Бреста были зарегистрированы порывы 10–11 м/с, в Минске – 7–8 м/с.

Учитывая локальность явлений, можно предположить о существовании более сильных порывов ветра в окрестностях указанных метеостанций. Информация о существовании подобных угроз важна для прогнозистов.

3.2.2. Технология комплексной статистической коррекции с применением техник машинного обучения

В Гидрометцентре России была разработана система комплексной статистической коррекции прогнозов метеопараметров в пунктах с применением машинного обучения на основе нейронных сетей. Идея заключается в коррекции первоначальных модельных прогнозов, интерполированных в пункты (в которых проводятся метеорологические наблюдения), с использованием данных измерений за предыдущие 35 дней (длина периода выбрана экспериментально), и получении результирующего объединенного продукта.

Применение подходов машинного обучения в настоящее время все активнее используется для коррекции результатов модельных вычислений с учетом ошибок предшествующих прогнозов, учета местных особенностей, пространственной изменчивости прогнозируемых параметров. Эффективность данных методик коррекции повышается при использовании численных прогнозов различных прогностических систем.

Для обучения и тестирования технологии постпроцессинга на основе машинного обучения, используемой для прогнозов приземных метеозадач [2] (далее технология Post-RuBy), необходимо иметь архив этих прогнозов за период не менее года. Такой архив прогнозов по Рабочей версии WRF-ARW Белгидромета отсутствовал. Поэтому для отработки технологических аспектов обучения использовались архивы прогнозов моделей COSMO-RuBy и COSMO-RuENA6 за 2019–2020 гг. Затем (после обучения) полученные алгоритмы коррекции были применены для расчетов совместной прогностической продукции на базе моделей COSMO-RuBy и модели WRF-ARW.

Архитектура (порядок блоков) нейронной сети для коррекции прогнозов температуры и точки росы приведена в табл. 4. Для коррекции характеристик ветра (порывов и фоновых значений) использовались аналогичные нейронные сети, но с размерностью выхода, равной 3. При оптимизации параметров нейронных сетей использовалась функция потерь Хьюбера, вычисление градиентов ошибки осуществлялось методом обратного распространения ошибки [8], а оптимизация весов – согласно методу Adam [7].

Примеры графиков оценок в период 1 мая – 31 августа 2021 г. показаны на рис. 9. Видно, что за рассмотренный теплый период прогнозы температуры воздуха и точки росы на высоте 2 м в дневное время в среднем точнее у модели WRF, а в ночное время – у модели COSMO-RuBy. Прогнозы скорости ветра на высоте 10 м оказались точнее у модели COSMO-RuBy для всех заблаговременностей, а давления, приведенного к уровню моря – для всех заблаговременностей, за исключением 12 и 15 ч.

Таблица 4. Аргументы нейронной сети и количество ее параметров при различных заблаговременностях прогноза**Table 4.** Arguments of the neural network and the number of its parameters for different forecast times

Заблаговременность, часы	Сдвиги по начальному сроку и заблаговременности (Δt , $\Delta \tau$), часы	Всего аргументов (предикторов)	Всего параметров нейронной сети
6	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (12, 6), (12, 12), (12, 18), (24, 18), (24, 24), (24, 30), (24, -6), (24, 0), (24, 6), (36, 30), (36, 36), (36, 42)	123	5210
9, 12, 15, 18	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (12, 6), (12, 12), (12, 18), (24, 18), (24, 24), (24, 30), (24, -6), (24, 0), (24, 6)	102	4706
21, 24, 27, 30	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (12, 6), (12, 12), (12, 18), (24, -6), (24, 0), (24, 6)	81	4202
33, 36, 39, 42	(0, -6), (0, -3), (0, 0), (0, 3), (0, 6), (24, -6), (24, 0), (24, 6)	60	3698
0, 3, 45, 48	(0, 0), (24, 0)	30	3338

Комплексифицированный с применением техник машинного обучения прогноз (технология Post-RuBy) с использованием обеих моделей (COSMO-RuBy и WRF-ARW) показал наилучшие результаты, близкие по качеству к прогнозам наилучшей из исходных моделей. Коррекция с использованием только прогнозов COSMO-RuBy (технология COSMO-RuBy+ML) для всех заблаговременностей и метеорологических параметров оказалась хуже комплексифицированного прогноза: для температуры воздуха на $0.08\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ (95% уровень статистической значимости оценен методом бутстрэп), для точки росы на $0.07\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, для давления на уровне моря на $0.05\text{ гПа} \pm 0.01\text{ гПа}$, для скорости ветра на $0.03\text{ м/с} \pm 0.01\text{ м/с}$.

Таким образом, комплексирование продукции моделей COSMO-RuBy и WRF-ARW с использованием технологии машинного обучения позволило уменьшить ошибки краткосрочного (до 2 суток) прогнозирования приземной температуры воздуха и точки росы до $1,7^{\circ}\text{C}$ в теплый период и до $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в феврале, скорости ветра до $0,9\text{ м/с}$, давления на уровне моря до $1,2\text{ гПа}$. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности внедрения и использования методики комплексирования прогнозностической продукции моделей COSMO-RuBy (Росгидромет) и WRF (Белгидромет).

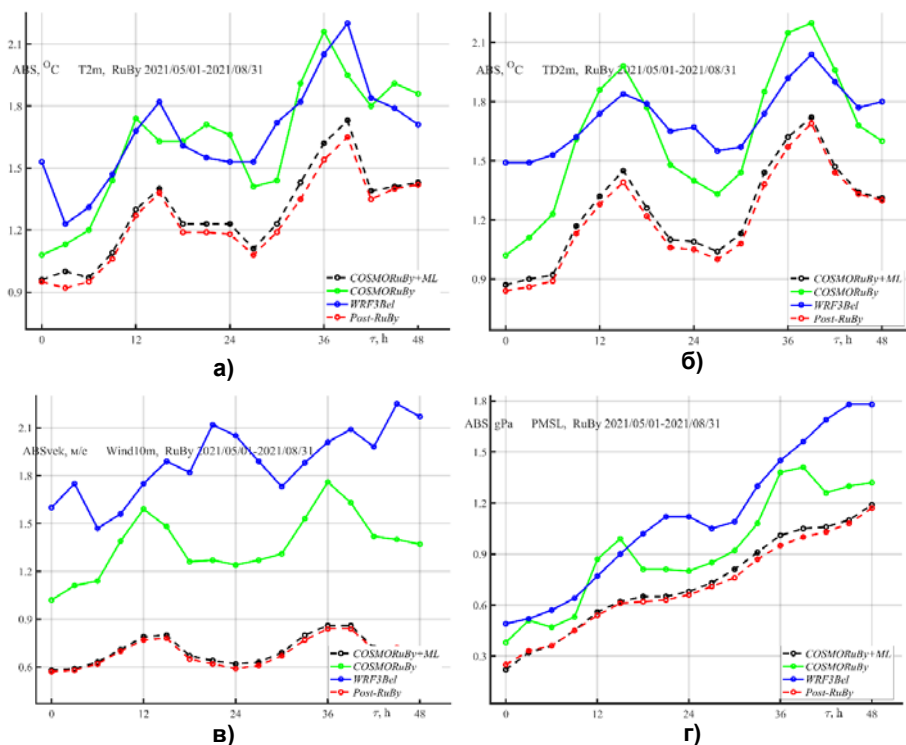


Рис. 9. Средние абсолютные погрешности прогнозов на территории ЕТР и Республики Беларусь. По осям: x – заблаговременности прогнозов; y – средняя абсолютная ошибка прогнозов: температуры воздуха на высоте 2 м (а); точки росы на высоте 2 м (б); вектора скорости ветра на высоте 10 м (в); давления на уровне моря (г). Зеленые линии: COSMO-RuBy; синие линии: WRF-ARW; красный пунктир: результат комплексирования и машинного обучения (технология Post-RuBy). черный пунктир: прогнозы COSMO-RuBy (только) откорректированные методом машинного обучения.

Fig. 9. Average absolute errors of forecasts on the territory of the European part of Russia and on the territory of Belarus in the period 01.05-31.08.2021. Axes: X forecast lead times; Y average absolute forecast errors of T2m (a); Td2m (б); wind speed vectors at a height of 10 m (в); sea level pressure (г). Green lines: COSMO-RuBy; blue lines: WRF-ARW; red dotted lines: the result of Post-RuBy technology; black dotted lines: COSMO-RuBy (only) forecasts corrected with using machine learning methods.

Заключение

В Гидрометцентре России в интересах метеослужб Союзного государства в рамках технологии COSMO-Ru реализована система регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RuBy с шагом вычислительной сетки 2.2 км (с использованием в качестве ядра модели

COSMO одноименного консорциума). Для удобного представления результатов (карт, метеограмм, аэрологических диаграмм) разработан и функционирует специализированный сайт, на котором реализовано 2-оконное представление информации.

В ходе совместных работ специалистов Гидрометцентра России и Белгидромета был решен ряд методических вопросов по представлению численной продукции для более полной интерпретации Вычисления COSMO-RuBy и обновление информации на сайте производится четыре раза в сутки.

В Белгидромете реализована система численного краткосрочного регионального прогноза погоды WRF-ARW с шагом вычислительной сетки 3 км. Вычисления и обновление предоставляемой синоптикам информации производятся дважды в сутки.

Реализован обмен унифицированной цифровой продукцией COSMO-RuBy и WRF-ARW между Гидрометцентром России (продукция COSMO-RuBy) и Белгидрометом (продукция WRF-ARW) через сервер ГВЦ Росгидромета в коде GRIB1 для унифицированной широтно-долготной сетки с шагом 0.025° (ориентировочным объемом 4 Гб в сутки).

В Белгидромете осуществляется визуализация прогностических данных моделей COSMO-RuBy и WRF для территории Республики Беларусь и сопредельных областей Российской Федерации в виде карт, таблиц, графиков с использованием АРМ синоптика-прогнозиста, а также производится сравнительный оперативный мониторинг успешности прогнозов.

В Гидрометцентре России созданы две технологии для получения комплексного прогностического продукта: ансамблевый лагированный прогноз, предоставляющий пользователям совокупность вероятностных характеристик, и система комплексной коррекции на основе машинного обучения. Объединенные продукты позволяют синоптикам дополнить прогнозы, полученные в каждой из стран, уточненными данными и характеристиками предсказуемости ожидаемых в ближайшие 36 часов погодных процессов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 05.09.2017 года № 169-ОК-Б/091701.

Список литературы

1. Алферов Ю.В., Копейкин В.В. Аспекты автоматизации в гидрометеорологической системе визуализации Isograph // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 17-22.
2. Быков Ф.Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 5-20.
3. Степанов Ю.А., Жабина И.И., Пурина И.Э., Недачина А.Ю., Елисеев Г.В. Автоматизированная технология Гидрометцентра России для оперативной обработки информации в высокопроизводительной кластерной инфраструктуре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 257-285.

4. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 6. С. 58-70.

5. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4 (374). С. 37-53.

6. Bengtsson L.K., Magnusson L., Källén E. Independent Estimations of the Asymptotic Variability in an Ensemble Forecast System // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136, is. 11. P. 4105-4112. DOI:<https://doi.org/10.1175/2008MWR2526.1>

7. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam // *ICLR Workshop*. 2016. Vol. 1. P. 2013-2016.

8. Galushkin A.I. *Neural network theory*, Springer, 2007. 402 p.

9. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill // *Q J R Meteorol Soc.* 2019. Vol. 145 (Suppl. 1). P. 25-34. <https://doi.org/10.1002/qj.3595>

References

1. Alferov Yu.V., Kopeikin V.V. Aspects of automation in the hydrometeorological visualization system Isograph. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 17-22 [in Russ.].

2. Bykov F.L. Statistical Correction of the COSMO Model Weather Forecasts Based on Neural Networks. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 3, pp. 141–152. DOI: 10.3103/S1068373920030012.

3. Stepanov Yu.A., Zhabina I.I., Purina I.E., Nedachina A.Yu., Eliseev G.V. Automated technology of the Hydrometeorological Center of Russia for operational information processing in a high-performance cluster infrastructure. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 257-285 [in Russ.].

4. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E. V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400–410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.

5. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeikin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 37-53 [in Russ.].

6. Bengtsson L.K., Magnusson L., Källén E. Independent Estimations of the Asymptotic Variability in an Ensemble Forecast System. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, no. 11, pp. 4105-4112. DOI: 10.1175/2008MWR2526.1.
7. Dozat T. Incorporating Nesterov Momentum into Adam. ICLR Workshop, 2016, vol. 1, pp. 2013-2016.
8. Galushkin A.I. Neural network theory. Springer, 2007. 402 p. [in Russ.].
9. Kalnay E. Historical perspective: earlier ensembles and forecasting forecast skill. *Q J R Meteorol Soc.*, 2019, vol. 145 (Suppl. 1), pp. 25-34. DOI: 10.1002/qj.3595.

*Поступила 25.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.*

*Submitted 25.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-30-49>

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

Обзор методов пространственной верификации и их применение для ансамблевых прогнозов

А.Ю. Бундель¹, А.В. Муравьев¹, Е.Д. Ольховая²

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия
a.bundel@gmail.com, muravev@mecom.ru*

Высокое разрешение современных моделей численного прогноза погоды позволяет детально воспроизводить мезомасштабные системы с высокой амплитудой метеовеличин и большими градиентами полей. Однако увеличение разрешения приводит к росту ошибок в пространстве и времени, причем количественная оценка таких ошибок наталкивается на известную "проблему двойного штрафа". Для решения этой проблемы в последние два десятилетия разработаны такие методы "пространственной верификации", в которых игнорируются умеренные ошибки (в первую очередь в положении), но сохраняется способность оценивать полезность детализированной информации.

В статье приводится классификация методов пространственной верификации с их кратким описанием и обзором международных проектов по сравнению свойств этих методов. Особое внимание уделяется публикациям по применению данных методов в ансамблевом прогнозировании. Перечисляются соответствующие программные средства и прилагается список наиболее употребимых в данной области англоязычных терминов с вариантами перевода на русский язык.

Ключевые слова: модели высокого разрешения, верификация, двойной штраф, пространственные методы, ансамблевый прогноз, объектно-ориентированные методы

Overview of spatial verification methods and their application to ensemble forecasting

A.Yu. Bundel¹, A.V. Muraviev¹, E.D. Olkhovaya²

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
a.bundel@gmail.com, muravev@mecom.ru*

State-of-the-art high-resolution NWP models simulate mesoscale systems with a high degree of detail, with large amplitudes and high gradients of fields of weather variables. Higher resolution leads to the spatial and temporal error growth and to a well-known double penalty problem. To solve this problem, the spatial verification methods have been developed over the last two decades, which ignore moderate errors (especially in the position), but can still evaluate the useful skill of a high-resolution model.

The paper refers to the updated classification of spatial verification methods, briefly describes the main methods, and gives an overview of the international projects for inter-comparison of the methods. Special attention is given to the application of the spatial

approach to ensemble forecasting. Popular software packages are considered. The Russian translation is proposed for the relevant English terms.

Keywords: high-resolution models, verification, double penalty, spatial methods, ensemble forecasting, object-based methods

Введение

По мере увеличения компьютерных ресурсов все шире используются модели численного прогноза погоды (ЧПП) высокого пространственного разрешения (2 км и выше). В целом, увеличение разрешения модели негативно сказывается на результате оценок для некоторых метеоэлементов при оценке стандартными методами. Модель высокого разрешения воспроизводит более точно очерченные мезоструктуры, большую амплитуду изменения метеоэлементов при более точной локализации и большие градиенты, что неизбежно ведет к большим ошибкам в пространстве и времени. Возникает проблема "двойного штрафа": при стандартном оценивании "точка с точкой", когда прогноз явления незначительно сдвинут по сравнению с наблюдаемым явлением, он штрафуются дважды: в точке, где явление прогнозировалось, но не случилось в реальности, и там, где оно было, но не спрогнозировано. Тем не менее такая модель дает больше полезной информации по сравнению с версией с более грубым разрешением, которая выдает более сглаженные поля. Возникает потребность в методах верификации, которые обладают некоторой терпимостью к умеренным ошибкам в пространстве и времени, сохраняя при этом способность оценивать истинное качество информации, которую дает модель высокого разрешения.

Кроме того, размерность задачи верификации пространственных полей метеоэлементов огромна, поскольку учитываются все точки сетки. Использование скалярных (одно число) метрик облегчает задачу, но не решает всех проблем. Традиционные оценки, сравнивающие прогноз и наблюдение в точке, имеют недостатки при оценке прогнозов высокого разрешения. Например, если мы оцениваем явление "Наличие осадков", все прогнозы с одинаковым количеством точек с явлением и отсутствием пересечения областей осадков в прогнозе и наблюдениях будут иметь одинаковые показатели, независимо от расстояния между областями осадков в поле прогноза и наблюдений, интенсивности осадков, формы областей и других свойств. Проблема двойного штрафа проиллюстрирована на рис. 1. Все прогнозы на рис. 1, кроме (е), дадут, например, оценку угроз $TS = 0$, хотя (е) субъективно не является лучшим прогнозом. Во многих ситуациях (а) является лучшим прогнозом, хотя будет иметь такие же плохие стандартные оценки, как и откровенно неправильный прогноз.

На протяжении последних 20 лет был разработан ряд методов, позволяющих уменьшить влияние двойного штрафа. Такие методы традиционно называются пространственными (spatial methods) [19]. Однако

некоторые из них позволяют учесть также сдвиг по времени. Они не наказывают незначительные сдвиги прогноза относительно наблюдения в пространстве и времени, т. е. позволяют избежать двойного штрафа. Также пространственные методы помогают снизить размерность задачи верификации, главным образом за счет введения понятия объекта с набором свойств вместо всего множества точек поля.

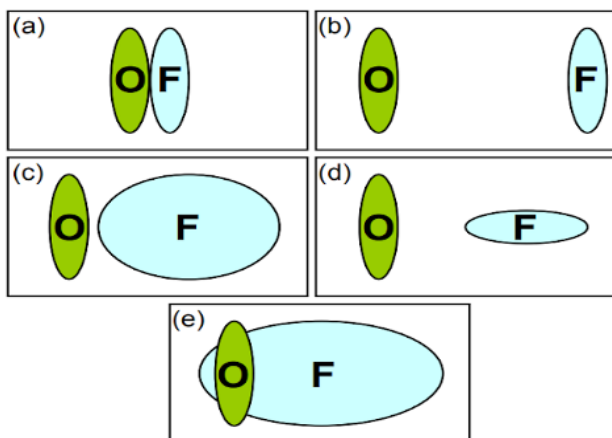


Рис. 1. Гипотетическая область прогноза (F) и наблюдения (O) явления [8]. При стандартном оценивании «точка с точкой», когда прогноз явления незначительно сдвинут по сравнению с наблюдаемым явлением, он штрафуются дважды: в точке, где явление прогнозировалось, но не случилось в реальности, и там, где оно было, но не спрогнозировано.

Fig. 1. Idealized areas of forecast and observation events [8]. The slight shift of the forecast event compared to the observation is penalized twice by the point-based scores: where the event is forecast but not occurred, and where it occurred but not forecast.

Традиционную оценку мезомасштабных прогнозов рекомендуется дополнять методами и приемами пространственной верификации, особенно это касается разрывных полей, таких как поля количества осадков и облачности.

1. Классификация пространственных методов

Новизна методов пространственной верификации в сопоставлении с традиционными обусловлена в первую очередь богатством и многозначностью понятий "объекта" и "сходства объектов" в сопоставлении с предельной простотой понятий "точки" и "разности двух чисел".

Обилие предлагаемых пространственных методов и не всегда понятные свойства порождаемой ими информации послужили стимулом к их целенаправленному анализу в рамках международных проектов, среди которых наиболее значимыми представляются проект ICP по сравнению

методов пространственной верификации (spatial forecast verification Inter-Comparison Project, ICP, время выполнения 2007–2009 гг.) и развивающий его результаты проект MesoVICT по сравнению методов мезомасштабной верификации над сложным рельефом (Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain, время выполнения 2014–2019 гг.) [15, 16]. Подчеркнем, что речь идет о сравнении самих методов верификации и их свойств, т. е. о "метаверификации" – науке о методах и о системах верификации [24], а не о сравнении прогностических систем. Результаты этих проектов уже находят практическое применение в исследованиях и в оперативной деятельности метеорологических центров и служб [9]. В России пространственный аспект верификации разрабатывался в работах [1–6]. При этом многие методологические вопросы пространственной верификации еще нуждаются в уточнении и далеки от решения.

В проекте ICP были сформулированы следующие задачи:

- 1) каким образом методы информируют о качестве на разных масштабах;
- 2) каким образом методы информируют о локальных ошибках;
- 3) поставляют ли методы информацию об ошибках в интенсивности и в распределении;
- 4) поставляют ли методы информацию об ошибках в структуре;
- 5) поставляют ли методы информацию о попаданиях, промахах и ложных тревогах;
- 6) есть ли в методах что-либо, противоречащее интуиции;
- 7) имеются ли в методах какие-либо параметры и насколько результаты чувствительны к их выбору;
- 8) насколько просто производить агрегирование результатов по множеству случаев;
- 9) способны ли методы идентифицировать ошибки в определении моментов времени;
- 10) могут ли быть быстро рассчитаны доверительные интервалы и критерии гипотез.

В сравнении участвовало 18 методов, разработанных в период с 2000 по 2009 год. В самом начале выполнения проекта была проведена классификация почти всех разработанных до этого времени методов на две большие категории – на методы фильтрации (filtering methods) и методы смещения (displacement methods). В свою очередь, методы фильтрации были подразделены на две группы – окрестные и масштабно-разделительные (neighborhood and scale separation), а методы смещения – на объектно-ориентированные и деформационные (features based and field deformation) [20].

В статье [7] описаны использованные участниками проекта наборы идеализированных геометрических и возмущенных прогнозов с заданными ошибками, а также набор реальных прогнозов в центральной части США конвективных осадков на сетке 4 км. Геометрические случаи

состояли в представлении областей осадков в виде эллиптических форм со сдвинутым ядром высокой интенсивности и при типичных, схематизированных ошибках прогнозирования этих областей (сдвиг по пространству, различие площадей, занятых осадками, разница в частоте прогнозирования явления по отношению к частоте явления по наблюдениям и др.).

В качестве "традиционных оценок" качества прогнозов использованы 13 показателей, в том числе: критический индекс успешности – Critical Success Index, CSI; показатель Пирса – Обухова – Hanssen – Kuipers (H-K); показатель мастерства Хайдке – Heidke skill score (HSS); предупрежденность явления, ложная предупрежденность явления, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент корреляции. Из методов пространственной верификации особое внимание уделено оценке по пространственным долям FSS (Fractions Skill Score), разложению по масштабам ошибки прогноза (Intensity Scale, IS), объектно-ориентированному методу SAL (Structure, Amplitude, Location) (некоторые из этих методов описаны ниже).

Было проведено сравнение методов, проанализированы результаты для геометрических случаев и представлены субъективные и традиционные оценки по реальным случаям. В результате, в частности, выяснилось, что все новые методы смогли обнаружить систематическую ошибку (bias), а объектно-ориентированные и деформационные методы оказались способными диагностировать ошибки смещения областей осадков.

При сравнении модельных прогнозов с реальными данными традиционные оценки чаще всего не совпадали с субъективными оценками прогнозов синоптиками. В [7] обсуждается важная проблема согласования "объективного" оценивания прогнозов одной мерой с субъективными оценками синоптика-прогнозиста. Притом что никакая единственная традиционная оценка не может дать содержательной информации, было бы желательно отыскать некоторое объединение традиционных оценок в одну такую, которая бы привела к согласию с субъективным оцениванием.

Основные итоги выполненного проекта ICP были сформулированы в статье [19]. Была составлена итоговая таблица соответствия четырех групп методов следующим пяти типам порождаемой ими информации с характеристиками: 1) пространственных масштабов мастерства прогнозов; 2) ошибок локализации; 3) ошибок в интенсивности; 4) ошибок в структуре; 5) повторяемости (попадания, промахи и ложные тревоги). По таблице, в частности, можно увидеть, что методы фильтрации (окрестные и масштабноразделительные) способны описать "масштаб", на котором прогноз достигает определенного уровня мастерства, а методы смещения (объектно-ориентированные и деформационные) способны оценить ошибки в смещениях.

В проекте MesoVICT основное внимание было уделено новым вопросам [16]:

- Какова способность метода оценивать переменные помимо осадков?
- Может ли метод быть адаптирован для ансамблевого прогноза?
- Применим ли метод в условиях сложного рельефа?
- Насколько чувствителен метод к настройчным параметрам, выбору метода интерполяции?
- Адекватно ли метод сравнивает модели грубого и высокого разрешения?
- Возможен ли в методе учет неопределенности наблюдений?

В рамках MesoVICT была создана база данных модельных, в том числе ансамблевых прогнозов высокого разрешения, а также качественный архив наблюдений, включая ансамбль наблюдений VERA в регионе Альп. Также было предложено шесть основных тестовых случаев с характерными синоптическими условиями.

Классификация пространственных методов была дополнена и уточнена, отдельно была выделена группа мер дальности (distance metrics) (рис. 2). Пересечения на рисунке означают взаимопроникновение отдельных групп. Так, например, сглаживание, характерное для методов фильтрации, часто применяется в качестве начального шага в объектно-ориентированных методах.

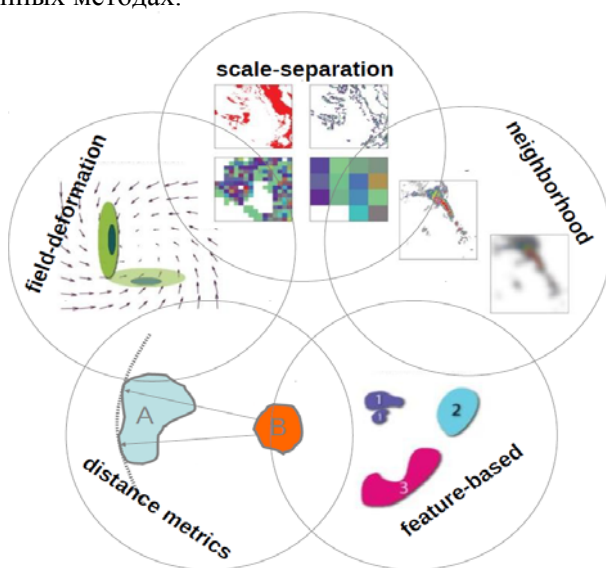


Рис. 2. Классификация пространственных методов верификации [16] на окрестные и масштабно-разделительные (neighborhood and scale-separation), объектно-ориентированные и деформационные (feature-based and field-deformation), а также меры дальности (distance metrics).

Fig. 2. Classification of spatial verification methods [16]: neighborhood and scale-separation methods, feature-based and field-deformation methods, and distance metrics.

В результате MesoVICT появилось много исследований по применению пространственных методов для нетрадиционных переменных, сложного рельефа, ансамблей (часть из них цитируется в данной работе), однако результаты проекта еще находятся в стадии обобщения.

Приведем краткое описание основных групп методов.

2. Окрестные (neighborhood) методы

Раньше эти методы чаще назывались Fuzzy (нечеткие). Основное их свойство – доверие к прогнозу в окрестности [18]. Оценка соответствия прогноза явления и наблюдения в точке замещается оценкой прогноза и/или наблюдения в окрестности точки, которая предполагает какую-либо обработку данных внутри окна (окрестности), например:

- Расчет среднего значения (апскейлинг – upscaling)
- Наличие явления где-нибудь внутри окна
- Частота явления в окне – аналог вероятности
- Распределение величин в окне

Если в окне рассматривается также наблюдение – это позволяет косвенно учесть неопределенность наблюдений.

Возможно, самый популярный окрестный метод – это оценка по пространственным долям, Fractions Skill Score, FSS [25]. Рассматривается доля ячеек в окрестности, занятых явлением, P , в поле прогноза и поле наблюдений (рис. 3).

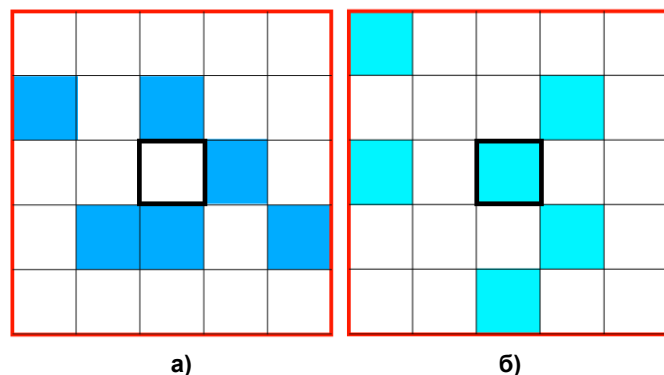


Рис. 3. Доля ячеек, занятых явлением (закрашенные ячейки) в окрестности 5×5 точек одинакова для прогноза (а) и наблюдения (б) и равна $6/25=0.24$, в то время как оценка только в центральной точке окрестности (выделена жирной черной рамкой) дала бы плохие оценки (по прогнозу явления нет, а по наблюдению есть).

Fig. 3. Fraction of grid cells with an event in a 5×5 neighborhood is equal for the forecast (a) and observation (б) ($6/25=0.24$). The score at the central point only would be low.

Далее рассчитывается среднеквадратическая разность P прогноза и наблюдений по всем точкам сетки N , в знаменателе FSS фигурирует наилучший возможный прогноз:

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{fct} - P_{obs})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{fct}^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{obs}^2}$$

Величина FSS полезного прогноза задается больше $FSS_{uniform} = 0.5 + f_0/2$, где f_0 доля ячеек с явлением по наблюдениям во всей области прогноза ($FSS_{uniform}$ соответствует FSS в центральной точке окрестности, которую имел бы прогноз со значением f_0 в каждой точке области). Оценку FSS следует рассчитывать для размеров окрестности возрастающей величины: в центральной точке, окрестности 3×3 точки, 5×5 , 7×7 и т. д.

С помощью FSS мы хотим узнать:

- Как изменяется мастерство прогноза с ростом окрестности?
- Какой наименьший размер окрестности дает достаточно точные прогнозы?
- Дает ли модель более высокого разрешения более точные прогнозы?

В [28] показан способ использования FSS для оценки смещения прогностической области явления в пространстве относительно наблюдений. Метод основан на соотношении между FSS, размером окрестности и смещением по пространству. Показано, что метод работает только при отсутствии большого сдвига частоты (FBI, frequency bias) в прогнозе, конкретно при значениях FBI от 0,75 до 1,5. Однако это ограничение можно преодолеть заданием порогового значения на основе процентиля исследуемой переменной. Далее Г. Скок [29] ввел модификацию FSS, окрестная мера мастерства – Neighborhood Skill Score, NSS. Оценка смещения NSS не ограничена значениями FBI, что делает ее более удобной в использовании.

В [14] FSS была использована для расчета соотношения пространственного разброса по ансамблю и ошибки ансамбля. Для этого были рассчитаны среднее значение и стандартное отклонение FSS, рассчитанной для каждой пары членов ансамбля (dispersive FSS, dFSS), а также среднее и стандартное отклонение FSS, рассчитанной для каждого члена ансамбля и наблюдения (eFSS). Высокие значения среднего dFSS означают, что все члены ансамбля предсказывают область явления близко друг от друга, соответственно, пространственный разброс по ансамблю мал. Стандартное отклонение dFSS показывает интервал значений dFSS, высокое стандартное отклонение dFSS означает, что имеются выбросы с особенно низким или высоким dFSS. Для eFSS делаются соответствующие заключения, но не для разброса внутри ансамбля, а для ошибки каждого

из членов ансамбля по отношению к наблюдениям. Затем проводится анализ соотношения пространственного разброса и ошибки ансамбля аналогично стандартному анализу соотношения разброс-ошибка ансамбля (spread-error relationship). Данный анализ широко применяется в настоящее время, например в [10].

При применении FSS и ее модификаций следует иметь в виду, что эти оценки дают неточные результаты для объектов, близких к границе области.

Примеры пространственных оценок с использованием апскейлинга, а также их сравнение с традиционными оценками для экспериментальной системы сверхкраткосрочного прогноза погоды, подготовленной в ФГБУ «ЦАО» с использованием модели атмосферы WRF ARW, системы трехмерного вариационного усвоения данных WRF 3D-Var и технологий даунскейлинга даны в [1].

3. Масштабно-разделительные методы (scale-separation methods)

Масштабно-разделительные методы оценивают ошибку прогноза в зависимости от масштаба. Наиболее известный метод – разложение по масштабам ошибки прогноза – метод Intensity-scale verification approach (IS) [11]. Бинарная ошибка прогностического поля относительно поля наблюдений раскладывается на сумму компонентов разных масштабов, как правило, с помощью вейвлет-фильтра (например, вейвлет 2D Haar). Для компонентов каждого из масштабов рассчитывается ряд оценок (среднеквадратическая мера мастерства, оценка Брайера, и т. п.).

Отметим, что различие окрестных и масштабно-разделительных методов состоит в том, что окрестные методы отфильтровывают ошибку на мелких масштабах, а масштабно-разделительные методы выделяют ошибку на каждом из масштабов.

4. Объектно-ориентированные методы

Объектно-ориентированная верификация (object-based или features-based) предназначена для оценки способности прогностической системы воспроизводить структурные элементы полей вместе с их перемещением и эволюцией [12, 13, 17, 23]. Основные и первые примеры применения пространственной верификации относятся к осадкам в силу их высокой пространственно-временной изменчивости, которая затрудняет идентификацию и прогнозирование областей осадков и делает осадки своего рода "метрикой качества гидродинамических моделей".

Под "объектами" здесь понимаются пространственные, в основном односвязные области полей на земной поверхности, выделяемые некоторым пороговым значением исследуемой величины, например – суммарное количество осадков больше некоторого порога. Таким образом, идентификация объекта производится, как правило, выбором произвольной

изолинии, очерчивающей замкнутую границу объекта. Часто предварительно проводят процедуру сглаживания исходного поля, например, с помощью фильтра свертки, т. е. осреднения внутри некоторого радиуса вокруг каждой точки поля.

Более сложен вопрос связности области, выделенной замкнутой линией – учитывать ли многосвязность или устранять её? Собственно говоря, требуется выбрать такой радиус осреднения, при котором и граница станет более гладкой, и область более односвязной, но при этом сохранятся важные для анализа области малого масштаба. Все эти проблемы возникают каждый раз при анализе и прогнозе областей мезомасштабных осадков, и удовлетворить все запросы не представляется возможным.

После пространственного осреднения полей, выделения объектов подходящей гладкости границ и близких к односвязности возникает очередная проблема статистического описания объектов. Простейшие характеристики – это центр тяжести, учитывающий интенсивность осадков, и размер, оцениваемый в количестве точек или в площади. Несмотря на сглаживание, границы зон осадков могут принимать самые разнообразные формы и для характеристик объекта, отличных от его объема (как, например, в [13]), сопоставление полос в наблюдениях и кругов в прогнозах становится затруднительно.

В России объектно-ориентированный подход к верификации применен в [3–6].

CRA (Contiguous Rain Area), Сопряженная область дождя – объектно-ориентированный метод верификации прогнозов, предложенный в [17]. Вкратце он состоит в следующем: вначале в полях наблюдений и прогноза выделяются объекты (чаще всего осадков) на основе порогового значения. Затем с помощью той или иной функции (в которой используется расстояние между объектами) выделяются пары объектов в поле наблюдений и прогнозов. Затем определяется оптимальный сдвиг прогностического объекта в пространстве к наблюдаемому объекту путем минимизации ошибки. Здесь также могут применяться различные критерии, например коэффициент корреляции или среднеквадратичная ошибка MSE. Находится разность исходной MSE (представляемой как $MSE_{total} = MSE_{displacement} + MSE_{volume} + MSE_{pattern}$) и MSE после сдвига, это ошибка из-за сдвига в пространстве $MSE_{displacement} = MSE_{total} - MSE_{shifted}$. Оставшаяся MSE состоит из квадрата разности среднего количества осадков в прогностическом и наблюдаемом объекте $MSE_{volume} = (F - X)^2$ и мелкомасштабных различий $MSE_{pattern} = MSE_{shifted} - MSE_{volume}$. Пример применения CRA для оценки наукастинга ФГБУ «Гидрометцентр России» можно найти в [6]

MODE, Method for Object-Based Diagnostic Evaluation – Метод объектно-ориентированной диагностической верификации [12, 13] предназначен для сравнения сеточных прогнозов и сеточных наблюдений.

Метод MODE может использоваться для решения общих задач сравнения любых двух полей, содержащих однозначно определенные объекты. Метод MODE был разработан, чтобы приблизить объективный расчет качества прогноза объектов к субъективному суждению синоптика.

Расчеты оценок с помощью MODE производятся в следующей последовательности.

1. Определение объектов в полях прогноза и наблюдения с помощью пользовательских параметров (выбор фильтра для сглаживания полей, выбор пороговых значений).

2. Выбор и расчет атрибутов для каждого из этих объектов: например, площади, центроиды ("центры масс"), углы наклона оси, интенсивности, сложность контура и др.

3. Расчет разностей между атрибутами для каждой пары объектов в поле прогноза и наблюдения: например, отношение площадей, отношение площади перекрытия, расстояние между центроидами, разность углов наклона, отношение интенсивностей и др.

4. Выбор функций нечеткой логики F для расчета суммарной важности (total interest) для каждой пары объектов из соответствующих полей прогноза и наблюдения (на рис. 4 приведен пример таких функций). Смысл их в том, что хорошему соответствию атрибута (например, малому расстоянию между центроидами) придается значение 1, которое уменьшается (как правило, линейно) до нуля вплоть до значения разности атрибутов, бессмысленного для пользователя (например, расстояние между центроидами слишком большое). Таким образом, все значения разностей атрибутов переводятся с помощью функций нечеткой логики в значения от 0 до 1.

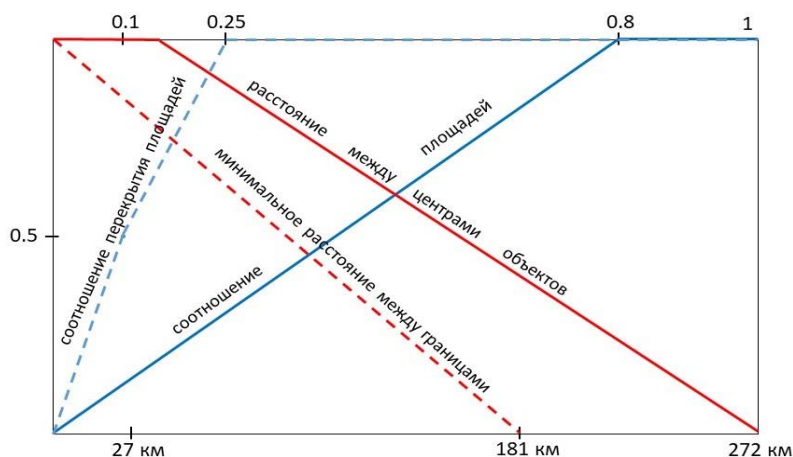


Рис. 4. Пример функций нечеткой логики для перевода разностей атрибутов в значения от 0 до 1.

Fig. 4. Example of fuzzy logic functions to pass from attribute differences to values from 0 to 1.

5. Выбор весов w для каждого из атрибутов, а также коэффициента надежности c (отражающего, насколько мы уверены в точности определения значения атрибута. Например, при малой разности углов наклона надежность меньше; на практике обычно берут 1).

6. Вычисление суммарной важности (Total Interest, TI) для всех пар объектов в поле прогноза и наблюдений:

$$TI_j = \frac{\sum_i I_{ij}}{\sum_i w_i c_i}$$

$$I_{ij} = F_{ij} w_i c_i$$

где i – номер атрибута; j – номер пары объектов.

7. Выбор порогового значения TI для сопоставления (спаривания) объектов в парах. Если TI больше порогового значения в какой-либо паре объектов прогноз-наблюдение, данный объект считается правильно спрогнозированным. Имеется также ряд алгоритмов для объединения (слияния) объектов внутри одного и того же поля – получение кластеров объектов.

8. Вывод обобщенных статистических характеристик отдельных объектов, пар объектов и кластерных объектов, полученных сопоставлением и объединением простых объектов. Расчет медианы максимального интереса – основной интегральной характеристики качества прогноза MODE.

Достоинства MODE:

- Может применяться в режиме спаривания объектов и нет
- Рассчитывает единый показатель качества (ММИ)
- Дает информацию о пропусках и ложных тревогах

MODE – очень гибко настраиваемый метод за счет введения функций нечеткой логики, пороговых значений и весов в зависимости от цели и объекта верификации. Это в то же время является его недостатком, поскольку MODE содержит много настроечных параметров. В отличие от CRA, где общая ошибка сразу раскладывается на составные части, характеризующие разные аспекты качества прогноза объектов, суммарная важность TI в MODE объединяет несколько аспектов качества прогнозов. Это, однако, может быть преодолено расчетом TI для различных атрибутов по отдельности.

5. Применение пространственных методов для ансамблевого прогноза

В последние несколько лет применение пространственных методов для ансамблей является особенно актуальной задачей, поскольку с ростом вычислительных мощностей стал возможным ансамблевый прогноз высокого разрешения. Как и в случае детерминированного прогноза, наиболее прочно вошла в практику верификации комбинация окрестного

и объектно-ориентированного подходов. Применение FSS для ансамбля было описано в п. 3. Остановимся на еще двух методах, доказавших свою перспективность.

Метод ансамблевой вероятности в окрестности – Neighborhood ensemble probability, NEP, и **метод максимальной вероятности в окрестности** – Neighborhood maximum ensemble probability, NMEP [26, 27]. В [27] метод создания вероятностного прогноза из детерминистского на основе количества точек с явлением в окрестности [30] был перенесен на ансамблевый прогноз. В [26] были введены названия Neighborhood ensemble probability, NEP, и метод максимальной вероятности в окрестности – Neighborhood maximum ensemble probability, NMEP. В NEP рассчитывается вероятность явления в каждой точке выбранной окрестности, а затем находится средняя в окрестности вероятность. В NMEP для каждой точки рассчитывается доля членов ансамбля, для которых явление предсказывается где-либо в окрестности точки. Как и обычно, явление задается с помощью порогового значения.

На рис. 5 приведен пример поля NMEP. Далее полученное поле оценивается с помощью обычных вероятностных метрик качества. Такие продукты полезны для синоптика, однако часто они оказываются слишком сглаженными и возникает потребность дополнять их объектно-ориентированными методами [22].

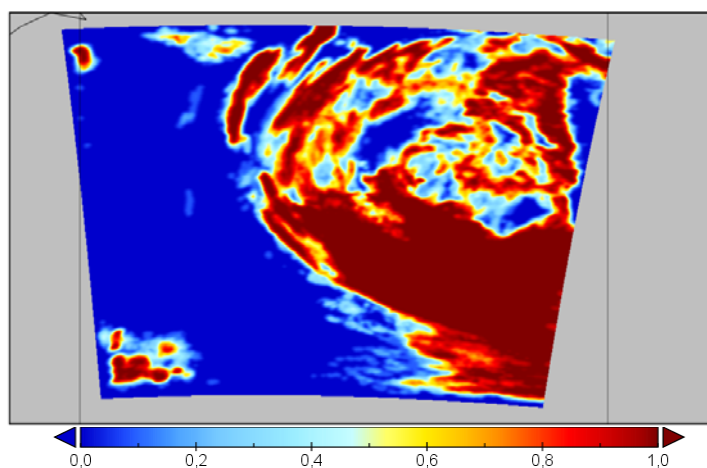


Рис. 5. Ансамблевая максимальная вероятность количества осадков > 0.1 мм/ч в окрестности (Neighborhood maximum ensemble probability, NMEP), Ансамбль ICON-Ru-EPS, 2.2 км, 11 членов, окрестность – 9 точек, старт – 00 ч ВСВ, дата – 01.07.2021.

Fig. 5. Neighborhood maximum ensemble probability, NMEP, precipitation accumulation > 0.1 mm/h, ICON-Ru-EPS ensemble with 2.2 km grid mesh, 11 members, neighborhood of 9 points, run from 2021.07.01, 00 UTC.

Метод псевдочлена ансамбля [22] основан на применении MODE для ансамбля. Джонсон с коллегами из университета Оклахомы на протяжении десятилетия развивают свой подход к оцениванию конвективно-разрешающего ансамбля. Вначале они использовали объекты контрольного члена ансамбля как эталон и находили соответствующие объекты в полях остальных членов ансамбля. На основе количества объектов, соответствующих каждому из объектов контрольного члена, рассчитывалась вероятность каждого из объектов контрольного члена [21]. Ограничением этого метода является выбор контрольного члена в качестве основного. Затем метод был усовершенствован. В новом методе создается так называемый «псевдочлен» ансамбля из наиболее репрезентативных объектов.

На рис. 6 приведен пример создания псевдочлена.

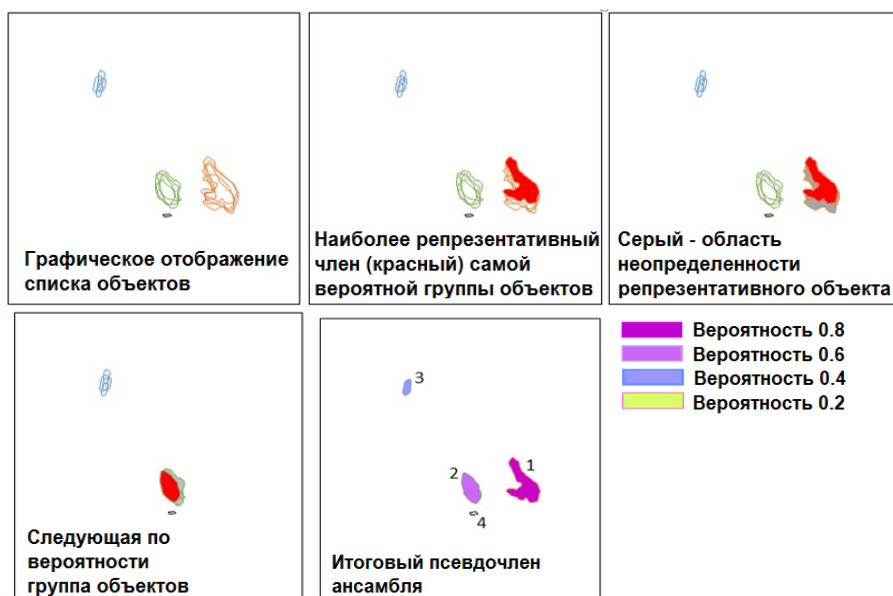


Рис. 6. Схематический пример создания псевдочлена ансамбля.

Fig. 6. Schematic picture of pseudomember creation.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- Создать список всех объектов в ансамбле
- Рассчитать суммарную важность (Total Interest, TI, см. п. 5 MODE) для всех пар объектов из всех членов ансамбля
- Определить соответствующие друг другу пары объектов (matching) на основе порогового значения суммарной важности TI
- Рассчитать вероятность появления для каждого объекта на основе количества членов ансамбля с объектом, соответствующим данному (включая его самого), по отношению к общему количеству членов ансамбля

- Выбрать группу соответствующих друг другу объектов с наибольшей вероятностью
- Внутри этой группы выбрать репрезентативный объект с наибольшим значением средней суммарной важности по отношению к другим объектам группы, добавить этот объект в псевдо-член. Убрать этот объект и всю группу соответствующих ему объектов из списка
- Выбрать группу соответствующих объектов со следующим значением вероятности
- Повторить данный алгоритм, пока в списке не останется ни одного объекта

Таким образом, на выходе мы получаем список объектов псевдо-члена с разными вероятностями, а также область неопределенности каждого объекта псевдо-члена, определяемую группой влияющих (соответствующих ему) объектов. Далее можно установить пороговые значения вероятности и рассчитать обычные оценки MODE для полученных объектов.

6. Наиболее популярные пакеты программного обеспечения для реализации пространственных методов

CRA. Исторически первым стал пакет CRA, написанный на языке IDL и реализованный для нужд австралийской службы погоды. Пакет опробован в нескольких странах, получил высокую оценку и стал применяться в экспериментальном режиме в некоторых метеослужбах. Однако, с одной стороны, узкая направленность методики с расчетом около десятка характеристик, а с другой стороны, использование лицензионного языка программирования не способствовали широкому распространению пакета, хотя он продолжает модифицироваться и до сих пор служит средством оценок и удобным пособием для университетского обучения в некоторых странах [17].

MET. Система верификации прогностических моделей MET (Model Evaluation Tools), первая версия которого выпущена в январе 2008 г., была разработана в США Исследовательским Центром для Тестирования моделей DTC (Developmental Testbed Center) [<https://dtcenter.org/community-code/metplus>]. Пакет MET включает возможность расчета оценок на основе окрестного подхода, метод MODE, а также метод разложения по масштабам ошибки прогноза, Intensity-scale (IS).

SpatialVx (R). Комплекс SpatialVx ("библиотека" в языке R) является, возможно, наиболее современным, полным и подробно документированным программным средством, реализующим большинство известных методов пространственной верификации. Комплекс написан Э. Гиллеландом в 2012 г. по плану научно-исследовательской деятельности лаборатории

RAL и по результатам выполнения проекта ICP. Автор регулярно производит корректировку программного обеспечения, включая исправление обнаруженных пользователями ошибок, и расширяет комплекс новыми возможностями [<https://cran.r-project.org/web/packages/SpatialVx/index.html>]. Приведем список методов пространственной верификации, заключенный в комплексе версии 0.7 от 31 августа 2020 г.

Автор сохраняет классификацию методов на две большие категории методов фильтрации и методов перемещения, введя группу мер близости [16] во вторую категорию. Таким образом, категория фильтрации (Filter Methods) включает в себя окрестные и масштабо-разделительные методы (Neighborhood Methods, Scale Separation Methods), а категория перемещения (Displacement Methods) состоит из суммарных мер близости и пространственного выравнивания (Distance-based and Spatial-Alignment Summary Measures), деформации полей (Field deformation), объектно-ориентированных методов (Features-based methods) и мер геометрической характеристики (Geometrical characterization measures).

Несомненным достоинством комплекса является наличие функций для оценки статистической значимости результатов верификации прогноза полей (field significance) с помощью процедур перевыборок с повтором (блочный бутстреп) и полу-параметрический монте-карловский метод Ливзи – Чена. Однако эти функции требуют организации полей во временной последовательности. Помимо статистических характеристик пространственной верификации имеется возможность расчета некоторых стандартных показателей качества, например, градиентной оценки S1 и коэффициента корреляции аномалий.

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.4 и 1.1.5.

Заключение

Традиционные методы верификации современных моделей ЧПП высокого разрешения рекомендуется дополнять новыми пространственными методами. В статье приведена классификация пространственных методов и описание основных из них. Наиболее часто в мировой практике применяются окрестные методы в комбинации с объектно-ориентированными, в том числе для оценки ансамблевого прогноза.

Список литературы

1. Зарипов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Шумилин А.А., Травов А.В. Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 60-86.
2. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 43-60.

3. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 5-10.
4. Кисельникова В.З. Результаты объектно-ориентированной оценки качества прогнозов осадков по мезомасштабной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 34-42.
5. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май–сентябрь) 2016–2020 гг. по модели COSMO-Ru2 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 43-51.
6. Муравьев А.В., Киктёв Д.Б., Смирнов А.В. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода года (май–сентябрь 2017 г.) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367). С. 6-38.
7. Ahijevych, D., Gilleland E., Brown B.G., Ebert E.E. Application of spatial verification methods to idealized and NWP-gridded precipitation forecasts // Wea. Forecasting. 2009. Vol. 24. P. 1485-1497.
8. Brown B.G., Bullock R., David C.A., Gotway J.H., Chapman M.B., Takacs A., Gilleland E., Manning K., Mahoney J. New verification approaches for convective weather forecasts // 11th Conf. Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Amer. Met. Soc., 4-8 Oct 2004, Hyannis, MA.
9. Bundel A., Gofa F. et al. COSMO Priority Project INSPECT. Final Report. January 2019. 67 p. DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/cosmo-tr37
10. Cafaro C., Woodhams B.J., Stein T.H.M., Birch C.E., Webste, S., Bain C.L., Hartley A., Clarke S., Ferrett S., Hill P. Do Convection-Permitting Ensembles Lead to More Skillful Short-Range Probabilistic Rainfall Forecasts over Tropical East Africa? // Wea. Forecast. 2021. Vol. 36, is. 2. P. 697-716. DOI: 10.1175/WAF-D-20-0172.1
11. Casati B., Ross G., Stephenson D.B. A new intensity-scale verification approach for the verification of spatial precipitation forecasts // Meteorol Appl. 2004. Vol. 11. P. 141-154.
12. Davis C.A., Brown B.G., Bullock R., Halley-Gotway J. The Method for Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) Applied to Numerical Forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program DOI // Wea. Forecast. 2009. Vol. 24, is. 5. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222241.1>
13. Davis C., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. // Mon. Wea. Rev. 2006. Vol. 134. P. 1772-1784.
14. Dey S.R., Leoncini G., Roberts N.M., Plant R.S., Migliorini S. A spatial view of ensemble spread in convection permitting ensembles // Mon. Wea. Rev. 2014. Vol. 142. P. 4091-4107, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00172.1>.
15. Dorninger M., Mittermaier M.P., Gilleland E., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J. MesoVICT: Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain // NCAR Technical Note NCAR/TN-505+STR, 2013. 23 p. DOI:10.5065/D6416V21. <http://nldr.library.ucar.edu/repository/collections/TECH-NOTE-000-000-000-874>
16. Dorninger M., Gilleland E., Casati B., Mittermaier M.P., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J. The setup of the MesoVICT project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2018. Vol. 99. P. 1887-1906.
17. Ebert E., McBride J. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors // J. Hydrol. 2000. Vol. 239. P. 179-202.

18. Ebert E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework // Meteor. Appl. 2008. Vol. 15. P. 51-64. DOI:10.1002/met.25
19. Gilleland E., Ahijevych D.A., Brown B.G., Ebert E.E. Verifying Forecasts Spatially // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2010. Vol. 91. P. 1365-1373. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS2819.1>
20. Gilleland E., Ahijevych D., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E. Intercomparison of spatial forecast verification methods // Wea. Forecasting. 2009. Vol. 24. P. 1416-1430.
21. Johnson and Wang. Verification and Calibration of Neighborhood and Object-Based Probabilistic Precipitation Forecasts from a Multimodel Convection-Allowing Ensemble // Mon. Wea. Rev. 2012. Vol. 140. P. 3054-3077.
22. Johnson A., Wang X., Wang Y., Reinhart A., Clark A.J., Jirak I.L. Neighborhood- and Object-Based Probabilistic Verification of the OU MAP Ensemble Forecasts during 2017 and 2018 Hazardous Weather Testbeds // Wea. Forecast. Vol. 2020. Vol. 35. P. 169-191. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0060.1>
23. Jolliffe Ian T., Stephenson D.B. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science: 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2012, 292 p.
24. Murphy A.H. The Finley affair: a signal event in the history of forecast verification // Wea. Forecast. 1996. Vol. 11. P. 3-20.
25. Roberts N.M., Lean H.W. Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events // Mon. Wea. Rev. 2008. Vol. 136. P. 78-97. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1>
26. Schwartz C.S., Sobash R.A. Generating Probabilistic Forecasts from Convection-Allowing Ensembles Using Neighborhood Approaches: A Review and Recommendations // Mon. Wea. Rev. 2017. Vol. 135. P. 3397-3418. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0400.1>
27. Schwartz C.S., Kain J.S., Weiss S.J., Xue M., Bright D.R., Kong F., Thomas K.W., Levit J.J., Coniglio M.C., Wandishin M.S. Toward Improved Convection-Allowing Ensembles: Model Physics Sensitivities and Optimizing Probabilistic Guidance with Small Ensemble Membership // Wea. Forecast. 2010. Vol. 25. P. 263-280. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222267.1>
28. Skok G., Roberts N. Estimating the displacement in precipitation forecasts using the Fractions Skill Score // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2018. Vol. 144. P. 414-425. <https://doi.org/10.1002/qj.3212>
29. Skok G. A new spatial displacement measure for continuous fields, IVMW2020, 2020. https://www.univie.ac.at/img-wien/jwgfvr/SpatialMethods/2020111615/Skok_2020IVMWO_SpatialMethods_16Nov15UTC.pdf
30. Theis S. E., Hense A., Damrath U. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach // Meteor. Appl. 2005. Vol. 12. P. 257-268. <https://doi.org/10.1017/S1350482705001763>

References

1. Zaripov R.B., Pavlyukov Yu.B., Shumilin A.A., Travov A.V. Application of radar information for verification of the high-resolution numerical weather prediction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 368, no. 2, pp. 60-86 [in Russ.].
2. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Tarasov A.V. Analysis of numerical forecasts of heavy precipitation with the WRF model using various convection schemes

(a case study for the Perm Krai). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 373, no. 3, pp. 43-60 [in Russ.].

3. Kisel'nikova V.Z. Object-based evaluation of precipitation forecast quality. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 4, pp. 217-221. DOI: 10.3103/S1068373913040018.

4. Kisel'nikova V.Z. The results of object-oriented estimation of precipitation forecast quality using the mesoscale model of the Hydrometcentre of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2014, vol. 351, pp. 34-42 [in Russ.].

5. Kisel'nikova V.Z. Object-oriented assessment of COSMO-Ru2 precipitation forecast quality for the warm season (May-September) in 2016-2020. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2021, vol. 380, no. 2, pp. 43-51 [in Russ.].

6. Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Operational precipitation nowcasting system based on radar data and verification results for the warm period of the year (May-September 2017). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 367, no. 1, pp. 6-38 [in Russ.].

7. Ahijevych, D., Gilleland E., Brown B.G., Ebert E.E. Application of spatial verification methods to idealized and NWP-gridded precipitation forecasts. *Wea. Forecast.* 2009, vol. 24, pp. 1485-1497. DOI: 10.1175/2009WAF2222298.1.

8. Brown B.G., Bullock R., David C.A., Gotway J.H., Chapman M.B., Takacs A., Gilleland E., Manning K., Mahoney J. New verification approaches for convective weather forecasts. 11th Conf. Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Amer. Met. Soc., 4-8 Oct 2004, Hyannis, MA.

9. Bundel A., Gofa F. et al. COSMO Priority Project INSPECT. Final Report. 2019, 67 p. DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/cosmo-tr37.

10. Cafaro C., Woodhams B.J., Stein T.H.M., Birch C.E., Webste, S., Bain C.L., Hartley A., Clarke S., Ferrett S., Hill P. Do Convection-Permitting Ensembles Lead to More Skillful Short-Range Probabilistic Rainfall Forecasts over Tropical East Africa? *Wea Forecast.* 2021, vol. 36, is. 2, pp. 697-716. DOI: 10.1175/WAF-D-20-0172.1

11. Casati B., Ross G., Stephenson D.B. A new intensity-scale verification approach for the verification of spatial precipitation forecasts. *Meteorol Appl.*, 2004, vol. 11, pp. 141-154.

12. Davis C.A., Brown B.G., Bullock R., Halley-Gotway J. The Method for Object-Based Diagnostic Evaluation (MODE) Applied to Numerical Forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program DOI. *Wea. Forecast.*, 2009, vol. 24, no. 5. DOI: 10.1175/2009WAF2222241.1.

13. Davis C., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1772-1784.

14. Dey S.R., Leoncini G., Roberts N.M., Plant R.S., Migliorini S. A spatial view of ensemble spread in convection permitting ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, 2014, vol. 142, p. 4091-4107, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00172.1>.

15. Doringner M., Mittermaier M.P., Gilleland E., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J. MesoVICT: Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain. *NCAR Technical Note NCAR/TN-505+STR*, 2013, 23 p. DOI: 10.5065/D6416V21.

16. Doringner M., Gilleland E., Casati B., Mittermaier M.P., Ebert E.E., Brown B.G., Wilson L.J. The setup of the MesoVICT project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2018, vol. 99, pp. 1887-1906.

17. Ebert E., McBride J. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrol.*, 2000, vol. 239, pp. 179-202.
18. Ebert E. Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteor. Appl.*, 2008, vol. 15, pp 51-64. DOI:10.1002/met.25.
19. Gilleland E., Ahijevych D.A., Brown B.G., Ebert E.E. Verifying Forecasts Spatially. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, pp. 1365-1373. DOI: 10.1175/2010BAMS2819.1.
20. Gilleland E., Ahijevych D., Brown B.G., Casati B., Ebert E.E. Intercomparison of spatial forecast verification methods. *Wea. Forecast.*, 2009, vol. 24, pp. 1416-1430.
21. Johnson and Wang. Verification and Calibration of Neighborhood and Object-Based Probabilistic Precipitation Forecasts from a Multimodel Convection-Allowing Ensemble. *Mon. Wea. Rev.*, 2012, vol. 140, pp. 3054-3077.
22. Johnson A., Wang X., Wang Y., Reinhart A., Clark A.J., Jirak I.L. Neighborhood- and Object-Based Probabilistic Verification of the OU MAP Ensemble Forecasts during 2017 and 2018 Hazardous Weather Testbeds. *Wea. Forecast.*, 2020, vol. 35, pp. 169-191. DOI: 10.1175/WAF-D-19-0060.1.
23. Jolliffe Ian T., Stephenson D.B. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science: 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2012, 292 p.
24. Murphy A.H. The Finley affair: a signal event in the history of forecast verification. *Wea. Forecast.*, 1996, vol. 11, pp. 3-20.
25. Roberts N.M., Lean H.W. Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, pp. 78-97. DOI: 10.1175/2007MWR2123.1.
26. Schwartz C.S., Sobash R.A. Generating Probabilistic Forecasts from Convection-Allowing Ensembles Using Neighborhood Approaches: A Review and Recommendations. *Mon. Wea. Rev.*, 2017, vol. 135, pp. 3397-3418. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0400.1.
27. Schwartz C.S., Kain J.S., Weiss S.J., Xue M., Bright D.R., Kong F., Thomas K.W., Levit J.J., Coniglio M.C., Wandishin M.S. Toward Improved Convection-Allowing Ensembles: Model Physics Sensitivities and Optimizing Probabilistic Guidance with Small Ensemble Membership. *Wea. Forecast.*, 2010, vol. 25, pp. 263-280. DOI: 10.1175/2009WAF2222267.1.
28. Skok G., Roberts N. Estimating the displacement in precipitation forecasts using the Fractions Skill Score. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, vol. 144, p. 414-425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.3212>
29. Skok G. A new spatial displacement measure for continuous fields, *IVMW2020*, 2020. https://www.univie.ac.at/img-wien/jwgfvr/SpatialMethods/2020111615/Skok_2020IVMWO_SpatialMethods_16Nov15UTC.pdf
30. Theis S. E., Hense A., Damrath U. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach. *Meteor. Appl.*, 2005, vol. 12, p. 257-268. <https://doi.org/10.1017/S1350482705001763>

Поступила 15.11.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 15.11.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-50-68>

УДК 551.509.313

Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF

С.А. Лысенко, П.О. Зайко

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь
lysenko.nature@gmail.com, Polly_LO@tut.by*

На основе современных баз данных дистанционного зондирования Земли GLASS (The Global Land Surface Satellite) и GLC2019 (Global Land Cover, 2019) проведена актуализация пространственной структуры землепользования и биофизических параметров подстилающей поверхности (альbedo, листового индекса и проективного покрытия) для территории Беларуси в мезомасштабной системе численного прогноза погоды WRF. Для ряда сложно прогнозируемых атмосферных ситуаций, наблюдавшихся в зимние периоды, выполнена серия численных экспериментов на основе модели WRF (Weather Research and Forecasting), инициализируемой расчетными данными глобальной системы метеорологических прогнозов GFS (Global Forecast System, NCEP). Показано, что использование в WRF данных о землепользовании высокого пространственного разрешения и учет распределения альbedo и листового индекса по территории Беларуси для каждого месяца позволяют сократить среднеквадратическую погрешность краткосрочного (до 48 ч) прогноза приземной температуры воздуха на 16–33 % относительно исходных прогнозов GFS. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч уменьшилась в среднем на 0,40 °C (19 %), 0,35 °C (10 %), 0,68 °C (23 %) и 0,56 °C (15 %) соответственно. Наиболее значимое уменьшение среднеквадратической погрешности численного прогноза температуры (до 2,1 °C) отмечено в дневное время суток (при сроках +12 и +36 ч), когда положительные обратные связи между альbedo и температурой подстилающей поверхности проявляются в наибольшей степени.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, WRF, цифровая модель подстилающей поверхности, альbedo, листовой индекс, валидация прогностической модели

Estimates of the Earth surface influence on the accuracy of numerical prediction of air temperature in Belarus using the WRF model

S.A. Lysenko, P.O. Zaiko

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Belarus
lysenko.nature@gmail.com, Polly_LO@tut.by*

The spatial structure of land use and biophysical characteristics of land surface (albedo, leaf index, and vegetation cover) are updated using the GLASS (Global Land Surface Satellite) and GLC2019 (Global Land Cover, 2019) modern satellite databases for mesoscale numerical weather prediction with the WRF model for the territory of Belarus. The series of WRF-based numerical experiments was performed to verify the influence of the updated characteristics on the forecast quality for some difficult to predict winter cases. The model was initialized by the GFS (Global Forecast System, NCEP) global numerical weather prediction model. It is shown that the use of high-resolution land use data in the WRF and the consideration of the new albedo and leaf index distribution over the territory of Belarus can reduce the root-mean-square error (RMSE) of short-range (to 48 hours) forecasts of surface air temperature by 16–33% as compared to the GFS. The RMSE of the temperature forecast for the weather stations in Belarus for a forecast lead time of 12, 24, 36, and 48 hours decreased on average by 0.40°C (19%), 0.35°C (10%), 0.68°C (23%), and 0.56°C (15%), respectively. The most significant decrease in RMSE of the numerical forecast of temperature (up to 2.1 °C) was obtained for the daytime (for a lead time of 12 and 36 hours), when positive feedbacks between albedo and temperature of the land surface are manifested most.

Keywords: numerical weather prediction, WRF, digital land surface model, albedo, leaf area index, forecast model validation

Введение

Данные о пространственной структуре землепользования и физических характеристиках подстилающей поверхности являются важной и неотъемлемой частью численных моделей прогноза погоды. Категории землепользования и почвенно-растительного покрова входят в параметризации многих атмосферных процессов, связанных с пограничным слоем и переносом излучения в атмосфере (поток коротковолновой и длинноволновой радиации, конвективных процессов, микрофизики влаги, турбулентности атмосферы, тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью) [1, 7].

В пределах каждого класса землепользования свойства подстилающей поверхности описываются рядом биофизических параметров: альбедо, излучательная способность, шероховатость, теплоемкость почвы, тепловая инерция поверхности, доступность почвенной влаги, листовой индекс, доля растительного покрова (проективное покрытие) и др. С использованием этих параметров можно с различной степенью сложности моделировать все процессы обмена излучением, теплом, влагой и импульсом между атмосферой и подстилающей поверхностью. В связи с этим отмеченные параметры подстилающей поверхности являются важнейшими для региональной привязки численных моделей прогноза погоды.

Быстрое изменение климата, наблюдаемое в последние десятилетия, а также воздействие ряда антропогенных факторов (урбанизация, мелиорация, хозяйственная деятельность) обуславливают необходимость периодического пересмотра и актуализации цифровых моделей пространственной структуры землепользования и биофизических характеристик

подстилающей поверхности в региональных системах численного прогнозирования погоды.

За последние два десятилетия на территории Беларуси произошли существенные изменения ландшафтов. Причинами этому послужили как различная хозяйственная деятельность (урбанизация, заболачивание, вырубка лесов и т. д.), так и климатические факторы. В качестве примера можно отметить изменение листового индекса на территории Беларуси за 2000–2020 гг. [2–4]. По данным спутникового спектрорадиометра MODIS статистически значимый рост листового индекса ($p = 0.05$) наблюдается на 25 % общей площади лесных массивов Беларуси, а на 11 % посевных площадей отмечается его статистически значимое понижение. В целом за период с 2000 по 2020 год листовой индекс лесов Беларуси увеличился почти на 8 %, а для земель сельскохозяйственного назначения листовой индекс снизился примерно на 5 %. Очевидно, что наблюдаемые изменения подстилающей поверхности в пределах территории Беларуси должны соответствующим образом учитываться при разработке численных прогнозов погоды.

Стоит отметить, что задаче уточнения и актуализации информации о подстилающей поверхности в мезомасштабных системах численного прогноза погоды в последние годы уделяется достаточно много внимания.

В [5] проведен численный эксперимент по оценке влияния типа землепользования на температурно-влажностный режим для территории Восточно-Европейской равнины. Результаты эксперимента продемонстрировали важную роль лесистости территории в распределении по ней ключевых метеорологических величин. Облесение территории привело к снижению температуры, увеличению осадков, росту влажности и повторяемости туманов; при обезлесении наблюдались обратные процессы – рост температуры и скорости ветра, уменьшение облачности и осадков.

В [13] оценена эффективность актуализации данных о землепользовании для точности мезомасштабной системы численного прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecasting) применительно к территории северных провинций Китая. Рассматривался вариант замены устаревшего набора данных USGS (United States Geological Survey) на более современный и подробный (в части пространственного разрешения и количества учитываемых классов землепользования) аналог Европейского космического агентства – Global Land Cover (GLC2015) [11]. Показано, что при уточнении используемой в модели WRF классификации землепользования систематическая погрешность краткосрочного прогноза приземной температуры воздуха сокращается на 2,54 %, а систематическая погрешность скорости ветра – на 6,77 %.

Вопросы моделирования атмосферных процессов на мелиорированных и урбанизированных территориях подробно рассмотрены в [14]. Для моделирования процессов регулируемого орошения и урбанизации на заболоченных территориях использовалась система WRF. Результаты

численных экспериментов показали, что застройка водно-болотных угодий и пахотных земель значительно увеличивает региональную температуру и потоки явного тепла. Напротив, увеличение площади орошаемых земель в пригородной территории позволяет снизить температуру и увеличить поток скрытого тепла. Влияние типа землепользования на характер выпадения и количество осадков оказалось более сложным и неоднозначным: в сценарии урбанизации центры выпадения осадков сместились на восток от города, кроме того, наблюдался рост осадков в центральных районах города; при регулируемом орошении ранее заболоченных территорий осадки в основном выпадали в их центральной области, для юго-западных и северо-западных областей наблюдалось уменьшение количества осадков.

В [15] проанализировано влияние структуры землепользования, рельефа и количества почвенной влаги на точность прогноза конвективных осадков на основе модели WRF при разных пространственных разрешениях (3 и 12 км). Результаты численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов показали, что различные данные о землепользовании в значительной степени изменяют расчетные ветровые потоки в горных областях. Наибольший положительный эффект для точности прогноза конвективных осадков достигается при высоком пространственном разрешении данных о подстилающей поверхности.

Влияние данных о землепользовании на качество прогнозов WRF исследовалось также для района Жемчужной реки (Китай) в [16]. Замена стандартного для WRF набора данных о землепользовании на их более современный аналог оказало положительное влияние на точность прогноза приземной температуры, влажности воздуха и скорости ветра.

В настоящей работе для анализа влияния параметров подстилающей поверхности на точность краткосрочных прогнозов погоды для территории Беларуси также выбрана численная модель WRF, широко применяемая в национальных метеослужбах. Рассмотрена задача замены оригинальных для WRF наборов данных о подстилающей поверхности на более детальные и современные данные дистанционного зондирования Земли. Оценивается влияние произведенной замены на качество численных краткосрочных прогнозов приземной температуры воздуха для территории Беларуси.

Мезомасштабная система численного прогноза погоды WRF

Для численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов в системе WRF используются негидростатические уравнения для сжимаемой жидкости, интегрируемые на прямоугольной сетке методом конечных разностей. Аппроксимация прогностических уравнений выполняется с использованием стандартной конечно-разностной схемы Аракавы, а для интегрирования по времени применяется метод Рунге-Кутты [8].

Физические процессы подсеточного масштаба учитываются в WRF с использованием различных схем параметризации. К наиболее важным процессам подсеточного масштаба относятся процессы, связанные с микрофизикой влаги, потоками длинноволновой и коротковолновой радиации, тепло- и влагообменом в почве, конвекцией и турбулентностью в планетарном и пограничном слоях атмосферы. Помимо этого, в WRF реализован учет гравитационных волн, адвекции и других крупномасштабных физических процессов.

Система WRF включает блок подготовки данных WPS (WRF Preprocessing System), динамическое математическое ядро прогностической модели и систему ассимиляции данных WRFDA (WRF Data Assimilation). Для географической привязки модели используются цифровые базы топографических и биофизических характеристик подстилающей поверхности: рельеф, классы землепользования, индекс листовой поверхности, относительная площадь растительного покрова (проективное покрытие), альbedo и другие параметры, задающие специфику моделируемой области.

Кроме того, для прогностической модели WRF необходимы данные о начальном состоянии атмосферы, которые, как правило, поступают из глобальных или региональных моделей, а также данные о подстилающей поверхности, задающие граничные условия для моделируемой области. На данный момент в модели WRF доступны два базовых (оригинальных) набора данных о структуре землепользования:

1. USGS, подготовленный Геологической службой США. Основан на данных спутникового радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), охватывающих период с апреля 1992 по март 1993 года. Включает 24 класса землепользования, в том числе 3 городских. Максимальное доступное пространственное разрешение – 30".

2. MODIS, подготовленный Бостонским университетом на основе данных спутникового спектрорадиометра MODIS за 2001–2004 гг. [9, 10]. Максимальное пространственное разрешение – 15". Данный набор содержит 20 классов землепользования.

Обновление цифровой модели подстилающей поверхности в системе WRF

С целью повышения точности численных прогнозов погоды для территории Беларуси подготовлены актуальные наборы данных о подстилающей поверхности с более высоким, чем в оригинальной версии WRF, пространственно-временным разрешением. Произведена замена цифровой модели пространственной структуры землепользования, параметров почвенно-растительного покрова и альbedo подстилающей поверхности, которые значительно изменились за последнее десятилетие.

Для обновления классов землепользования использовались данные Global Land Cover 2019 (GLC2019) [18], являющиеся результатом

обработки спутниковых наблюдений сканером высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства. Набор данных GLC2019 содержит 23 класса землепользования с пространственным разрешением 100 м и в достаточной мере отражает современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси.

Замена пространственной структуры землепользования производилась для расчетного домена WRF в пределах 40–60° с. ш., 16–43° в. д., включающего территорию Беларуси. Новые данные GLC2019 были переклассифицированы в категории землепользования USGS и преобразованы в проекции системы подготовки данных, используемые в WRF. В результате была получена обновленная цифровая модель классов землепользования в формате WPS Geogrid Binary.

О различиях в описании пространственной структуры землепользования с использованием оригинального и обновленного набора данных для WRF можно судить по рис. 1. Наиболее существенные отличия между двумя картами землепользования приурочены к поймам рек, пахотным землям и районам активных лесных вырубок. Кроме того, в обновленном наборе данных о землепользовании более широко представлены болотистые территории, а также массивы широколиственных и смешанных лесов. Общая площадь городских и застроенных земель в наборе GLC2019 увеличилась, что согласуется с результатами переписи населения Беларуси 2019 года.

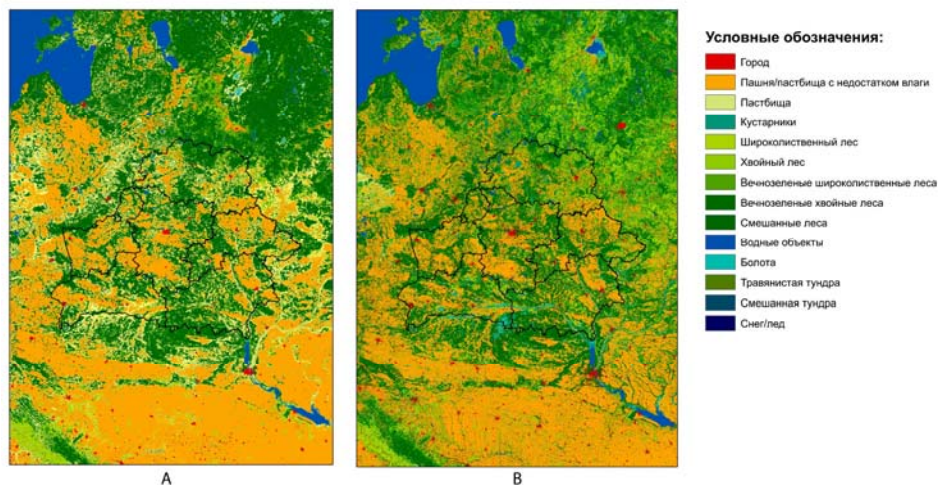


Рис. 1. Пространственная структура землепользования согласно классификации MODIS (стандартный набор данных для WRF) и Global Land Cover 2019 (обновленный набор данных для WRF).

Fig. 1. Land use spatial structure according MODIS classification (base WRF model dataset) and Global Land Cover 2019 (updated WRF model dataset).

Для обновления в WRF биофизических параметров подстилающей поверхности использовались продукты дистанционного зондирования Земли GLASS (The Global Land Surface Satellite) [19]. База данных GLASS включает 12 параметров подстилающей поверхности: альbedo и излучательную способность; листовой индекс, проективное покрытие, эвапотранспирацию и валовую первичную продукцию; температуру подстилающей поверхности; нисходящее коротковолновое, длинноволновое и фотосинтетически активное излучение; долю поглощаемой поверхностью фотосинтетически активной радиации и радиационный баланс. Все указанные параметры подстилающей поверхности за исключением температуры охватывают длительный период (1981–2019 гг.) и обладают достаточно высокими пространственным (от 1 км до 500 м) и временным (8 дней) разрешениями. Для периода 1981–1999 гг. в базе данных GLASS используются спутниковые данные AVHRR, а для более поздних лет – данные MODIS. По сравнению с другими открытыми базами данных дистанционного зондирования Земли, GLASS характеризуется более высоким качеством и точностью предоставляемых информационных продуктов [19].

Для доступа к данным GLASS использовалась облачная платформа Earth Engine, объединяющая множество доступных спутниковых данных и программные средства их обработки и анализа [12]. Данная платформа обеспечивает эффективный доступ к многочисленной геопространственной информации и устраняет технические барьеры, связанные с параллельной обработкой больших объемов данных.

Из базы данных GLASS выбраны три наиболее важных параметра подстилающей поверхности: сферическое альbedo, листовой индекс и проективное покрытие (относительная площадь растительного покрова). Эти параметры вычислялись отдельно для каждого месяца путем усреднения данных GLASS за 2000–2019 гг. Все остальные параметры, используемые для описания процессов энерго- и массообмена в пограничном слое атмосферы, рассчитываются в модели WRF на основе указанных трех параметров в зависимости от типа подстилающей поверхности [20].

Альbedo подстилающей поверхности для теплого периода года (май–сентябрь) рассчитывается на основе медианных значений альbedo для каждого месяца из базы данных GLASS. Для отдельных месяцев холодного периода года (октябрь–апрель) используются медианные значения альbedo снежного покрова и оголенной почвы. Среднее альbedo подстилающей поверхности в холодный период года рассчитывается с учетом ее снежного покрова на основе следующего выражения:

$$A(x, y) = A_s(x, y) \cdot \sigma_s(x, y) + [1 - \sigma_s(x, y)] A_0(x, y), \quad (1)$$

где x и y – координаты точки на земной поверхности; A_s и A_0 – альbedo снежного покрова и свободной от снега поверхности, в качестве которых

используются соответственно 90 и 5-й процентиля распределения альбедо для данной точки и данного месяца; σ_s – относительная площадь снежного покрова. Значение σ_s в каждой ячейке расчетной области задаются на основании данных глобальных численных моделей прогноза погоды и эмпирических соотношений между σ_s и высотой снежного покрова [20].

Описание численных экспериментов

Для оценки влияния модели подстилающей поверхности на точность численного прогноза состояния атмосферы проводилась серия численных экспериментов на основе прогностической модели WRF-ARW 4.3 при следующих характеристиках области моделирования:

- расчетный домен: 50–57° с. ш., 22–33° в. д., шаг пространственной дискретизации – 3 км (220×200 узлов), шаг интегрирования по времени – 18 сек;

- 33 вертикальных уровня до 5 гПа;

- параметризации подсеточных физических процессов: *микрофизика*;

- схема WRF Single-Moment 6-class, *пограничный слой* – схема Университета Ёнсе (Сеул, Корея) (YSU); *коротковолновая и длинноволновая радиация* – GFDL схема, прямой учет конвекции.

В качестве начальных и боковых граничных условий для прогностической модели WRF во всех численных экспериментах использовалась глобальная система метеорологических прогнозов GFS с шагом сетки 0,25°×0,25° [17]. Исходный срок моделирования состояния атмосферы – 00 ч ВСВ (Всемирное согласованное время), заблаговременность прогноза +48 ч с почасовыми выходными результатами. При выборе дат для эксперимента предпочтение отдавалось периодам действия зимних антициклонов, при которых фиксировались значительные отрицательные температуры, спрогнозированные с недостаточной точностью системой WRF и другими численными моделями (GFS, UKMO, COSMO).

Для каждой из рассматриваемых синоптических ситуаций проводилось два численных эксперимента: с оригинальными и обновленными наборами данных о подстилающей поверхности. В качестве базового варианта численного прогноза состояния атмосферы использовался прогноз на основе модели WRF с классами землепользования MODIS, так как данная конфигурация прогностической модели является основной в национальной метеорологической службе Беларуси (Белгидромет) и имеет достаточно длинный ряд прогнозов и верификаций (более 5 лет).

Предметом анализа было распределение по территории Беларуси температуры воздуха на высоте 2 м за сроки +12, +24, +36 и +48 ч от начала моделирования. Точность численного прогноза температуры оценивалась на основании сравнения расчетного поля температуры с данными наблюдений на 52 метеорологических станциях Беларуси. Для количественной оценки точности прогноза температуры использовались четыре показателя [6]:

1. Средняя погрешность (Mean Error, *ME*):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{Pi} - T_{\Phi i}), \quad (2)$$

3. Средняя абсолютная погрешность (Mean Absolute Error, *MAE*):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_{Pi} - T_{\Phi i}|, \quad (3)$$

2. Мультипликативная систематическая погрешность (*BIAS*):

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{Pi}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\Phi i}}, \quad (4)$$

4. Среднеквадратическая погрешность (Root Mean Square Error, *RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{Pi} - T_{\Phi i})^2}, \quad (5)$$

где N – количество метеорологических станций; $T_{\Phi i}$ и T_{Pi} – фактическое и прогнозное значение температуры на i -й станции. Прогнозные значения температуры (T_{Pi}) на метеостанциях вычислялись путем двумерной линейной интерполяции выходных сеточных данных WRF.

Результаты численных экспериментов

Наиболее существенное различие между исходной и обновленной цифровой моделью подстилающей поверхности состоит в учете пространственной структуры землепользования и альбедо. В связи с этим, наибольший интерес представляет сравнение результатов моделирования состояния атмосферы в зимний период, когда в наибольшей степени проявляются положительные обратные связи между альбедо и температурой подстилающей поверхности.

Сравнение пространственных распределений альбедо снежного покрова, рассчитанных на основе спутниковых продуктов MODIS и GLASS (рис. 2), показывает, что данные GLASS гораздо более адекватно воспроизводят распределение снежного покрова по территории Беларуси и лучше согласуются с пространственной структурой землепользования. На карте альбедо снежного покрова, построенной по данным MODIS (рис. 2а), присутствуют явные артефакты, которые, вероятно, связаны с коротким периодом, используемым для усреднения данных MODIS в системе WRF, а также с недостаточно хорошим соответствием цифровой модели почвенно-растительного покрова, используемой в оригинальной версии WRF, территории Беларуси. В обновленном комплекте данных для WRF, как видно из рис. 2б, подобные артефакты отсутствуют.

Результирующие (общие) альбедо подстилающей поверхности, рассчитанные при частичном снежном покрове с использованием данных

MODIS и GLASS, принципиально различаются как по абсолютной величине, так и по пространственному распределению (рис. 2в, г). Новая цифровая модель альbedo позволяет более корректно и детально воспроизвести пространственную структуру подстилающей поверхности, что имеет важное значение для расчетов ее радиационного и теплового баланса.

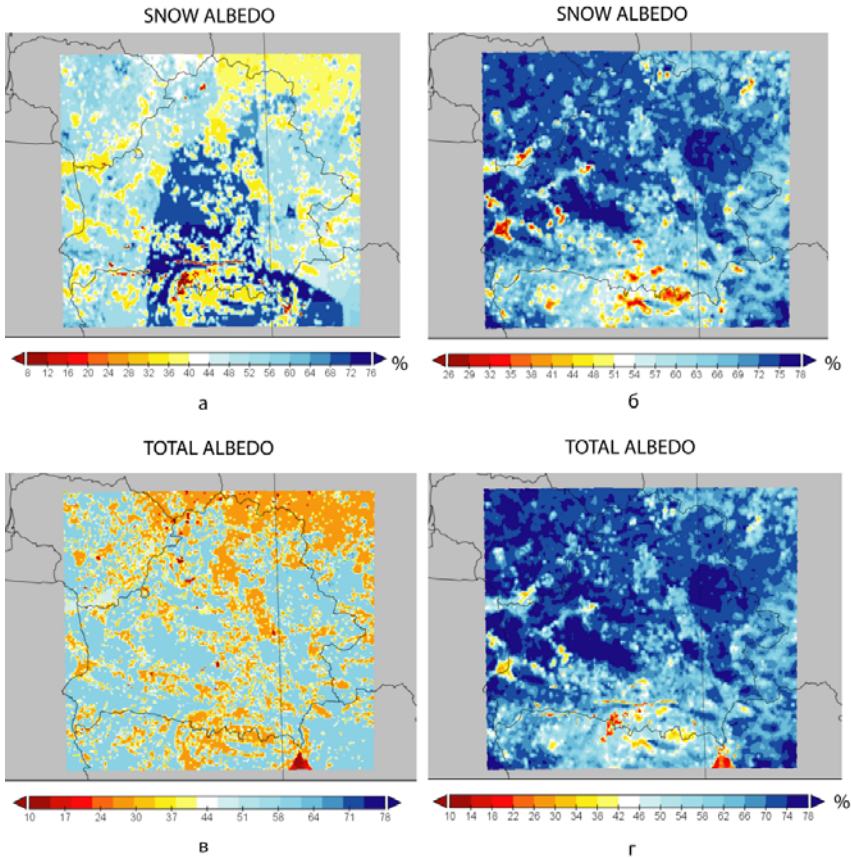


Рис. 2. Альbedo снежного покрова (а, б) и общее альbedo подстилающей поверхности (в, г) для 30.01.2021, рассчитанные на основе оригинальной (а, в) и обновленной (б, г) цифровой модели подстилающей поверхности для системы WRF.

Fig. 2. Calculated snow cover albedo (а, б) and the total surface albedo (в, г) based on original (а, в) and updated (б, г) digital surface model for WRF system, 30.01.2021.

В качестве примера, на рис. 3 представлены пространственные распределения разностного альbedo и турбулентных потоков явного (HFX) и скрытого тепла (LH), рассчитанные на основе стандартной и обновленной модели WRF с заблаговременностью +36 ч на дату 30.01.2021 г.

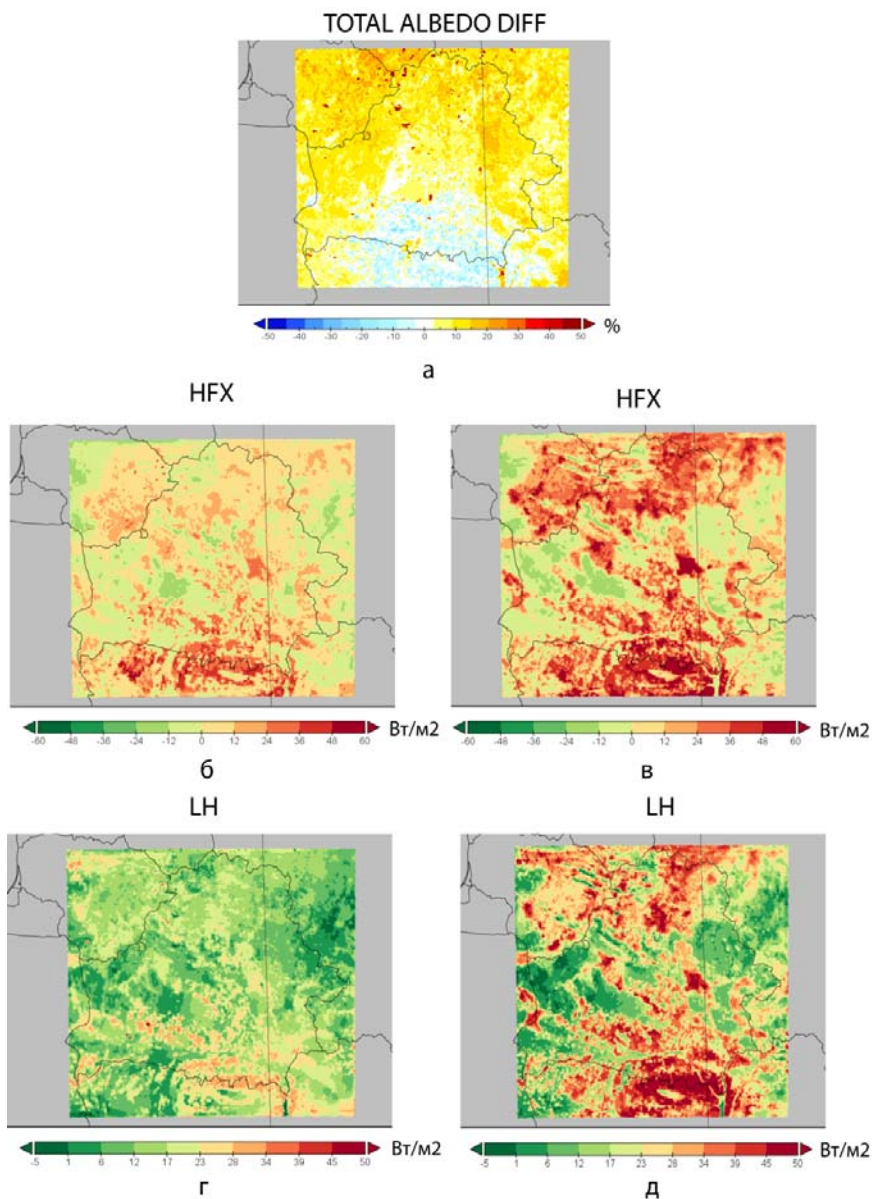


Рис. 3. Пространственное распределение разностного альбедо (а) между новой и стандартной для WRF цифровыми моделями подстилающей поверхности и соответствующие им пространственные распределения турбулентных потоков явного (б, в) и скрытого (г, д) тепла, спрогнозированные на дату 30.01.2021 г.

Fig. 3. Spatial distribution of albedo difference between updated and original digital surface models (a) and corresponding spatial distribution of turbulent fluxes of sensible (б, в) and latent (г, д) heat fluxes, 30.01.2021.

Наиболее существенные отличия расчетных тепловых потоков проявляются в южных регионах Беларуси, для которых рассматриваемые модели дают принципиально различные значения и пространственные распределения альбедо. Более низкие значения альбедо (рис. 3а), получаемые на основе нового набора данных для WRF, соответствуют более высоким потокам коротковолнового излучения, поглощаемого подстилающей поверхностью в дневные часы, и, как следствие, более высокой температуре подстилающей поверхности. За счет этого расчетные тепловые потоки с подстилающей поверхности в южных регионах Беларуси оказываются значительно выше аналогичных потоков, рассчитанных на основе стандартного набора данных для WRF (рис. 3б, г).

Зависимость потока скрытого тепла (LH) от биофизических параметров подстилающей поверхности более сложная. Сравнивая пространственные распределения потоков LH, рассчитанных на основе WRF (рис. 3г, д), с картами соответствующих им классов землепользования (рис. 1) можно сделать вывод, что различия в результатах расчета LH главным образом связаны с различиями в классификации типа подстилающей поверхности. Более распространенное присутствие в пространственной структуре подстилающей поверхности широколиственных и смешанных лесов, а также заболоченных территорий обуславливает большую величину суммарного испарения. В связи с этим потоки LH, рассчитанные на основе данных GLC2019, оказываются более высокими по сравнению с результатами их расчета на основе классификации землепользования MODIS.

Достаточно показательный пример, демонстрирующий важность корректного учета пространственной структуры и биофизических параметров подстилающей поверхности при численных прогнозах погоды, представлен на рис. 4. Карты численного прогноза температуры воздуха на высоте 2 м, полученные при двух используемых цифровых моделях подстилающей поверхности (ORIGINAL – стандартная для WRF, NEW – актуализированная на основе данных GLC2019 и GLASS), демонстрируют существенные различия. Цветными окружностями на картах обозначены значения температуры на метеорологических станциях Беларуси. Видно, что обновление цифровой модели подстилающей поверхности позволило уточнить фронтальные разделы на карте приземной температуры и обеспечило лучшее соответствие результатов численного моделирования данным метеорологических наблюдений. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры воздуха для дневных сроков +12 и +36 ч уменьшилась (в сравнении с прогнозом ORIGINAL) на 0,61 °C (23 %) и 1,76 °C (33 %) соответственно. Для срока +36 ч существенно сократилась мультипликативная систематическая погрешность (BIAS) – на 11 %, а коэффициент корреляции между предсказанными и наблюдаемыми значениями температуры воздуха увеличился с 0,62 до 0,75. Показатели точности прогноза температуры для остальных сроков прогноза

изменились менее существенно, однако остались не хуже аналогичных показателей базового прогноза ORIGINAL.

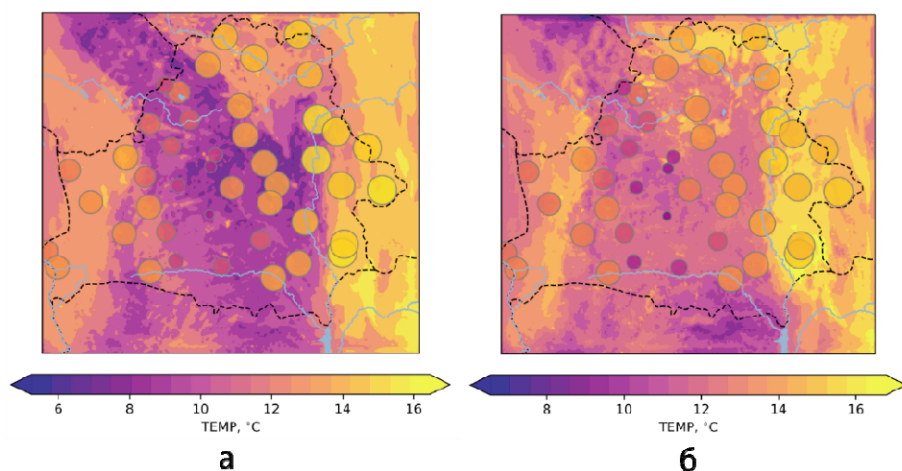


Рис. 4. Прогноз WRF для температуры воздуха с использованием цифровой модели подстилающей поверхности ORIGINAL (а), NEW (б). Окружностями разного диаметра и цвета показаны значения температуры на метеорологических станциях.

Fig. 4. Air temperature forecasts by WRF model based on digital surface model ORIGINAL (a), NEW (b). The temperature values at meteorological stations are presented as circles of different diameters.

Таким образом, использование одной и той же численной модели атмосферы при различном задании пространственной структуры землепользования и биофизических параметров подстилающей поверхности может приводить к существенным различиям в численных прогнозах радиационных, термических и конвективных процессов в пограничном слое атмосферы. Для статистических оценок изменений точности численных прогнозов погоды в результате актуализации информации о подстилающей поверхности в модели WRF прогнозные значения температуры для всех промоделированных ситуаций сопоставлены с данными наблюдений на метеорологических станциях (рис. 5). Актуализация цифровой базы данных с характеристиками подстилающей поверхности для территории Беларуси позволила сократить ошибки численного прогноза приземной температуры воздуха на уровне 2 м для зимнего периода при всех сроках прогнозирования: +12, +24, +36 и +48 ч. Наибольшее сокращение ошибок прогноза температуры наблюдается для дневного времени суток (сроки +12 и +36 ч), что, вероятно, связано с более активным проявлением в дневные часы положительных обратных связей между альбедо и температурой подстилающей поверхности в зимние месяцы. Более существенное повышение точности прогноза температуры для поздних сроков

(+36 и +48 ч) также имеет физическое объяснение с учетом быстрого «затухания» влияния начального состояния атмосферы и слабо изменяющимся со временем влиянием граничных условий на результаты моделирования эволюции атмосферных процессов.

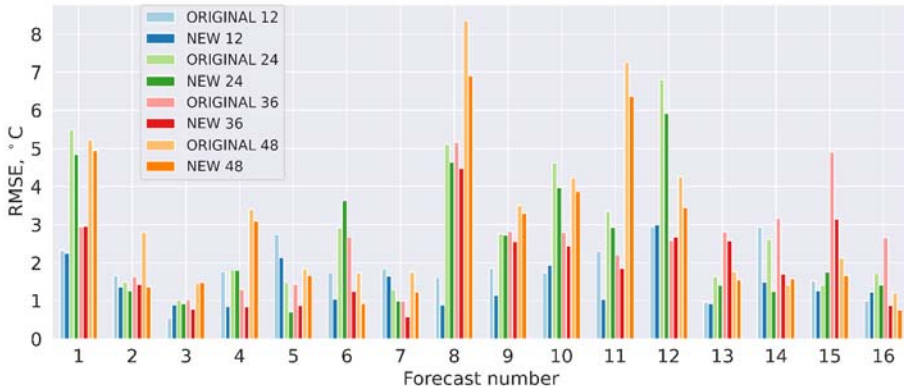


Рис. 5. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для 16 промоделированных метеорологических ситуаций. ORIGINAL и NEW – прогнозы на основе модели WRF со стандартным и актуализированным комплектами данных о подстилающей поверхности соответственно.

Fig. 5. Air temperature root mean square error (RMSE) of numerical forecast in Belarus with lead time of +12, +24, +36 and +48 hours for 16 simulated weather cases. ORIGINAL and NEW – forecast based on original WRF surface model and based on updated digital surface model, respectively.

Средние показатели точности прогноза приземной температуры для смоделированных метеорологических ситуаций сведены в таблице. Видно, что за счет актуализации цифровой модели подстилающей поверхности достигается улучшение точности прогноза приземной температуры при всех сроках прогноза и по всем показателям, за исключением мультипликативной систематической погрешности (BIAS) при заблаговременности прогноза +12 ч.

Стоит отметить, что нередко возникающие достаточно большие погрешности численного прогноза WRF во многом связаны с неудовлетворительной точностью задания для прогностической модели WRF начальных и боковых условий на основе глобальной модели GFS. Расчетные данные этой модели даже при нулевом сроке могут иметь существенное расхождение с данными наблюдений, что, безусловно, сказывается на точности численного прогноза мезомасштабных атмосферных процессов. Среднеквадратические погрешности (RMSE) прогноза температуры воздуха для территории Беларуси с использованием глобальной модели GFS

при сроках +12, +24, +36 и +48 ч составляют 2,26, 3,63, 3,35 и 4,07 °C соответственно. Сравнивая эти величины с RMSE мезомасштабной прогностической модели WRF, приведенными в таблице, можно видеть, что модель WRF в своей исходной конфигурации ORIGINAL хоть и обеспечивает повышение точности прогноза температуры (по сравнению с глобальной моделью GFS), но достигаемый при этом эффект, по крайней мере для температуры воздуха в зимний период, незначителен: уменьшение RMSE для сроков +12, +24, +36 и +48 ч составляет 0,13 °C (6 %), 0,23 °C (6 %), 0,43 °C (13 %) и 0,27 °C (7 %) соответственно. Актуализация цифровой модели подстилающей поверхности для территории Беларуси позволяет достичь гораздо более существенного уменьшения среднеквадратической погрешности прогноза WRF для температуры воздуха: 0,53 °C (23 %), 0,58 °C (16 %), 1,11 °C (33 %) и 0,83 °C (20 %) при сроках прогноза +12, +24, +36 и +48 ч соответственно.

Таблица. Статистические показатели точности прогноза приземной температуры системой WRF со стандартными (ORIGINAL) и актуализированными (NEW) наборами данных о подстилающей поверхности

Table. Statistical indicators of surface air forecast accuracy by WRF model with original (ORIGINAL) and updated (NEW) surface datasets

Статистические показатели	Модель	Заблаговременность, ч			
		+12	+24	+36	+48
ME, °C	ORIGINAL	-1.62	-2.22	-2.46	-2.53
	NEW	-0.65	-1.50	-1.48	-1.55
BIAS	ORIGINAL	1.02	1.67	0.84	5.34
	NEW	1.05	1.19	1.04	5.09
MAE, °C	ORIGINAL	1.84	2.84	2.57	3.27
	NEW	1.44	2.51	1.94	2.76
RMSE, °C	ORIGINAL	2.13	3.40	2.92	3.80
	NEW	1.73	3.05	2.24	3.24

Заключение

Быстрое изменение климата, наблюдаемое в последние десятилетия, а также воздействие ряда антропогенных факторов (урбанизация, мелиорация, хозяйственная деятельность) обуславливают необходимость периодического пересмотра и актуализации цифровых моделей пространственной структуры землепользования и биофизических характеристик подстилающей поверхности в мезомасштабных системах численного прогноза погоды.

В настоящей работе была проведена актуализация наборов данных о подстилающей поверхности, используемых в мезомасштабной системе

численного прогноза погоды WRF. В результате региональной привязки WRF была уточнена пространственная структура землепользования и биофизические параметры подстилающей поверхности (альбедо, листовой индекс, проективное покрытие) для территории Беларуси.

Численные эксперименты по моделированию мезомасштабных атмосферных процессов на основе WRF для ряда синоптических ситуаций в зимний период выявили значимый положительный эффект актуализации цифровой модели подстилающей поверхности для точности численного прогноза приземной температуры воздуха. Модель WRF со стандартным набором данных о подстилающей поверхности (ORIGINAL) для рассмотренных случаев не обеспечила существенного повышения точности прогноза температуры по сравнению с прогнозами глобальной модели GFS, расчетные данные которой использовались в качестве начальных и боковых условий для WRF. Использование в WRF данных о землепользовании более высокого пространственного разрешения и учет пространственного распределения альбедо и листового индекса для каждого месяца позволили уточнить распределение турбулентных потоков скрытого и явного тепла с подстилающей поверхности и существенно уменьшить среднеквадратическую погрешность краткосрочного (до 48 ч) прогноза приземной температуры: на 16–33 % относительно исходных прогнозов GFS.

Сопоставление численных прогнозов приземной температуры с данными метеорологических наблюдений показало, что WRF с актуализированным набором данных о подстилающей поверхности (NEW) обеспечивает более качественный прогноз, особенно для сроков +12 и +36 ч (дневные часы). Среднеквадратическая погрешность прогноза приземной температуры для территории Беларуси в сравнении с прогнозом ORIGINAL при сроках +12, +24, +36 и +48 ч сокращается на величину до 1,5, 1,3, 2,1 и 1,4 °C соответственно. В среднем для рассмотренных случаев уменьшение среднеквадратической погрешности прогноза температуры при сроках +12, +24, +36 и +48 ч составило 0,40 °C (19 %), 0,35 °C (10 %), 0,68 °C (23 %) и 0,56 °C (15 %) соответственно.

Список литературы

1. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRFNMM // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 94-135.
2. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. Минск: Энциклопедикс, 2020. 217 с.
3. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Хомич В.С., Семенченко В.П., Кулак А.В., Степанович И.М. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 4. С. 515-527.
4. Лысенко С.А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 77-88.

5. Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В., Никитин М.А., Ривин Г.С. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Том 4. С. 79-101.
6. Определение набора параметров верификации рабочей версии программно-методического комплекса мезопрогнозирования атмосферных процессов: отчёт о выполн. работе (промежуточ.), 30.09.2013 / Отв. исполнитель И.А. Деменцова; Минск: Респ. Гидрометеорол. центр, 2013. 160 с. Инв. № 3799.
7. *Переведенцев Ю.П., Мохов И. И., Елисеев А. В.* Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Казанский ун-т, 2013. С. 224.
8. *Skamarock W.C., Kleml J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M. Huang X.-Y.* A description of the Advanced Research WRF Model Version 4 // NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research. 2021. 165 p.
9. *Barlage M., Zeng X., Wei H., Mitchell. K.* A Global 0.05 Maximum Albedo Dataset of Snow-covered Land Based on MODIS Observations // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, no. 17. P. L17405. DOI 10.1029/2005GL022881.
10. *Broxton P.D., Zeng X., Sulla-Menashe D., Troch P. A.* A global land cover climatology using MODIS data // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2014. Vol. 53, is. 6. P. 1593-1605. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0270.1
11. *Buchhorn M., Smets B., Bertels, L., De Roo B., Lesiv M., Tsendbazar N. - E., Herold M., Fritz S.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe 2020. DOI 10.5281/zenodo.3939050
12. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Rem. Sens. Environ.* 2017. Vol. 202, is. 1. P. 18-27. DOI.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
13. *Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju C.* A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, is. 4. P. 350.
14. *Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q.,* Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2017. DOI 10.1016/j.pce.2017.01.017.
15. *Knist S., Goergen K., Simmer C.* Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2020. Vol. 132. P. 53-69. DOI 10.1007/s00703-019-00671-y
16. *Chang M., Fan S., Wang X.M.* Impact of refined land-cover data on WRF performance over the Pearl River Delta region, China // *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2014. Vol. 50. P.645-655.
17. Global Forecast System (GFS). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
18. *Tsendbazar N., Tarko A., Li L., Herold M., Lesiv M., Fritz S., Maus V.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015-2019 // *Validation Report*. 2020. DOI 10.5281/zenodo.3606370
19. *Xiao Z.Q., Liang S., Wang J.D., Chen P., Yin X.J., Zhang L.Q., & Song, J.L.* Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. Vol. 52, is. 1. P. 209-223.

20. Niu G. Y., Yang Z. L., Mitchell K. E., Chen F., Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // J. Geophys. Res. Vol. 116. D12109. DOI 10.1029/2010JD015139

References

1. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D. Chislennyye prognozy po negidrostaticheskim modelyam obshchego pol'zovaniya WRF-ARW i WRFNMM. 80 let Gidromettsentru Rossii. Moscow: Triada LTD Publ., 2010, pp. 94-135 [in Russ.].

2. Lysenko S.A., Loginov V.F., Mel'nik V.I. Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya. Minsk: Entsiklopediks Publ., 2020, 217 p. [in Russ.].

3. Loginov V. F., Lysenko S. A., Khomich V. S., Semenchenko V. P., Kulak A. V., Stepanovich I. M. Climate Aridization Signs and Their Ecosystem Displays on the Territory of Belarus. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 515-527 [in Russ.].

4. Lysenko S. A. Climate-Forced Changes of Bio-Productivity of Belorussian Terrestrial Ecosystems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2019, no. 6, pp. 78-88 [in Russ.].

5. Olchev A.V., Rozinkina I.A., Kuzmina E.V., Nikitin M.A., Rivin G.S. Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European Plain. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]*, 2017, vol. 4, pp. 79-101 [in Russ.].

6. Opređenje nabora parametrov verifikatsii rabochey versii programno-metodicheskogo kompleksa mezoprognostirovaniya atmosferykh protsessov: otchyot o vypoln. rabote (promezhutoch.), 30.09.2013. Otv. ispolnitel' I.A. Dementsova Inv. № 3799. Minsk: Resp. Gidrometeorol. Tsentr Publ., 2013, 160 p. [in Russ.].

7. Perevedentsev Yu.P., Mokhov I.I., Eliseev A.V. Theory of General Atmospheric Circulation: A textbook / ed. by E.P. Naumov. Kazan: Kazan University Publ., 2013, 224 p. [in Russ.].

8. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M. Huang X.-Y. A description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2021, 165 p.

9. Barlage M., Zeng X., Wei H., Mitchell. K. A Global 0.05 Maximum Albedo Dataset of Snow-covered Land Based on MODIS Observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, vol. 32, no. 17, pp. L17405. DOI: 10.1029/2005GL022881.

10. Broxton P.D., Zeng X., Sulla-Menashe D., Troch P. A. A global land cover climatology using MODIS data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, vol. 53, no. 6, pp. 1593-1605. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0270.1

11. Buchhorn M., Smets B., Bertels, L., De Roo B., Lesiv M., Tsendbazar N. - E., Herold M., Fritz S. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe 2020. DOI 10.5281/zenodo.3939050.

12. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Rem. Sens. Environ.*, 2017, vol. 202, no. 1, pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

13. Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju C. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 4, 350 p.
14. Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q., Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017. DOI: 10.1016/j.pce.2017.01.017.
15. Knist S., Goergen K., Simmer C. Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2020, vol. 132, pp. 53-69. DOI: 10.1007/s00703-019-00671-y.
16. Chang M., Fan S., Wang X.M. Impact of refined land-cover data on WRF performance over the Pearl River Delta region, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 50. pp. 645-655.
17. Global Forecast System (GFS). Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
18. Tsendbazar N., Tarko A., Li L., Herold M., Lesiv M., Fritz S., Maus V. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015-2019. *Validation Report*, 2020, DOI 10.5281/zenodo.3606370.
19. Xiao Z.Q., Liang S., Wang J.D., Chen P., Yin X.J., Zhang L.Q., & Song, J.L. Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 209-223.
20. Niu G. Y., Yang Z. L., Mitchell K. E., Chen F., Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, vol. 116, p. D12109. DOI 10.1029/2010JD015139.

Поступила 20.06.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 20.06.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-69-83>

УДК 551.578.11

Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года

И.И. Леонов, Н.Н. Соколихина

*Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
leonov@geogr.msu.ru*

Рассмотрены синоптические условия формирования беспрецедентного ледяного шторма с образованием гололеда высокой интенсивности, длительным по времени и на достаточно большой площади в Приморском крае России. Показана ведущая роль сильного выдвижения слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы и наличие двусторонней адвекции тепла в нижней тропосфере. Показано, что длительное сохранение гололеда на территории края обусловлено продвижением южного циклона на восток и приходом холодных воздушных масс с континента. Проведены эксперименты численного моделирования замерзающих у земной поверхности осадков с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW. Результаты моделирования позволили получить более подробную вертикальную структуру атмосферы во время формирования замерзающих осадков и заполнить недостающие для анализа данные.

Ключевые слова: опасные явления погоды, гололедно-изморозевые отложения, гололед, замерзающий дождь, ледяной дождь, численный прогноз погоды, WRF-ARW

Formation conditions of an ice storm in Vladivostok in November 2020

I.I. Leonov, N.N. Sokolikhina

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
leonov@geogr.msu.ru*

Synoptic conditions for the formation of an unprecedented ice storm with the generation of long-lived high-intensity glaze ice on the vast territory in Primorsky Krai are investigated. The leading role of the strong extension of the layer with positive temperature towards the cold air mass and the existence of two-way temperature advection in the lower troposphere are shown. It is shown that the long-term preservation of glaze ice on the territory of the region was associated with the movement of the southern cyclone to the east and the arrival of cold air masses from the continent. Experiments were implemented to simulate freezing precipitation using the WRF-ARW mesoscale model. The simulation results made it possible to obtain more detailed data on the vertical structure of the atmosphere during the formation of freezing precipitation and to fill in the missing data for analysis.

Keywords: severe weather events, ice accretion, glaze ice, freezing rain, ice pellets, numerical weather prediction, WRF-ARW

Введение

До настоящего времени особенно важными остаются исследования, связанные с изучением опасных гидрометеорологических явлений на территории России. В «Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений» [12] среди прочих входят сильные гололедно-изморозевые отложения, диаметр отложения на проводах гололедного станка которых составляет не менее 20 мм для гололеда, 35 мм для мокрого (замерзающего) снега и сложных отложений и 50 мм для изморози. Чаще всего опасные отложения гололеда формируются во время выпадения замерзающей мороси или замерзающего дождя [6]. Во время образования гололеда вместе с замерзающим дождем или моросью может наблюдаться ледяной дождь, относящийся к твердым осадкам. В совокупности эти явления образуют замерзающие осадки.

Для описания отдельных случаев выпадения замерзающих осадков хорошо подходит термин «ледяной шторм» – аналог англоязычного термина «ice storm», обозначающего опасные случаи образования гололеда с толщиной отложений льда более $\frac{1}{4}$ дюйма (6,4 мм) [11]. Для российских условий термин «ледяной шторм» уместно употреблять для описания синоптических условий, во время которых диаметр образовавшихся гололедно-изморозевых отложений достиг опасных значений, установленных для территории России [12].

Сильные гололедно-изморозевые отложения становятся причиной серьезных негативных последствий для множества отраслей народного хозяйства, а также могут способствовать причинению ущерба жизни и здоровью людей. Так, например, ледяной дождь, прошедший в 2010 году в Московском регионе, стал причиной длительного нарушения электроснабжения населения, обледенение привело к многочисленным авариям на автодорогах, изменению режима работы железнодорожного транспорта и к серьезным сбоям в режиме работы аэропортов [1, 2]. Лучшие всего условия формирования замерзающих осадков на территории России изучены для европейской части и юга [6]. Также подробно рассматривались условия образования замерзающего дождя на территории Пермского края [4].

В предлагаемой работе объектом изучения стал ледяной шторм, прошедший во Владивостоке в ноябре 2020 года. Он привел к катастрофическим экономическим последствиям на юге Приморского края.

В середине ноября 2020 года в Приморье наблюдалась теплая погода, на несколько градусов выше нормы. Атмосферные условия обуславливались распространением над Приморским краем отрога Сибирского антициклона. Однако во второй половине дня 18 ноября во Владивостоке начался ливневой дождь, который в сочетании с отрицательной температурой воздуха привел к образованию гололеда. Нарастание гололеда продолжалось практически двое суток и достигло значения 28 мм по данным метеорологической станции Владивосток. Беспрецедентный гололед

привел к многочисленным обрывам линий электропередач, обрушениям опор воздушных линий. Десятки тысяч жителей Владивостока остались без электроэнергии, отопления, воды и связи, были повалены тысячи деревьев. Более 600 человек были вынуждены обратиться в медицинские учреждения в связи с полученными из-за гололеда травмами. Отложения в виде гололеда продержались на проводах и деревьях еще около недели.

Рассмотрены не только синоптические условия выпадения замерзающего дождя с последующим образованием интенсивного и продолжительного гололеда, но и для более детального анализа структуры тропосферы проведены численные эксперименты с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

Материалы и методика исследования

На первом этапе исследования был сделан подробный синоптический анализ условий формирования замерзающего дождя аналогично анализу синоптической ситуации, наблюдаемой в Москве в декабре 2010 года [5].

Для выполнения классического синоптического анализа использовались данные электронного архива ГИС «Метео» научно-производственного центра «МэпМейкер» [10], в качестве вспомогательных использовались данные реанализа ERA5 [7].

Рассматривался синоптический период продолжительностью 7 суток с 16 по 23 ноября 2020 года, во время которого над Приморским краем сформировалась и развивалась атмосферная циркуляция, которая привела к выпадению замерзающего дождя и образованию гололеда высокой интенсивности.

По ежедневным срочным данным были восстановлены поля давления и приземной температуры воздуха, области выпадения осадков для каждого срока наблюдения с целью исследования перемещения атмосферных вихрей и атмосферных фронтов в Приморье.

Для изучения вертикальной структуры тропосферы были использованы данные радиозондирования с аэрологических станций Владивосток (Садгород), Дальнереченск и Каннин. Эти данные позволили схематично изобразить пространственный вертикальный разрез тропосферы до высоты 5 км. По данным радиозондов станции Садгород был построен временной разрез тропосферы с 17 по 20 ноября 2020 г. (BCB), наглядно показывающий расположение зон адвекций тепла и холода и, как следствие, метеорологические явления, наблюдаемые во Владивостоке.

Для более детального изучения синоптических условий и вертикальной структуры атмосферы были проведены эксперименты с использованием мезомасштабной модели атмосферы WRF-ARW 4.1.2 [9]. Выбор модели обусловлен тем, что исходный код модели находится в свободном доступе. Также важно отметить, что модель постоянно совершенствуется, имеет широкий диапазон выбора начальных данных, настроек запуска и инструментов для обработки результатов моделирования.

В качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа ERA5 с шагом по пространству $0,25^\circ$ [7]. Область интегрирования имела три расчетных домена с шагом по пространству 18, 6 и 2 км с количеством узлов 142×121 для каждой вложенной сетки.

Модель WRF-ARW, как уже отмечалось выше, имеет множество настроек физических параметризаций. При проведении экспериментов использовалась параметризация пограничного слоя YSU, новая упрощенная схема Аракавы – Шуберта для описания конвекции и алгоритмы RRTMG для расчета коротковолновой и длинноволновой радиации. Схема Noah-MP использовалась в качестве модели, описывающей процессы, происходящие на подстилающей поверхности и в почве. В экспериментах по воспроизведению фазы выпадающих осадков большое значение имел выбор параметризации микрофизики. В ходе проведения численных экспериментов использовалась двухмоментная схема NSSL [8], включающая в себя расчет семи типов гидрометеоров: водяной пар, облачные капли, дождь, снег, лед, крупа и град.

Модель запускалась на 36 часов, первые 12 из которых отводились на усвоение данных и в дальнейшем отбрасывались, из оставшихся суточных периодов создавался единый модельный прогон длиной в четверо суток, охватывающий период формирования и выпадения замерзающего дождя на территории Приморского края. Результаты записывались с дискретностью в один час.

Для сравнения с данными радиозондирования и более подробного изучения вертикальной структуры тропосферы по данным моделирования были построены временные и пространственные вертикальные разрезы нижней тропосферы, карты полей ветра и температуры воздуха на различных высотах, а также карты выпадения замерзающих осадков.

Существует множество способов определения фазы выпадающих осадков. Основные методы прогноза замерзающих осадков описаны в [6]. В публикациях последнего времени рассмотрены методы, использующие возможности современных параметризаций микрофизики выделять гидрометеоры различных фазовых состояний [3]. В настоящей работе использовался схожий подход. Замерзающими считались осадки, во время образования которых отношение гидрометеоров жидкой фазы к общему числу гидрометеоров превышало 80 % и температура воздуха на высоте 2 метров принимала отрицательные значения.

Результаты синоптического анализа

В первой половине ноября 2020 года в Приморье наблюдалась теплая погода, со средней температурой воздуха на несколько градусов выше нормы. Первая декада ноября по данным наблюдений оказалась теплее нормы на $1,5^\circ\text{C}$, вторая – на $4,5^\circ\text{C}$.

За три дня до начала катастрофического ледяного шторма, 16 ноября, в южной части Приморья наблюдалась спокойная погода. Основным

центром действия атмосферы, определяющим погодные условия, являлся сибирский антициклон. Температура воздуха в районе Владивостока составляла около 5 °С днем, и около 1 °С ночью и в утренние часы. Значение давления превышало 1025 гПа. Наблюдался ветер северных направлений со скоростью до 10 м/с и порывами до 16 м/с.

Днем 17 ноября (около 00 ч ВСВ 17.11.2020) через Владивосток прошел теплый атмосферный фронт, направление ветра сменилось на северо-западное, а потом на юго-восточное. Температура воздуха начала повышаться. В это же время над юго-восточным Китаем сформировался циклон, который под действием ведущего потока смещался на восток (рис. 1).

В течение 18 ноября южный циклон смещался в северо-восточном направлении, к концу дня пересек Желтое море и достиг района границы Китая и КНДР (рис. 2).

В 3 часа ночи по местному времени во Владивостоке были зафиксированы первые отложения льда величиной 1 мм. В первой половине дня 18 ноября наблюдались осадки в виде слабого ливневого дождя с ухудшением горизонтальной дальности видимости до 200 м. Во второй половине дня наблюдались осадки в виде мороси и ливневого дождя, направление ветра сменилось на северное.

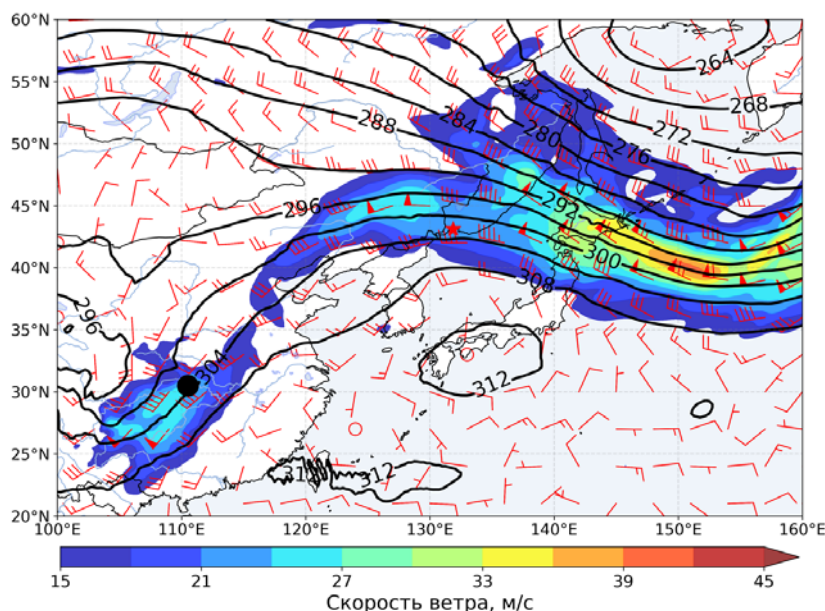


Рис. 1. Карта абсолютной барической топографии 700 гПа по данным реанализа ERA5 за 17.11.2020 00.00 ч ВСВ (черной точкой отмечено приземное положение центра южного циклона).

Fig. 1. Map of absolute baric topography of 700 hPa according to the ERA5 re-analysis data for 11/17/2020 00 UTC (the black dot marks the surface position of the center of the southern cyclone).

Ночью 19 ноября южный циклон продвинулся на восток. К этому времени давление в центре циклона составляло менее 1000 гПа. Атмосферное давление во Владивостоке продолжало понижаться и к 19 часам по местному времени составило 1001,9 гПа. С приближением теплого фронта теплый и влажный тропический воздух стал надвигаться на холодный умеренный континентальный воздух. В ходе вынужденной конвекции на юге Приморья усилился процесс осадкообразования. В районе Владивостока наблюдались осадки в виде крупы, ливневого снега, ледяного и замерзающего дождя (рис. 2).

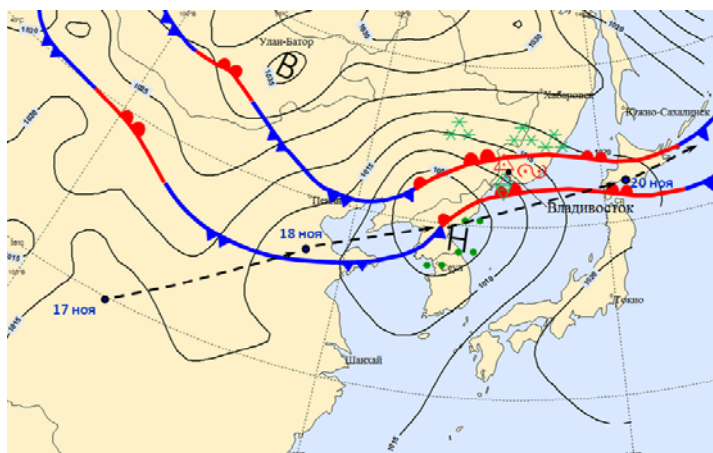


Рис. 2. Карта приземного синоптического анализа за 19.11.2020 00.00 ч ВСВ, траектория перемещения южного циклона (точками отмечено положение центра действия для 00.00 ч ВСВ каждого дня).

Fig. 2. Surface synoptic chart for 11/19/2020 00UTC, trajectory of the southern cyclone (the dots mark the position of the center of action for 00 UTC of each day).

Таким образом, ночью 19 ноября юг Приморского края находился в сложной синоптической обстановке. Около земли наблюдалась отрицательная температура воздуха от -1 до -5 °С, которая была обусловлена притоком холодной континентальной воздушной массы с севера. В то же время на высотах от 800 до 2900 м располагалась теплая и очень влажная воздушная масса с температурой воздуха выше 5 °С, которую принес южный циклон.

Такая структура атмосферы привела к тому, что осадки в виде снега, проходя через слой воздуха с положительной температурой, превращались в капли дождя, далее в приземном слое холодного воздуха переохлаждались и мгновенно замерзали при столкновении с земной поверхностью, образуя слой гололеда.

К часу ночи 19 ноября диаметр гололедных отложений составил 5 мм, к 7 часам утра следующего дня по местному времени – 12 мм,

к 13 часам – 28 мм. Максимальный диаметр отложений гололеда сохранялся до 10 часов утра 20 ноября, общая продолжительность обледенения составила 210 часов, практически 9 дней.

По данным Приморского УГМС, гололедно-изморозевые отложения наблюдались также на метеорологических станциях Анучино и Тимирязевский.

На метеорологической станции Анучино образование гололеда началось 19 ноября в 4 часа утра и продолжалось 15 часов. Толщина отложения достигала 12 мм, диаметр – 29 мм. Максимальный вес отложения составил 184 г. Начало образования гололеда наблюдалось при слабо отрицательной температуре воздуха $-3,4^{\circ}\text{C}$, северо-восточном ветре со скоростью 3 м/с. Отложения гололеда продержались 62 часа.

На метеорологической станции Тимирязевский образование гололеда началось 18 ноября в 22 часа по местному времени. Толщина отложения достигала 3 мм при диаметре 7 мм. Максимальный вес отложения составил 56 г. Начало гололедообразования наблюдалось при температуре воздуха $-2,3^{\circ}\text{C}$, северном ветре с направлением 17° и скоростью 5 м/с. Отложения гололеда сохранялись 66 часов.

Временной ход нарастания и сохранения отложений гололеда на метеорологических станциях Владивосток, Анучино и Тимирязевский представлен на рис. 3.

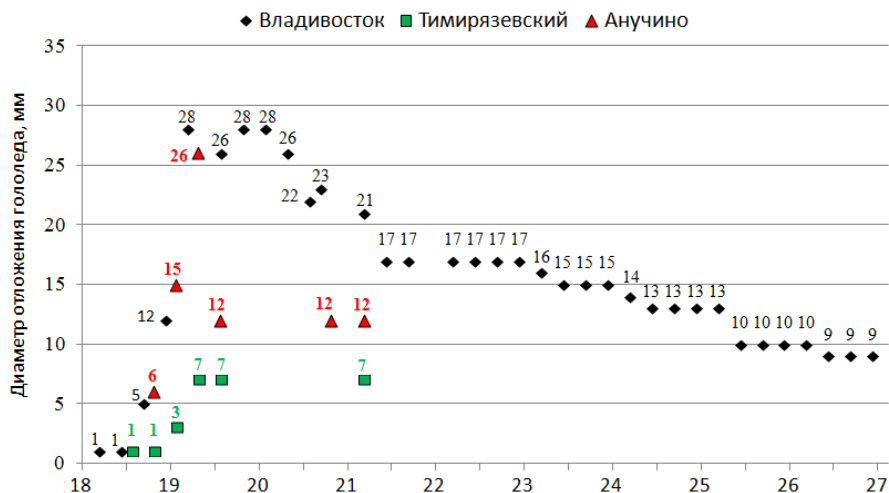


Рис. 3. График временного хода нарастания и сохранения отложений гололеда на метеорологических станциях Владивосток, Тимирязевский и Анучино на момент времени 00.00 ч ВСВ в период 18–27.11.2020 г.
Fig. 3. Graph of the time course of the growth and preservation of ice accretion at the meteorological stations Vladivostok, Timiryazevsky and Anuchino for 00 UTC from 18 to 27 November 2020.

Помимо описанных выше случаев образования гололеда 19–20 ноября 2020 года в Приморском крае, там же наблюдались и другие опасные явления погоды. В эти дни на всей территории края прошли сильные и очень сильные осадки в виде дождя, мокрого снега и снега. Общее количество выпавших осадков за период 19–20 ноября составило 30–74 мм, местами на западе и юго-востоке края 77–90 мм.

Еще одна особенность рассматриваемой синоптической ситуации состояла в том, что южный циклон продолжал смещаться на восток, и юг Приморья в последующие дни находился под действием отрога Сибирского антициклона, что привело к сохранению отрицательной температуры воздуха в данном регионе и, как следствие, сохранению отложений льда вплоть до 27 ноября 2020 года.

При анализе синоптических условий, приводящих к опасным гололедным явлениям, особенное значение имеет исследование вертикальной структуры тропосферы. С этой целью по данным радиозондирования на аэрологических станциях Владивосток (Сад-Город), Дальнереченск и южнокорейского города Каннин за 00.00 ч ВСВ 19 ноября 2020 года был построен вертикальный разрез через фронтальную зону для периода максимальной интенсивности замерзающих осадков дождя во Владивостоке (рис. 4а).

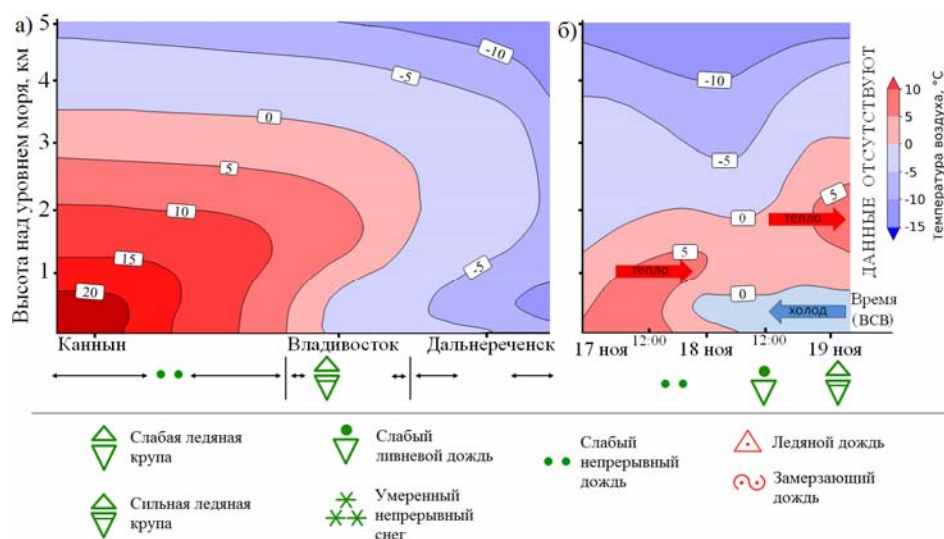


Рис. 4. Термическая структура тропосферы в 00.00 ч ВСВ 19.11.2020 в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков с образованием гололеда в ноябре 2020 г. (а); эволюция очага замерзающего дождя во Владивостоке в период 17–19 ноября 2020 г. (б).

Fig. 4. Thermal structure of the troposphere in the warm front zone during freezing precipitation with ice formation in November 2020 (a); evolution of the center of freezing rain in Vladivostok from 17 to 19 November 2020 (b).

Утром 19 ноября в момент максимальной интенсивности выпадения замерзающих осадков и образования гололеда слой с положительной температурой воздуха располагался приблизительно от 700 до 3000 м над земной поверхностью, что создавало благоприятные условия перехода твердых обложных осадков в жидкие, а затем в переохлажденные в зоне отрицательных температур. Слой с положительной температурой располагался в холодной воздушной массе, что является наиболее характерным показателем для фронтальных гололедных ситуаций. Данные радиозондирования не позволяют оценить протяженность выдвижения слоя положительных температур с высокой точностью, но учитывая большую вертикальную мощность данного слоя и широкую полосу гололедообразования можно сделать предположение, что выдвижение области положительных температур в область холодной воздушной массы составляло не менее 150 км.

Описанная выше картина, как правило, характерна для случаев интенсивных и продолжительных гололедообразующих ситуаций. В ноябре 2020 г. гололедообразующие явления наблюдались в широкой полосе (300–400 км) перед теплым фронтом и были в первую очередь связаны с глубоким выдвижением слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы.

Значительное искривление изотерм в холодном подфронтальном воздухе свидетельствует о том, что наряду с адвекцией теплого и влажного тропического воздуха на высотах более 1200 м в приземном слое до высоты 500 м наблюдается не менее интенсивная адвекция холода. Таким образом, в области перед теплым фронтом имеет место двухсторонняя адвекция.

Ранее нами было сделано предположение, что чем интенсивнее указанная двухсторонняя адвекция, тем ярче проявляется аномальное искривление изотерм в подфронтальной холодной воздушной массе и тем больше протяженность зоны гололедных явлений теплого фронта [5]. Ноябрьский случай образования гололеда на юге Приморского края стал очередным подтверждением этого предположения.

Помимо пространственной картины термической структуры тропосферы в зоне прохождения теплого фронта, были рассмотрены временные изменения условий атмосферной стратификации над Владивостоком.

В ходе анализа временного хода основных параметров стратификации в нижних слоях тропосферы над Владивостоком в период рассмотренных выше событий была построена схема эволюции очага замерзающего дождя (рис. 4б), которая наглядно иллюстрирует основные детали вертикальной структуры атмосферы. На предлагаемой схеме отчетливо проявилась обширная линза теплого и влажного воздуха, характерная для явления замерзающих и ледяных дождей высокой интенсивности.

Результаты численного моделирования

Данных с наземных метеорологических станций, особенно со станций аэрологического радиозондирования, не всегда достаточно для детального описания какого-либо метеорологического явления. Так, из-за сильного обледенения приборов на метеорологической станции Владивосток не измерялись скорость и направление ветра с 22 ч 18 ноября по 7 ч утра 20 ноября. Кроме этого, отсутствовали данные радиозондирования на аэрологической станции Сад-Город для сроков с 12 ч 19 ноября по 0 ч 22 ноября 2020 г. Этот факт делает невозможным изучение структуры тропосферы в указанные даты. С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением были проведены численные эксперименты по восстановлению гололедных явлений в ноябре 2020 года с использованием атмосферной модели WRF-ARW.

На первом этапе с помощью модели получилось воспроизвести основные схемы, полученные в результате синоптического анализа. Это схема эволюции очага замерзающего дождя над Владивостоком и схемы термической структуры тропосферы в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков с образованием гололеда.

На рис. 5а представлен вертикальный разрез тропосферы, показывающий постепенное выдвижение слоя положительных температур в область холодного воздуха. Атмосферная модель WRF-ARW хорошо воспроизвела сильное искривление изотерм в зоне теплого фронта, характерное для двухсторонней адвекции: теплого воздуха на высоте и холодного у земной поверхности.

Также с помощью модели WRF-ARW был воспроизведен временной разрез тропосферы в период с 17 по 21 ноября (рис. 5б). На данной схеме отчетливо проявилась линза теплого воздуха, расположение и время жизни которой хорошо согласуется с данными радиозондирования во Владивосток (аэрологическая станция Сад-Город).

Как неоднократно говорилось выше, прогнозирование осадков является очень сложной задачей, особенно в тех случаях, когда это осадки различных фазовых состояний. Представленные схемы термической структуры тропосферы могут значительно облегчить изучение и прогнозирование явления замерзающих дождей. Важным фактом является то, что современные гидродинамические модели атмосферы, в том числе WRF, COSMO, ICON и другие, успешно прогнозируют температуру воздуха на ближайшие сутки. Это дает возможность получения подробных пространственных и временных разрезов тропосферы и дальнейшего их использования для уточнения прогноза замерзающих осадков.

Помимо данных о температуре воздуха на различных высотах, в качестве вспомогательных можно использовать данные о направлении и скорости ветра. Во время синоптического анализа был сделан вывод, что интенсивное выпадение замерзающих осадков было связано

с двухсторонней адвекцией воздуха. Для более подробного изучения этого предположения моделью WRF-ARW были воспроизведены поля ветра на высотах до 5 км.

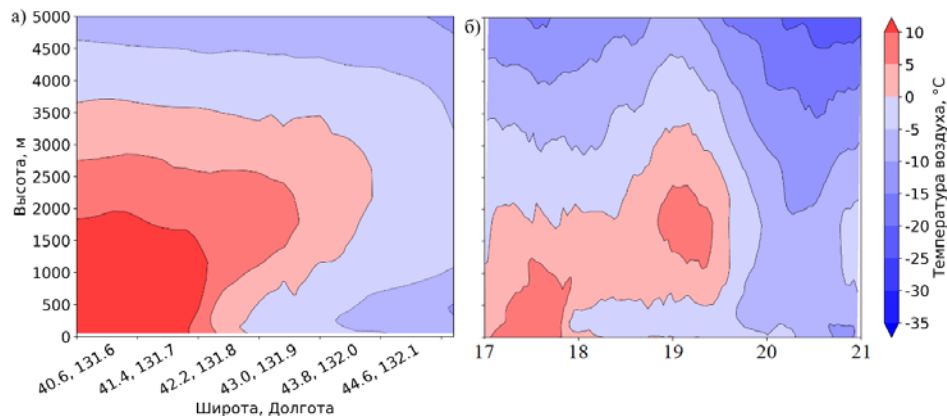


Рис. 5. Вертикальный разрез тропосферы до 5 км по данным модели WRF-ARW на момент времени 00.00 ч ВСВ 19 ноября 2020 г. (а); эволюция очага заморающего дождя во Владивостоке в период 17–21 ноября 2020 г. по данным модели WRF-ARW (б).

Fig. 5. a) Vertical section of the troposphere up to 5 km according to the WRF-ARW model in November 2020 (a); evolution of the center of freezing rain in Vladivostok from 17 to 21 November 2020 according to the WRF-ARW model (b).

Данные моделирования показали, что 19 ноября на высотах около 300 м над югом Приморского края преобладал северный ветер. В это же время на высотах около 1500 м наблюдался южный ветер. Это указывает на то, что 19 ноября район Владивостока находился в сложной синоптической обстановке: на высотах от 800 до 2000 м в столичный регион Приморья проникал теплый и влажный тропический воздух, а с северными потоками у земли на территорию Приморского края подкачивался холодный воздух.

Для более наглядного восприятия данной картины были построены карты поля ветра на высоте 300 и 1500 м над Приморским краем, которые подтверждают наличие двухсторонней адвекции в данный период (рис 6а, рис. 6б).

Помимо изучения термической структуры атмосферы, было необходимо изучить возможность восстановления мезомасштабной моделью WRF-ARW. Главный интерес представлял фазовый состав осадков. В рамках завершающей фазы экспериментов были построены поля заморающих осадков согласно описанной выше методике. На рис. 7 представлены поля осадков за трехчасовой период наибольшей интенсивности их выпадения в виде заморающего дождя, полученные в результате пост-процессинга выходных данных модели WRF-ARW.

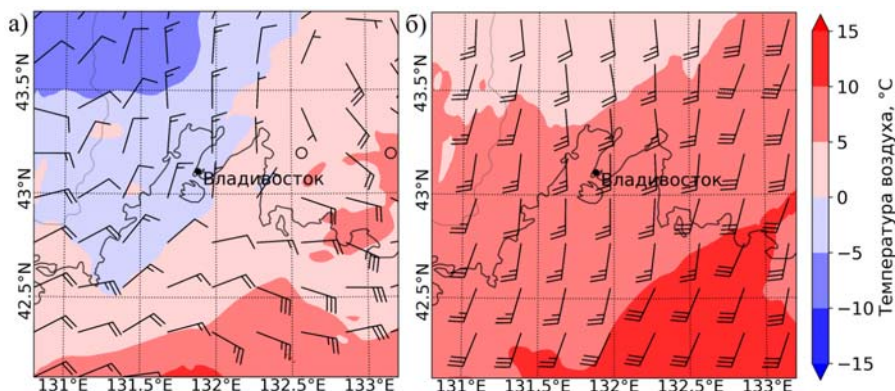


Рис. 6. Поля температуры воздуха, направления и скорости ветра над югом Приморского края по данным модели WRF-ARW 19.11.2020 00.00 ч ВСВ на высоте 300 м (а); 1500 м (б).

Fig. 6. Air temperature, wind speed and wind direction fields over the south of Primorsky Krai according to the WRF-ARW model 11/19/2020 00 UTC at 300 m (a); 1500 m (b).

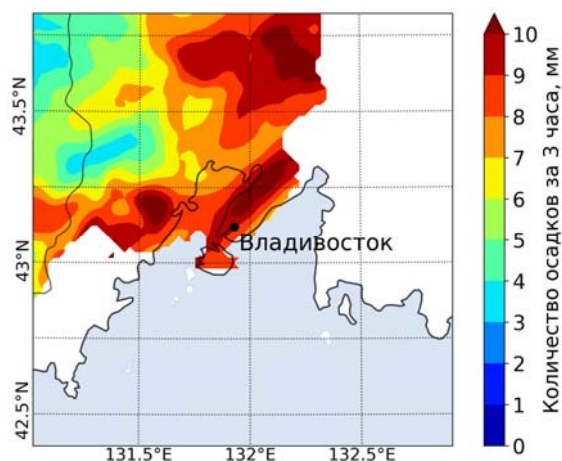


Рис. 7. Поле количества осадков, выпавших в виде замерзающего дождя за трехчасовой период их наибольшей интенсивности на момент времени 03 ч ВСВ 19.11.2020 г. по данным модели WRF-ARW.

Fig. 7. Field of the amount of precipitation in the form of freezing rain for 3 hours according to the WRF-ARW model 11.19.2020 03 UTC.

Важно отметить, что модель воспроизвела полосу выпадения замерзающих осадков на территории Приморского края, хорошо согласующихся с данными наблюдений на метеорологических станциях, оборудованных гололедными станками. Высокое пространственное разрешение модели позволило воспроизвести процесс гололедообразования высокой интенсивности на о. Русский.

Заключение

В результате работы были изучены условия формирования катастрофического ледяного шторма на территории Приморского края. В ходе работы применялись два различных подхода: проведение классического синоптического анализа и анализ данных численного моделирования.

Синоптический анализ показал, что инициатором выпадения катастрофических замерзающих осадков и формирования опасных гололедных отложений в ноябре 2020 года стал выход южного циклона, втянувшего в свою циркуляцию резко контрастирующие по температуре и влагосодержанию воздушные массы. Это привело к образованию сложной картины атмосферной стратификации в нижней тропосфере: ярко выраженные слои положительных температур на высотах и отрицательных – вблизи земли. Широкая полоса гололедных явлений была вызвана глубоким выдвиганием слоя положительных температур в сторону холодной воздушной массы.

Существование в нижней тропосфере двухсторонней адвекции температуры усилило процесс гололедообразования, а приток холодной континентальной воздушной массы с севера препятствовал быстрому таянию образовавшейся толстой корки льда на земной поверхности. По этой причине общая продолжительность обледенения составила 210 часов, практически 9 дней.

С целью более подробного изучения условий формирования ледяного шторма в Приморье были проведены численные эксперименты с использованием мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW. Результаты численного моделирования позволили получить данные о метеорологических полях с высоким временным и пространственным разрешением.

Основные синоптические механизмы выпадения замерзающего дождя над югом Приморского края России были представлены в виде наглядных схем, построенных на основе аэросиноптического анализа и данных моделирования. Рассмотренные в данной работе схемы можно использовать для дальнейшей разработки методов прогнозирования таких опасных ледяных и замерзающих дождей.

Статья посвящена памяти Евгения Константиновича Семенова, выдающегося ученого в области метеорологии, блестящего синоптика, великолепного лектора и прекрасного учителя. Бесценный опыт и знания Евгения Константиновича на протяжении многих лет помогали его ученикам находить особенный подход к изучению условий формирования аномалий погоды, и эта работа не была исключением.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 121051400081-7.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лед и снег. 2011. № 3 (115). С. 119–124.

2. Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А. и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25–26 декабря 2010 года // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 214–230.

3. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 735–741. DOI: 10.15372/AOO20200911.

4. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 27–35.

5. Семенов Е.К., Соколичина Н.Н., Соколичина Е.В., Леонов И.И. Атмосферная циркуляция над центром Европейской России в период ледяного дождя в декабре 2010 года // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 91–102.

6. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130–161.

7. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146: P. 1999–2049.

8. Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // J. Atmos. Sci. 2010. Vol. 67. P. 171–194. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>

9. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gil, D.O., Liu Z., Berner J. et al. A description of the advanced research WRF Model version 4 // NCAR/TN-556+STR/NCAR Technical Note. 2019. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.

10. Электронный архив научно-производственного центра «Мэп Мейкер» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mapmakers.ru/> (Дата обращения: 05.04.2021).

11. Электронный метеорологический словарь Национального управления океанических и атмосферных исследований [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.weather.gov/otx/Full_Weather_Glossary (Дата обращения: 15.07.2021).

12. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (Дата обращения: 21.010.2021).

References

1. Vilfand R.M., Golubev A.D. Meteorologicheskie usloviya vypadeniya ledyanых dozhdеj 25-26 dekabrya 2010 g. nad centrom Evropejskoj chasti Rossii. *Led i sheg [Ice and Snow]*, 2011, vol. 115, no. 3, pp. 119–124 [in Russ.].

2. Golubev A.D., Kabak A.M., Nikol'skaya N.A. et al. Ice rain in Moscow, Moscow Region, and adjoining areas in the center of the European part of Russia on December 25–26, 2010. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 349, pp. 214–230 [in Russ.].

3. Ignatov R.Yu., Rubinshtein K.G., Yusupov Yu.I. Numerical experiments on the forecast of ice phenomena. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2020, vol. 33, no. 9, pp. 735–741. DOI: 10.15372/AOO20200911 [in Russ.].

4. Kalinin N.A., Smorodin B. L. Unusual Phenomenon of Freezing Rain in Perm Krai. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 8, pp. 521–528. DOI: 10.3103/S1068373912080031.

5. Semenov E.K., Sokolikhina N.N., Leonov I.I., Sokolikhina E.V. Atmospheric Circulation over Central European Russia during Freezing Rain in December 2010. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2018, no. 5, pp. 91-102 [in Russ.].
6. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova Ye.N. Origination and forecasting of freezing precipitation: review and some new results. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2012, vol. 348, pp. 130-161 [in Russ.].
7. Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.
8. Mansell E.R., C.L. Ziegler, Bruning E.C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 2010, vol. 67, pp. 171–194. DOI: 10.1175/2009JAS2965.1
9. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *NCAR/TN-556+STR*. 2019. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
10. Electronic archive of the MapMakers Group Ltd. Available at: <https://mapmakers.ru/> (accessed 5 April 2021).
11. National Weather Service Weather Glossary. Available at: https://www.weather.gov/otx/Full_Weather_Glossary (accessed 15 July 2021).
12. List and criteria of dangerous meteorological phenomena. Available at: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> – (accessed 21 October 2021).

Поступила 14.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.
Submitted 14.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-84-98>

УДК 551.515:001.891.57

Методика анализа обобщенных характеристик структуры Южноазиатской депрессии с учетом термического режима подстилающей поверхности

**Ю.В. Шипко¹, О.В. Колычев¹, С.А. Дьяков²,
И.Е. Кузнецов², В.П. Закусилов²**

¹Центральный научно-исследовательский институт ВВС
(Минобороны России), г. Москва, Россия;

²Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина (Минобороны России), г. Воронеж, Россия
yshipko@mail.ru

Рассматривается Южноазиатская депрессия – сезонный центр действия атмосферы, преобладающий тип циркуляции нижней тропосферы в теплый период года, который особенно выражен над территорией Ближнего и Среднего Востока. Представлена обобщенная факторная модель депрессии для изобарических уровней 1000, 925 и 850 гПа. Дана оценка зависимости обобщенных характеристик структуры депрессии от приземной температуры воздуха в летние месяцы для различных типов депрессии. Полученные в исследовании результаты расширяют сведения о сезонном центре действия атмосферы: позволяют получить типовые поля депрессии с учетом особенностей внутренней структуры; выявить особенности метеорологических условий при различных типах депрессии (в различных районах рассматриваемого макрорегиона); выделенные обобщенные характеристики структуры депрессии могут быть использованы при построении прогностических моделей.

Ключевые слова: Южноазиатская депрессия, геопотенциальная высота, реанализ, изобарический уровень, фактор, кластер, коэффициент корреляции

A method for analyzing generalized characteristics of the South Asia Low structure taking into account a thermal regime of underlying surface

**Yu. V. Shipko¹, O. V. Kolychev¹, S. A. Dykov²,
I. E. Kyznetsov², V. P. Zakusilov²**

¹Central Scientific Research Institute of Air Force
(RF Ministry of Defense), Moscow, Russia;

²MERC of Air Force «Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin»
(RF Ministry of Defense), Voronezh, Russia
yshipko@mail.ru

The South Asia Low is considered, that is a seasonal center of atmospheric action, a predominant type of circulation in the lower troposphere during the warm season over the Near and Middle East. The generalized factorial model of the low for the levels of 1000, 925, and 850 hPa is presented. The dependence of generalized characteristics of the low structure on surface air temperature in the summer months is estimated for different types of the low. The results of the present study extend information about the seasonal center of atmospheric action: they allow obtaining typical fields of the low taking into account the features of internal structure; revealing peculiarities of meteorological conditions for different types of the low (in different parts of the analyzed macroregion). The identified generalized characteristics of the low structure can be used for constructing forecast models.

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

Введение

Объектом исследования является сезонный центр действия атмосферы теплого периода года (апрель–октябрь) – Южноазиатская депрессия (или Азиатский минимум [5]), которая простирается от Восточной Сибири через Монголию и Центральную Азию на Пакистан, Иран, Ирак. Над территорией Ближнего и Среднего Востока депрессия представляет собой глубокую область низкого давления (с центром над южными районами Афганистана и северо-западными районами Пакистана) и носит название переднеазиатской депрессии (ПАД) [1, 2]. В работе рассматривается область: 10–40° северной широты и 30–90° восточной долготы.

ПАД формируется в результате сильного нагревания подстилающей поверхности макрорегиона, поэтому иначе называется термической депрессией. Объекты ПАД относятся к низким и средним барическим образованиям (имеют место до высот 3–4 км) [1, 2].

Географическое положение центра циркуляции, мощность, конфигурация ложбин и другие параметры ПАД оказывают влияние на формирование погодно-климатических условий в различных районах макрорегиона в летний период, которые могут ограничивать функционирование различных метеозависимых организационно-технических систем. Это определяет актуальность исследования особенностей ПАД, в частности оценки влияния термического состояния подстилающей поверхности на структурные компоненты ПАД.

Исходный материал

В качестве исходной информации использовались данные реанализа NCEP/DOE AMIP-II [9] в узлах регулярной сетки с шагом 2,5° по широте и долготе за летние месяцы (июнь, июль, август) периода 2005–2019 гг.: значения геопотенциальной высоты (сроки 00, 06, 12, 18 ч ВСВ) на изобарических уровнях 1000, 925, 850 гПа и температуры воздуха (срок 12 ч

BCB) на уровне 1000 гПа. Предварительно по срочным данным полей геопотенциальной высоты выполнен расчет среднесуточных значений в узлах сетки.

Обобщенная факторная модель ПАД для уровней 1000, 925, 850 гПа

Представленный материал является продолжением исследования ПАД. Разработанная программно-реализованная модель ПАД уровня 925 гПа [8] расширена для изобарических уровней 1000, 925, 850 гПа, поскольку объекты ПАД относятся к барическим образованиям нижней тропосферы. В модели среднесуточного объекта циклонической циркуляции на уровнях 925 и 850 гПа, согласно подходу Н.А. Багрова [6, 7], рассматривалась «чаша», образованная соответствующей поверхностью геопотенциальной высоты с ограничивающей (краевой) изогипсой H_o и проходящей через эту изогипсу плоскостью (рис. 1).

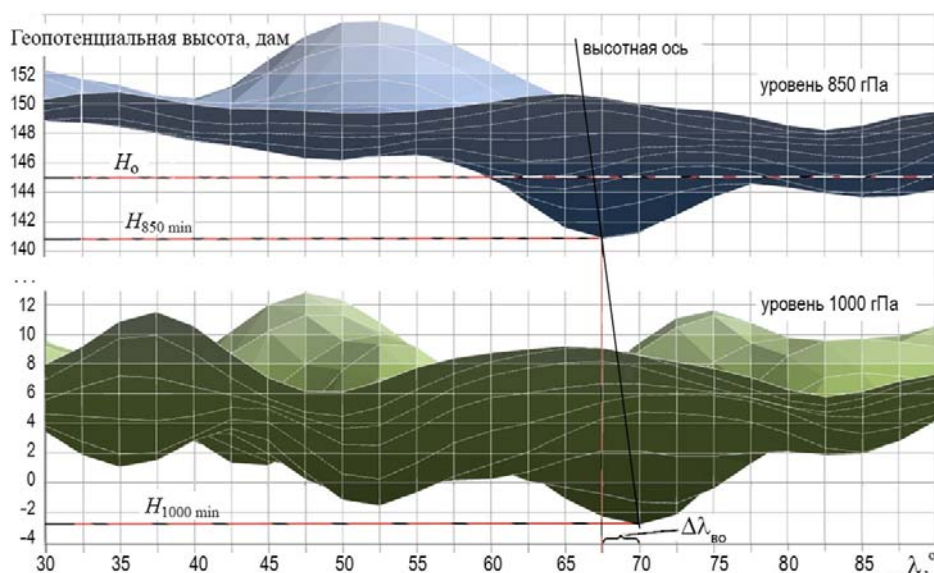


Рис. 1. Схема определения краевой изогипсы и высотной оси по среднесуточным поверхностям геопотенциальной высоты.

Fig. 1. Scheme for determining the edge isohypse and the height axis on the average daily surfaces of geopotential height.

Используется оперативное определение краевой изогипсы по алгоритму: вычисление минимального значения геопотенциальной высоты ($H_{\min}$) на поверхностях H_{925} , H_{850} в рассматриваемой области; расчет значения $H_o = H_{\min} + 4$, которое принимается за краевую изогипсу

каждой поверхности, с учетом, что изогипсы принято проводить через 4 дам (рис. 1).

Определены модельные параметры объектов ПАД в широтно-долготной области $\varphi = 10 - 40^\circ$, $\lambda = 30 - 90^\circ$ в летние месяцы периода 2005–2019 гг. (с использованием расчетных формул, приведенных в работах [6, 7]):

– для уровней 925 и 850 гПа: $H_{\min}$ – минимальное значение поверхностей H_{925} , H_{850} ; S , M – соответственно, площадь, ограниченная изогипсой H_0 , и условная масса объема «чаши»; плотность $Z = M/S$; σ_u , σ_v – средние квадратические отклонения главных осей единичного эллипса рассеяния условных «масс» и коэффициент сжатия эллипса $k = \sigma_v / \sigma_u$; x_c , y_c – координаты центра циркуляции как центра масс и географические координаты φ_c , λ_c (широта, долгота); β – угол положения оси ложбины циклонического образования;

– для уровней 1000 и 850 гПа: $\Delta\lambda_{\text{во}}$, $\Delta\varphi_{\text{во}}$ – отклонения координат высотной оси ПАД по долготе и широте (рис. 1).

Таким образом, модель объекта ПАД описывается 26 параметрами. Чтобы сократить это пространство признаков, использованы процедуры факторного анализа: параметры модели p_j , $j = 1, 2, \dots, m$, представляются в виде линейной комбинации $k < m$ скрытых общих факторов [3]:

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

где a_{ji} – коэффициенты (факторные нагрузки); f_i ($i = 1, 2, \dots, k$) – общие факторы, некоррелированные величины; e_j – остаток.

В результате проведенного факторного анализа получены общие факторы, объясняющие почти 80 % общей дисперсии параметров. Матрица факторных нагрузок приведена в таблице, где выделены значения, превышающие по модулю 0,6 [3]. С учетом значений этих нагрузок факторам дана следующая интерпретация:

- f_1 – фактор условной «мощности» ПАД (35 % дисперсии);
- 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 условной «плотности» (6 % дисперсии).

Полученная факторная модель ПАД (обобщенная для уровней 1000, 925, 850 гПа) удобна для использования при разработке прогностических моделей атмосферных параметров, где применяется небольшое число некоррелированных предикторов.

Таблица. Факторные нагрузки

Table. Factor loadings

Параметр ПАД	Общий фактор модели				
	1	2	3	4	5
Изобарический уровень 925 гПа					
$H_{\min}$	0,834551	0,026733	0,005075	0,092197	0,153971
S	0,884687	0,055712	0,302417	-0,158792	-0,116858
M	0,815442	0,046411	0,294371	-0,169920	-0,294862
Z	0,173240	-0,003397	0,124073	-0,087126	-0,674578
σ_u	0,781847	0,109382	0,111365	-0,462131	0,066810
σ_v	0,623667	-0,593182	0,242192	-0,114652	0,105694
k	0,033112	-0,780739	0,137656	0,266560	0,038108
x_c	0,293522	-0,020393	0,909398	-0,109050	0,085028
y_c	-0,197020	0,389369	-0,830946	0,262762	-0,001160
λ_c	-0,284847	0,069394	-0,912805	0,128215	-0,083065
φ_c	-0,155302	-0,711286	0,108578	-0,441972	-0,082644
β	0,060841	0,602153	0,078963	0,182842	0,336079
Изобарический уровень 850 гПа					
$H_{\min}$	0,759288	0,085641	0,133858	0,269039	0,105899
S	0,716846	0,046522	0,495662	0,284951	-0,220357
M	0,659105	0,056165	0,432227	0,301023	-0,391841
Z	0,091928	0,012651	-0,029859	0,178925	-0,807185
σ_u	0,549471	0,009680	0,646994	0,017993	-0,084946
σ_v	0,560541	-0,507119	0,278397	0,407656	0,085362
k	0,127457	-0,657968	-0,367493	0,388253	0,147824
x_c	0,151618	0,027548	0,927644	0,231799	-0,102490
y_c	0,025735	0,609644	-0,755981	-0,043201	0,088561
λ_c	-0,134014	0,037443	-0,937890	-0,221691	0,096219
φ_c	-0,183304	-0,838014	0,217388	-0,172409	0,001075
β	0,000283	0,686154	0,241801	0,047709	-0,017566
Изобарические уровни 1000, 850 гПа					
$\Delta\lambda_{\text{во}}$	0,200612	-0,136096	-0,166547	-0,713669	0,236406
$\Delta\varphi_{\text{во}}$	-0,109165	-0,815707	0,286973	0,008769	0,036320

Типологизация объектов ПАД

Проведена типологизация внутренней структуры ПАД на основе кластер-анализа, задачей которого является идентификация кластеров (в данном случае – однородных по структуре групп образований термической депрессии) из многомерных данных. Используется процедура иерархической кластеризации, когда априорная информация о распределении всей совокупности объектов не требуется. Мерой близости объектов ПАД принято евклидово расстояние (D) [3]. Проведенная процедура кластеризации на базе полученных значений общих факторов за летний период 2005–2019 гг. показала, что можно выделить три однородные группы (типы) ПАД. На рис. 2 представлено дерево кластеризации объектов, где отчетливо проявляются три ветви «сгустков», кластеры. Обозначим их как 1, 2 и 3 типы ПАД.

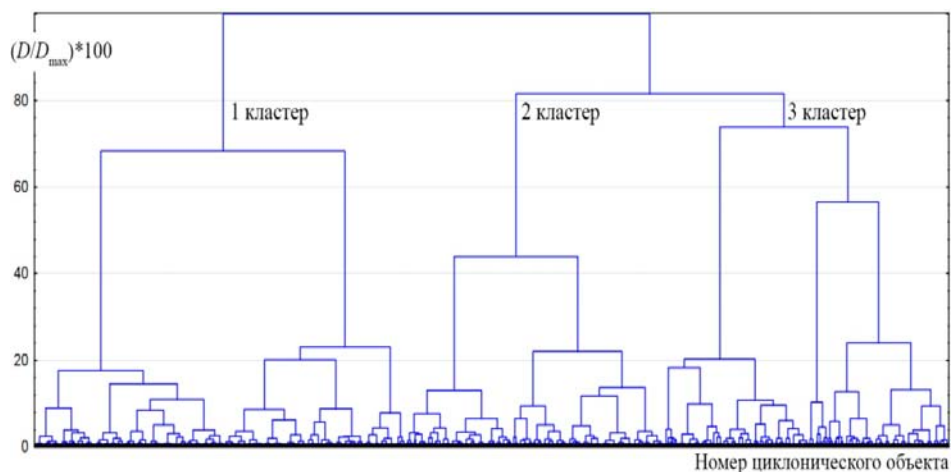


Рис. 2. Дерево кластеризации объектов ПАД (июнь–август, 2005–2019).

Fig. 2. Clustering tree of SAL objects (June–August, 2005–2019).

Визуализация объектов ПАД на факторной плоскости (рис. 3а) показывает, что образования 1 типа (в отличие от объектов 2 и 3 типа) характеризуются (в среднем) отрицательными значениями фактора мощности f_1 и положительными значениями фактора конфигурации f_2 . Объекты 2 и 3 типа ПАД различаются (в среднем) по фактору плотности f_5 (рис. 3б).

Повторяемость (P) типов ПАД в летнем сезоне приведена на рис. 4, где можно заметить, что в июле преобладает 1 тип ПАД (почти 50 % случаев), в августе все типы примерно одинаковой повторяемости.

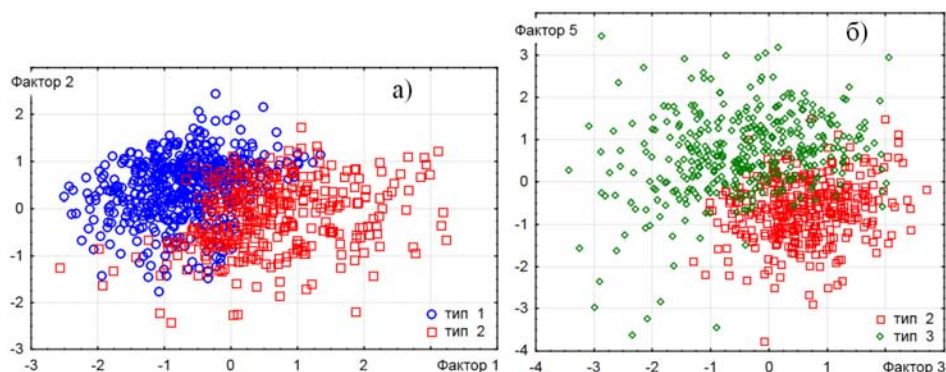


Рис. 3. Распределение объектов ПАД на факторной плоскости с учетом кластеризации: на плоскости f_1, f_2 (не показаны объекты кластера 3 типа) (а); на плоскости f_3, f_5 (не показаны объекты кластера 1 типа) (б).

Fig. 3. Distribution of SAL objects on the factor plane considering clustering: factor plane f_1, f_2 (cluster objects of type 3 are not shown) (a); factor plane f_3, f_5 (cluster objects of type 1 are not shown) (б).

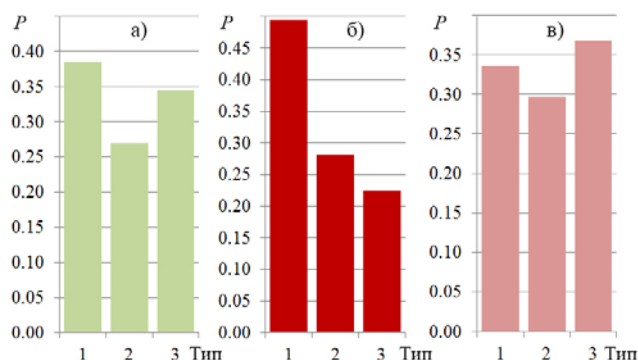


Рис. 4. Повторяемость типов ПАД (2005–2019 гг.): июнь (а); июль (б); август (в).

Fig. 4. Type repeatability of SAL (2005–2019): June (а); July (б); August (в).

Оценка зависимости факторов ПАД от приземной температуры воздуха

В качестве показателя зависимости факторов обобщенной модели ПАД в отношении термического состояния подстилающей поверхности районов Ближнего и Среднего Востока использовалась статистическая оценка коэффициента линейной корреляции между факторами f_k ($k = \overline{1,5}$) и температурой воздуха t_{ij} в узлах (φ_i, λ_j) регулярной сетки изобарического уровня 1000 гПа [4]:

$$r^* = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \left(\frac{f_{kl} - \bar{f}_k}{\sigma_{f_k}} \right) \left(\frac{t_{ijl} - \bar{t}_{ij}}{\sigma_{t_{ij}}} \right),$$

где n – объем выборки (июнь, июль, август 2005–2019 гг.); f_{kl}, t_{ijl} – значения l ($l=1, 2, \dots, n$) общего фактора f_k и температуры приземного воздуха t_{ij} ; $\bar{f}_k, \bar{t}_{ij}, \sigma_{f_k}, \sigma_{t_{ij}}$ – выборочные средние и средние квадратические отклонения рассматриваемых параметров.

Значимость оценки коэффициента корреляции устанавливается проверкой гипотезы об отсутствии корреляционной связи по условию [4]:

$$|r^*| \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r^{*2}} < t_{0,05}(n-2),$$

где $t_{0,05}(n-2)$ – 5 % точка распределения Стьюдента с $(n-2)$ степенями свободы.

При $|r^*| > 0,1$ нулевая гипотеза отсутствия связи между переменными отвергается (при используемых объемах выборок). Это позволяет считать значимыми связи между факторами ПАД и температурой воздуха в узлах сетки при $|r^*| > 0,1$. В этом случае величина коэффициента корреляции позволяет оценить степень влияния приземной температуры воздуха на факторы ПАД, а его распределение по территории – выделить районы этого влияния.

Пространственные распределения значений коэффициента корреляции между f_k и t_{ij} представлены на карте Ближнего и Среднего Востока для летнего сезона при различных типах ПАД в виде полей модуля $|r^*|$ (рис. 5–9).

Анализ рис. 5а позволяет заключить, что термическое состояние Аравийского моря определяет (в основном) фактор f_1 (мощности) 1 типа ПАД. Как следует из рис. 5б, фактор f_1 при 2 типе ПАД имеет значительную площадь распределения корреляционной связи с температурой приземного слоя континентальной части (Аравийского полуострова). Фактор f_1 3 типа ПАД зависит от термического состояния поверхности Средиземного и Аравийского морей (рис. 5в).

Как показано на рис. 6а, термический режим пустыни Тар (на юго-западе Индии), где среднесуточная максимальная температура составляет 40 °С [2], оказывает основное влияние на фактор f_2 (конфигурации депрессии) при формировании 1 типа ПАД. Основное влияние на фактор f_2 2 типа ПАД отмечается (рис. 6б) со стороны Сирийской пустыни и Большой Нефуд (Сирия, Ирак, Иордания, Саудовская Аравия). Как отражено на рис. 6в, на конфигурацию 3 типа ПАД оказывают влияние температуры подстилающей поверхности горных массивов Пакистана, Афганистана, Непала и северной части Индии, а также Средиземного моря и Саудовской Аравии.

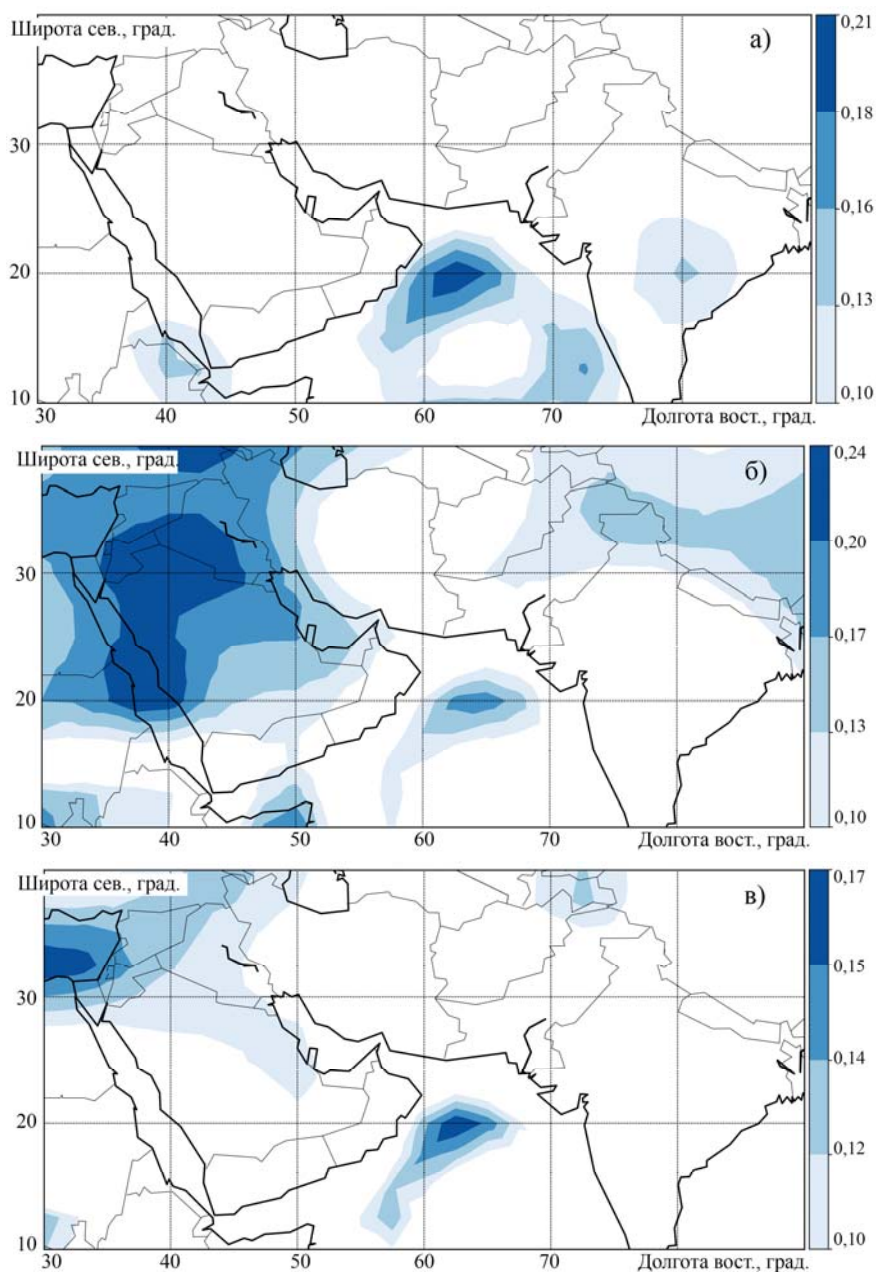


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициента корреляции между температурой и фактором f_1 при различных типах ПАД (июнь, июль, август 2005–2019 гг.): 1 тип (а); 2 тип (б); 3 тип (в).

Fig. 5. Spatial distribution of the correlation coefficient between temperature and factor f_1 for various SAL types (June, July, August, 2005–2019): 1 type (a); 2 type (б); 3 type (в).

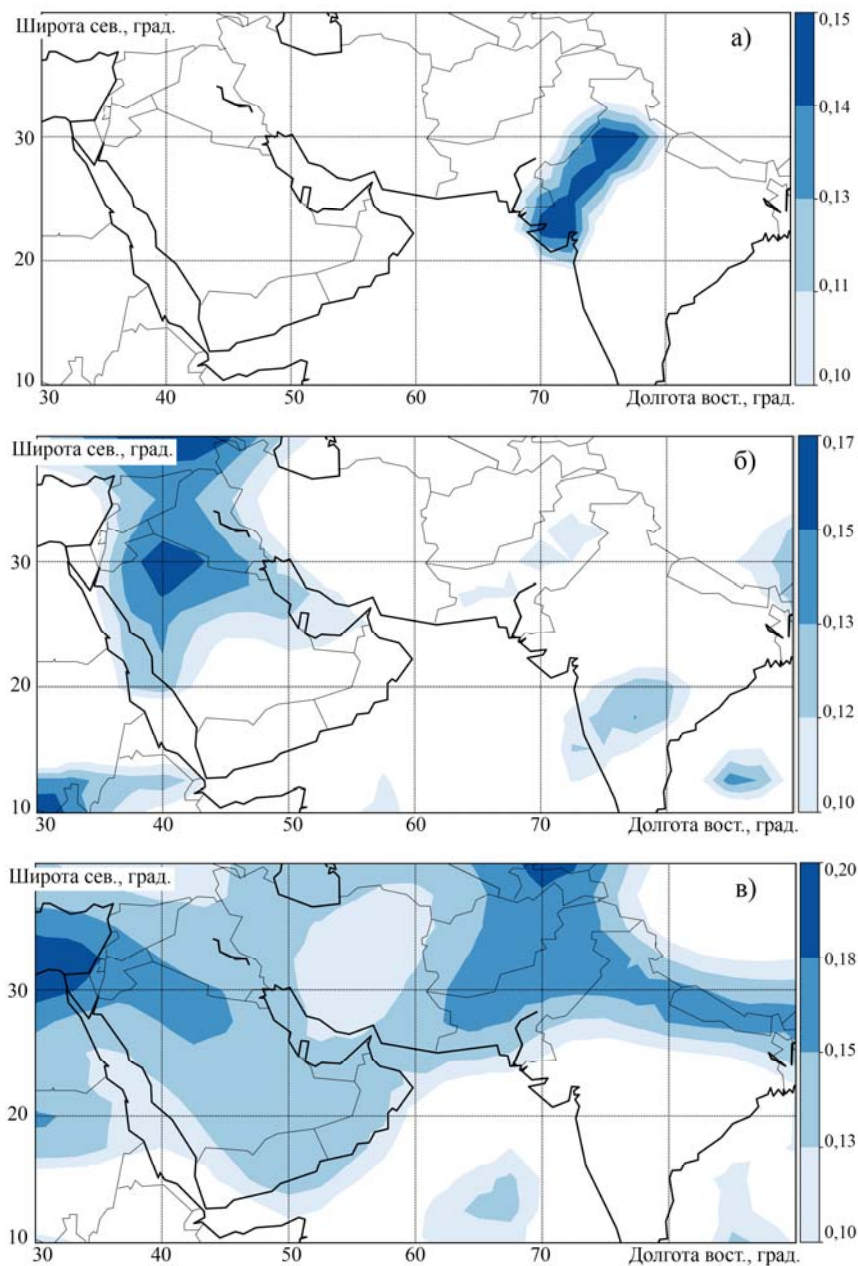


Рис. 6. Пространственное распределение коэффициента корреляции между температурой и фактором f_2 при различных типах ПАД (июнь, июль, август 2005–2019 гг.): 1 тип (а); 2 тип (б); 3 тип (в).

Fig. 6. Spatial distribution of the correlation coefficient between temperature and factor f_2 for various SAL types (June, July, August, 2005–2019): 1 type (а); 2 type (б); 3 type (в).

Корреляционная зависимость температуры и фактора f_3 (положения центра циркуляции) для 1 и 2 типа ПАД незначительна (на рисунках не отображена). Для 3 типа ПАД на f_3 оказывает влияние термическое состояние подстилающей поверхности всей северной части Ближнего и Среднего Востока (рис. 7).

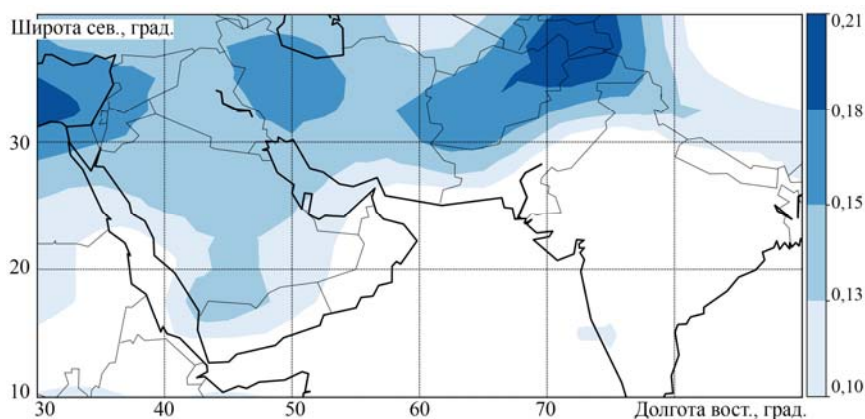


Рис. 7. Пространственное распределение коэффициента корреляции между температурой и фактором f_3 при 3 типе ПАД (июнь, июль, август 2005–2019 гг.).

Fig. 7. Spatial distribution of the correlation coefficient between temperature and factor f_3 for 3 type SAL (June, July, August, 2005–2019).

Пространственное распределение коэффициента корреляции температуры и фактора f_4 (наклон высотной оси ПАД по долготе) представлено на рис. 8. Термические состояния плоскогорья Декан (п-ов Индостан) и горных поверхностей (Памир, Гиндукуш, Гималаи) определяют фактор f_4 1 типа ПАД (рис. 8а); при 2 типе ПАД на f_4 оказывает влияние температура подстилающей поверхности африканского континента (Эфиопия) и, в некоторой степени, районы Аравийского моря, Бенгальского залива, п-ова Индостан (рис. 8б); фактор f_4 для 3 типа ПАД значительно зависит от термического состояния северо-западной части Ближнего Востока, горных массивов северной части Среднего Востока, центральной части полуострова Индостан, западной части африканского континента (рис. 8в).

Фактор f_5 (плотности депрессии) имеет малую корреляционную взаимосвязь с температурой приземного воздуха. Районы термического влияния подстилающей поверхности для 1 и 2 типов ПАД показаны на рис. 9.

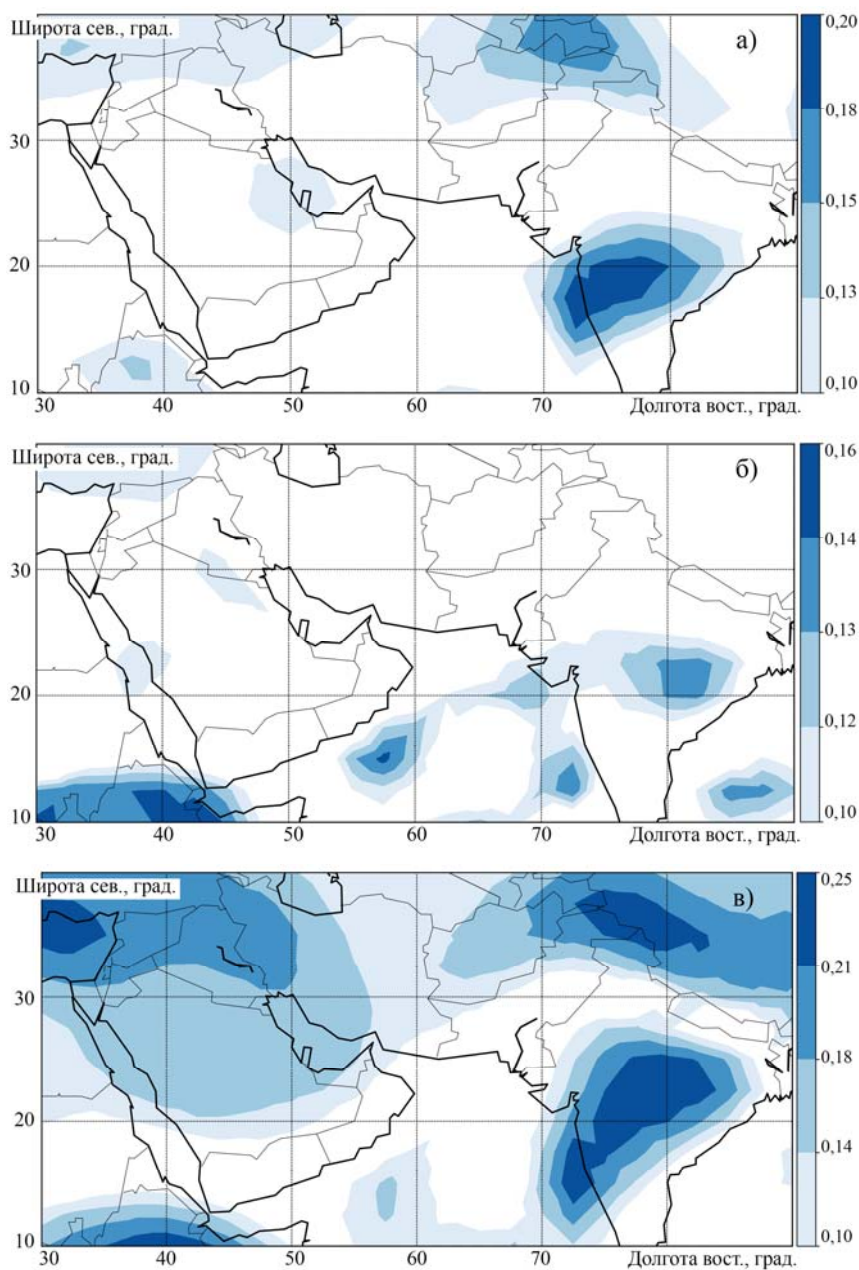


Рис. 8. Пространственное распределение коэффициента корреляции между температурой и фактором f_4 при различных типах ПАД (июнь, июль, август 2005–2019 гг.): 1 тип (а); 2 тип (б); 3 тип (в).

Fig. 8. Spatial distribution of the correlation coefficient between temperature and factor f_4 for various SAL types (June, July, August, 2005–2019): 1 type (а); 2 type (б); 3 type (в).

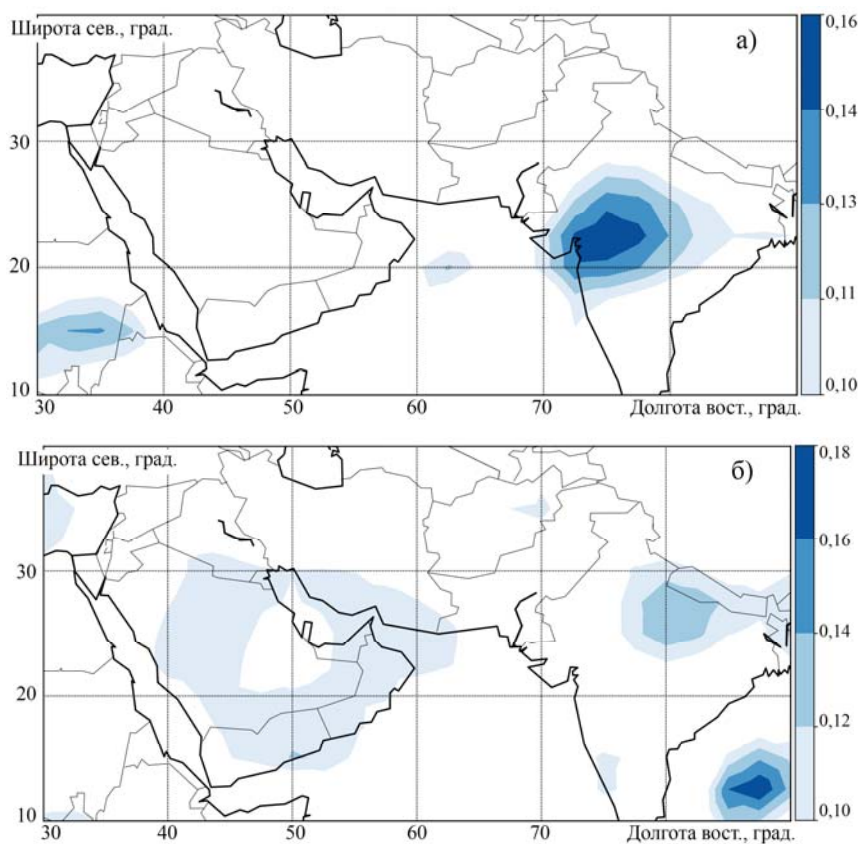


Рис. 9. Пространственное распределение коэффициента корреляции между температурой и фактором f_5 при различных типах ПАД (июнь, июль, август 2005–2019 гг.): 1 тип (а); 2 тип (б).

Fig. 9. Spatial distribution of the correlation coefficient between temperature and factor f_5 for various SAL types (June, July, August, 2005–2019): 1 type (a); 2 type (б).

Таким образом, обобщенные характеристики структуры циркуляции нижней тропосферы связаны с географическими особенностями термического состояния подстилающей поверхности. Однако к использованию того или иного фактора ПАД при построении модельных зависимостей следует подходить дифференцированно. Анализ пространственного распределения коэффициента корреляции показал, что влияние приземной температуры воздуха на каждый фактор термической депрессии различается: в зависимости от типа ПАД; по районам Ближнего, Среднего Востока, Восточной части Африканского континента; по величине корреляционной связи.

Заключение

Региональные атмосферные процессы Ближнего и Среднего Востока определяются в летнем периоде главным образом термической депрессией, характеристики которой оказывают влияние на формирование и пространственное распределение многих метеорологических величин. Полученные в исследовании результаты расширяют сведения о сезонном центре действия атмосферы: позволяют получить типовые поля ПАД с учетом особенностей внутренней структуры; выявить особенности метеорологических условий при различных типах ПАД (в различных районах рассматриваемого макрорегиона); выделенные обобщенные характеристики структуры ПАД могут быть использованы при построении прогнозных моделей. Прогнозируя приземную температуру воздуха известными методами, используя полученные оценки зависимостей общих факторов ПАД от температуры, можно с использованием регрессионного анализа прогнозировать эволюцию ПАД.

Список литературы

1. Авиационно-климатическая характеристика Ближнего Востока. М.: Воениздат, 1969. 112 с.
2. Авиационно-климатическая характеристика Среднего Востока. М.: Воениздат, 1977. 110 с.
3. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справочное издание. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
5. Анасова Е.Г. О характеристиках местоположения центров действия атмосферы // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1979. Вып. 58. С. 89-97.
6. Багров Н.А., Орлова И.И. К вопросу определения центра циркуляции атмосферы // Труды ГМЦ. 1978. Вып. 211. С. 3-14.
7. Глызь Г.А. О некоторых характеристиках циркумполярного вихря // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1979. Вып. 58. С. 98-104.
8. 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.
9. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html> (дата обращения: 22.02.2021).

References

1. Aviacionno-klimaticheskaya harakteristika Blizhnego Vostoka. [Aviation-climatic characteristics of the Near East]. Moscow: Voenizdat Publ., 1969, 112 p. [in Russ.].
2. Aviacionno-klimaticheskaya harakteristika Srednego Vostoka. [Aviation-climatic characteristic of the Middle East]. Moscow: Voenizdat Publ., 1977, 110 p. [in Russ.].

3. Ayvazyan S.A., Buhstaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti. [Applied Statistics: Classification and Reduction of Dimension]. Moscow: Finansy i statistika [Finance and statistics] Publ., 1989, 607 p. [in Russ.].

4. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika: Issledovanie zavisimostey. [Applied Statistics: Study of relationships]. Reference edition. Moscow: Finansy i statistika [Finance and statistics] Publ., 1985, 487 p. [in Russ.].

5. Apasova E.G. About the characteristics of the location of atmospheric action centers. *Trudy VNIIGMI-MTSD [Proceedings of RIHMI-WDC]*, 1979, vol. 58, pp. 89-97 [in Russ.].

6. Bagrov N.A., Orlova I.I. On the issue of determining the center of atmospheric circulation. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1978, vol. 211, pp. 3-14 [in Russ.].

7. Glyz' G.A. On some characteristics of circumpolar vortex. *Trudy VNIIGMI-MTSD [Proceedings of RIHMI-WDC]*, 1979, vol. 58, pp. 98-104 [in Russ.].

8. 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, vol. 1, pp. 22-28. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2657 [in Russ.].

9. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. Available at: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep_reanalysis2_pressure.html (accessed: 22.02.2021).

*Поступила 14.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.*

*Submitted 14.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-99-111>

УДК 556.06

Опыт разработки методики долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки

Ю.А. Павроз

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
Sheryl@yandex.ru*

Разработана методика долгосрочного прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки. В ходе выполнения разработки установлено влияние распределений аномалий среднемесячных значений температуры поверхности океанов и геопотенциалов в информативных районах на уровнях H_{100} и H_{500} над Северным полушарием на процесс разрушения ледяного покрова на реках.

Расположение и границы информативных районов в полях H_{100} и H_{500} выявлялись с помощью дискриминантного анализа, а в качестве потенциальных предикторов были использованы коэффициенты разложения полей аномалий среднемесячных значений H_{100} и H_{500} за январь и февраль, а также аномалий среднемесячной температуры воды в энергоактивных зонах Северной Атлантики и северо-западной части Тихого океана по естественным ортогональным функциям.

Применение пошагового регрессионного анализа дало возможность разработать комплексные прогностические уравнения хорошего и удовлетворительного качества ($S/\sigma = 0,45-0,73$) для прогноза сроков вскрытия ото льда рек бассейна р. Вятки. Выявлено наличие существенного влияния полей геопотенциалов на уровнях H_{100} и H_{500} и пространственного распределения аномалий температуры поверхности Северной Атлантики и северо-запада Тихого океана в январе и феврале на сроки вскрытия.

Предлагается в дальнейшем усовершенствовать методику путем установления и учета влияния температуры воздуха в период заблаговременности прогноза, максимальной за зиму толщины льда и других косвенных характеристик на процессы вскрытия рек бассейна р. Вятки ото льда.

Ключевые слова: ледовый режим, долгосрочный прогноз, вскрытие рек ото льда, коэффициенты разложения, поля геопотенциалов, ледовые весенние явления, энергоактивные зоны океанов, комплексное прогностическое уравнение

Experience in developing a method for long-term forecasting of the ice breakup time for the Vyatka River basin

Y.A. Pavroz

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation Moscow, Russia
Sheryl@yandex.ru*

An attempt is made to develop a method for long-term forecasting of the ice breakup time for the Vyatka River basin, to identify the impact of the distribution of sea surface

temperature and geopotential height in the informative regions at the levels H100 and H500 over the Northern Hemisphere on the river ice breakup.

The location and boundaries of the informative regions in the fields of H₁₀₀ and H₅₀₀ were revealed by the discriminant analysis, the EOF expansion coefficients of the fields of anomalies of monthly mean values of H₁₀₀ and H₅₀₀ for January and February and the anomalies of monthly mean sea surface temperature in the North Atlantic and Northwest Pacific were used as potential predictors.

The stepwise regression analysis allowed deriving good and satisfactory ($S/\sigma = 0.45-0.73$) complex prognostic equations for forecasting the ice breakup time for the Vyatka River basin. The essential influence of H₁₀₀ and H₅₀₀ geopotential height fields and the spatial distribution of sea surface temperature anomalies in the North Atlantic and Northwest Pacific in January and February on the river ice breakup time is revealed.

It is proposed to improve the method by considering the impact of air temperature, maximum ice thickness per winter, and other indirect characteristics on the processes of river ice breakup in the Vyatka River basin.

Keywords: ice regime, long-range forecast, river ice breakup, expansion coefficients, geopotential height fields, spring ice phenomena, energy-active zones of the oceans, complex prognostic equation

Введение

Методики долгосрочного прогноза вскрытия рек ото льда, используемые в настоящее время для выпуска оперативных прогнозов, разработаны на основе данных наблюдений до 2001 года. За последние годы в Гидрометцентре России накоплен большой опыт составления долгосрочных прогнозов, в связи с чем возникла идея усовершенствовать методику прогноза применительно к бассейну реки Вятки с использованием более полного архива гидрометеорологических данных (за период с 1977 по 2018 год). Вятка является важной транспортной артерией Кировской области, в связи с чем разработка методики долгосрочного прогноза вскрытия ото льда представляется весьма актуальной.

Разработанная методика позволяет учитывать влияние атмосферных процессов на всем Северном полушарии, что дает наиболее полную характеристику особенностей метеорологических полей для выделения наиболее значимых областей. Другая важная группа предикторов, которая была включена в разработку прогностической методики – это характеристики теплового режима поверхности океанов, где наблюдается наибольшая теплоотдача из океана в атмосферу. С помощью пошагового регрессионного анализа выявляются наиболее значимые из потенциальных предикторов. Применение данной методики позволило улучшить заблаговременность и надежность долгосрочных ледовых прогнозов.

Физико-географические особенности ледового режима рек бассейна Вятки

Река Вятка находится на востоке Европейской территории России, относится к крупнейшим притокам р. Камы и впадает в нее на 1584 км от Южного порта Москвы. Общая протяженность реки 1310 км, площадь

водосбора 129 тыс. км². Вятка имеет большое хозяйственное значение для Кировской области – она удовлетворяет хозяйственно-питьевые, судоходные и промышленные нужды, а также по реке осуществляются местные перевозки пассажиров и грузов (рис. 1).

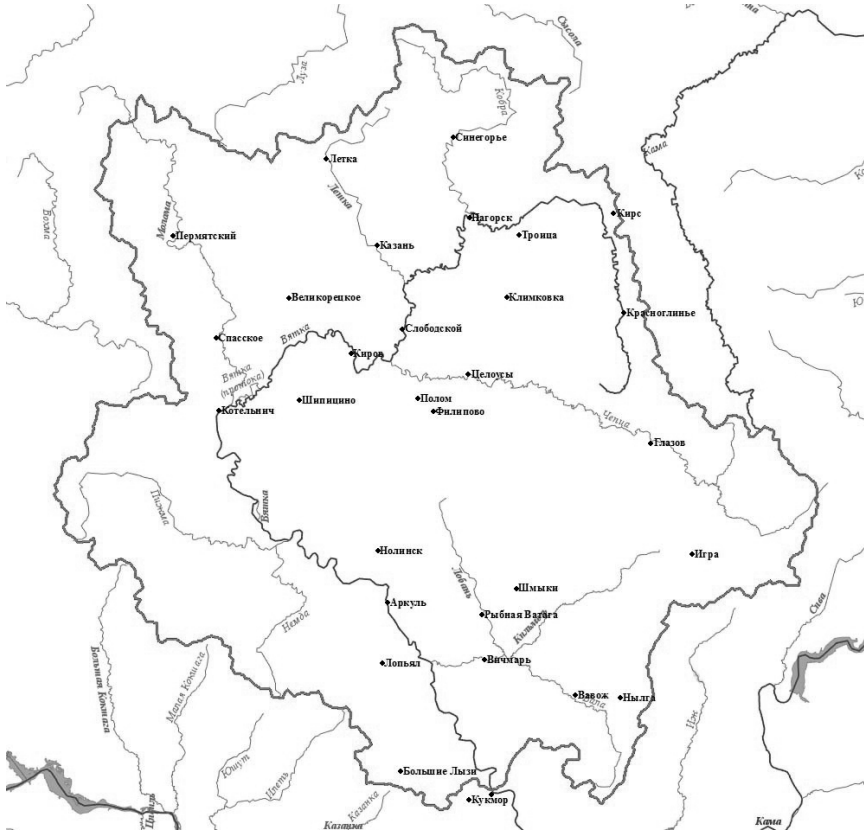


Рис. 1. Гидрографическая сеть бассейна реки Вятки.
Fig. 1. Hydrographic network of the Vyatka River basin.

Климатологические особенности бассейна Вятки определяются его географическим положением, закономерностями атмосферной циркуляции и характером рельефа. Рассматриваемая территория располагается на востоке умеренно-теплой и умеренно-влажной атлантико-континентальной европейской области умеренного климатического пояса. Наряду с этим велико влияние морских воздушных масс, несущих влагу с Атлантического океана, что существенно влияет на сроки перехода температуры воздуха через ноль градусов и, следовательно, на сроки начала ледовых явлений [7]. Образование заберегов, шугохода и ледохода начинается обычно в конце октября, осенний ледоход начинается

в среднем через три дня после появления заберегов и шуги и продолжается в основном не более 10 суток. На большинстве рек ледяной покров устанавливается преимущественно в первой декаде ноября. Продолжительность ледостава изменяется по годам примерно от 130 до 190 суток и в среднем за многолетний период наблюдений составляет около 160 суток, т. е. более 5 месяцев. Средняя многолетняя толщина льда рек бассейна Вятки составляет 53 см [5]. Весной с наступлением положительных температур воздуха начинается таяние и разрушение ледяного покрова.

На территории Вятского бассейна устойчивый переход температуры через 0 °C наблюдается с 5 по 10 апреля. Процессы вскрытия и очищения ото льда начинаются на юге и распространяются на север. Вскрытие рек начинается в южной части 9–10 апреля. Наиболее раннее разрушение льда наблюдается на реках Суна, Нурминка, Нылга, Шошма. Далее вскрытие равномерно переходит в северные части бассейна, и наиболее позднее разрушение льда наблюдается в 20-х числах апреля на реках Летка, Кобра, Молома, в верховье Вятки. Средняя многолетняя норма вскрытия во всем исследуемом регионе 17 апреля, разница вскрытия северной части и южной – 10 дней.

Исходные гидрометеорологические данные

Сведения о сроках начала весенних ледовых явлений у опорных гидрологических постов были выбраны из гидрологических ежегодников за период с 1966 по 2014 год, а в качестве характеристики теплового состояния поверхности океанов рассматривались коэффициенты разложения полей температуры поверхности океана (ТПО) в энергоактивных районах Северной Атлантики и северной части Тихого океана по естественным ортогональным функциям (е.о.ф.).

В настоящее время в Гидрометцентре России создан информативный банк океанологических данных, который включает в себя сведения о среднемесячной температуре воды поверхности океанов Северного полушария в узлах пятиградусной сетки с 1957 года и ежемесячно пополняется за прошедший месяц в начале следующего месяца. В Северной Атлантике энергоактивный район состоит из 48 точек, а в северо-западной части Тихого океана – из 50 точек, выбранных на основе проведенных океанологами Гидрометцентра России исследований [6]. Расположение энергоактивных районов и отобранных информативных точек представлено на рис. 2.

Другая группа гидрометеорологических данных, которая использовалась при разработке методики долгосрочного прогноза сроков вскрытия рек бассейна Вятки, – это характеристики атмосферной циркуляции. В качестве показателей циркуляции и потенциальных предикторов были использованы поля геопотенциала H_{100} и H_{500} на всем протяжении Северного полушария в узлах регулярной сетки. Разложение этих полей

по е.о.ф позволяет сконцентрировать основную информацию по каждому полю в нескольких первых (главных) членах разложения.

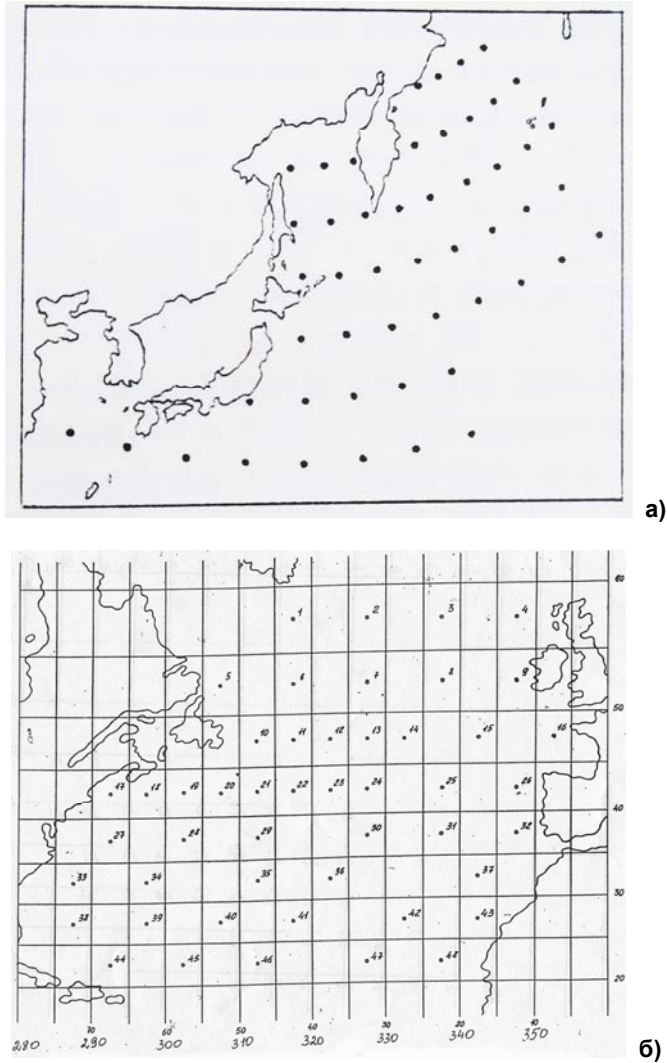


Рис. 2. Схема расположения точек, по наблюдениям которых произведено разложение по естественным составляющим поля аномалии температуры северной части Тихого океана (а) и поверхности Северной Атлантики (б).

Fig. 2. Diagram of the points lactation, according to the observations of which the decomposition of the surface temperature anomaly of the North Pacific Ocean (a) and North Atlantic (б) the was carried out according to the natural components of the field.

На сегодняшний день наиболее полными и объективными данными по полям метеорологических характеристик являются данные реанализа, полученные как на основе наблюдений, так и по результатам моделирования. В данной работе использованы данные реанализа, полученные с помощью модели Integrated Forecasting System (IFS) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) [<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>]. Кроме наземных, авиационных наблюдений, ЕЦСПП в рамках оперативной деятельности по ассимиляции и мониторингу данных регулярно обрабатывает данные, поступающие примерно из 90 спутниковых продуктов. Всего ежедневно обрабатывается и используется в общей сложности порядка 40 миллионов наблюдений, подавляющее большинство из которых – это данные дистанционного (спутникового) зондирования. ЕЦСПП разработал проект ERA-Interim – глобальный атмосферный реанализ с 1979 года. В настоящей работе использовались данные реанализа ERA-Interim, разработанного ЕЦСПП и включающего среднемесячные данные за период с 1979 года из области Северного полушария в пределах от 40 до 85° с. ш. Были использованы данные по полям геопотенциала на уровнях H_{100} и H_{500} с широтно-долготным разрешением сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Данные были получены в формате GRIB (.grb) с последующей обработкой и созданием специализированного электронного архива полей геопотенциалов на уровнях H_{100} и H_{500} с 1957 по 2018 год.

Методика прогноза

Многолетние исследования, проводившиеся в Гидрометцентре России, позволили установить, что влияние распределения аномалий ТПО в энергетических зонах Северной Атлантики и северо-запада Тихого океана на сроки ледовых явлений прослеживается практически на всех замерзающих реках нашей страны. При этом наибольшее влияние ТПО отмечается для рек европейской территории и Западной Сибири. На сроки вскрытия рек ото льда, как правило, оказывает влияние распределение ТПО в январе и феврале, когда наблюдается наибольшая за зимний период теплоотдача из океана в атмосферу, а в апреле влияние океана резко уменьшается. Влияние распределения полей геопотенциала в ноябре, декабре и январе значимо для вскрытия южных рек России, в январе и феврале – для вскрытия рек средней полосы и Урала, для рек севера наблюдается влияние распределения метеорологических полей в марте [3, 4].

Выполненные в рамках обсуждаемой задачи исследования показали, что для обеспечения достаточной заблаговременности прогноз вскрытия рек Вятского бассейна может быть составлен уже в первой декаде марта и может быть основан на учете коэффициентов разложения полей аномалии среднемесячных значений температуры воды за январь и февраль в Северной Атлантике и на северо-западе Тихого океана, а также среднемесячных полей геопотенциала H_{100} и H_{500} за январь и февраль. При этом

требовалось прежде всего установить информативные районы Северного полушария, в пределах которых атмосферные процессы оказывают наибольшее влияние на процесс разрушения ледяного покрова на реках бассейна Вятки.

Для выделения таких районов использовался метод дискриминантного анализа, суть которого заключается в том, что для каждого гидрологического района или участка реки многолетний ряд отклонений от нормы сроков вскрытия (ΔD) разбивается на три класса: 1) раньше нормы ($\Delta D < -0,673\sigma$); 2) норма ($|\Delta D| < 0,673\sigma$); 3) позже нормы ($\Delta D > 0,673\sigma$). По этим классам были разделены и ежегодные значения геопотенциалов в каждом узле координатной сетки на всем Северном полушарии. Далее вычислялись: 1) средние значения величин геопотенциалов в каждой точке, раньше и позже нормы; 2) их разность $d = x_p - x_n$; 3) чтобы исключить влияние дисперсии, для анализа используется отношение d^2/σ^2 . [3] На основе многочисленных экспериментов было установлено, что те узлы можно считать информативными, где $d^2/\sigma^2 \geq 0,6$, а при выявлении наиболее значимых полей таковыми считались поля, охватывавшие не менее 15 информативных узлов. Таким образом в ходе выполненных расчетов с использованием методов дискриминантного анализа были выявлены значимые поля метеовеличин для каждого гидрологического района, в пределах которых атмосферные процессы оказывают наиболее существенное влияние на вскрытие рек бассейна Вятки.

Примечательно, что географическое расположение выявленных информативных районов является неслучайным. Так, в дальнейшем при разработке методики прогноза в прогностические уравнения выявлено:

- наибольшая доля предикторов (35 % из общего числа) относятся к полям геопотенциала, расположенным в зоне Исландского центра действия атмосферы;

- 25 % полей информативных предикторов находятся в зонах Алеутского минимума и крайнего севера Сибири;

- по 20 % полей информативных предикторов находятся на территориях Северного Казахстана и севера Канады, значимость последней была отмечена рядом авторов [2, 3], которые полагали, что потоки холодного воздуха с континента Северной Америки уменьшают в холодную часть года влияние Северной Атлантики (рис. 3).

Приступая к разработке методики прогноза необходимо было выполнить преобразование информации с целью ее сжатия, выделения наиболее информативной ее части и отсеивания случайных возмущений и шумов. В Гидрометцентре России имеется значительный положительный опыт по использованию для этих задач компонентного анализа или разложения полей по е.о.ф. Использование этого метода для гидрометеорологических задач было впервые предложено Н.А. Багровым [1]. Исследования, выполненные Б.М. Гинзбургом [3], показали, что использование метода разложения полей по е.о.ф. применительно к полям сроков вскрытия

ото льда различных рек России позволяет описать эти поля сравнительно небольшим количеством членов разложения: уже первые члены разложения описывают, как правило, более 60 % информации исходного поля, а первые пять – более 90 %. В связи с этим при построении прогностических уравнений вполне достаточно использовать только первые пять членов разложения для восстановления всего поля сроков вскрытия рек ото льда.

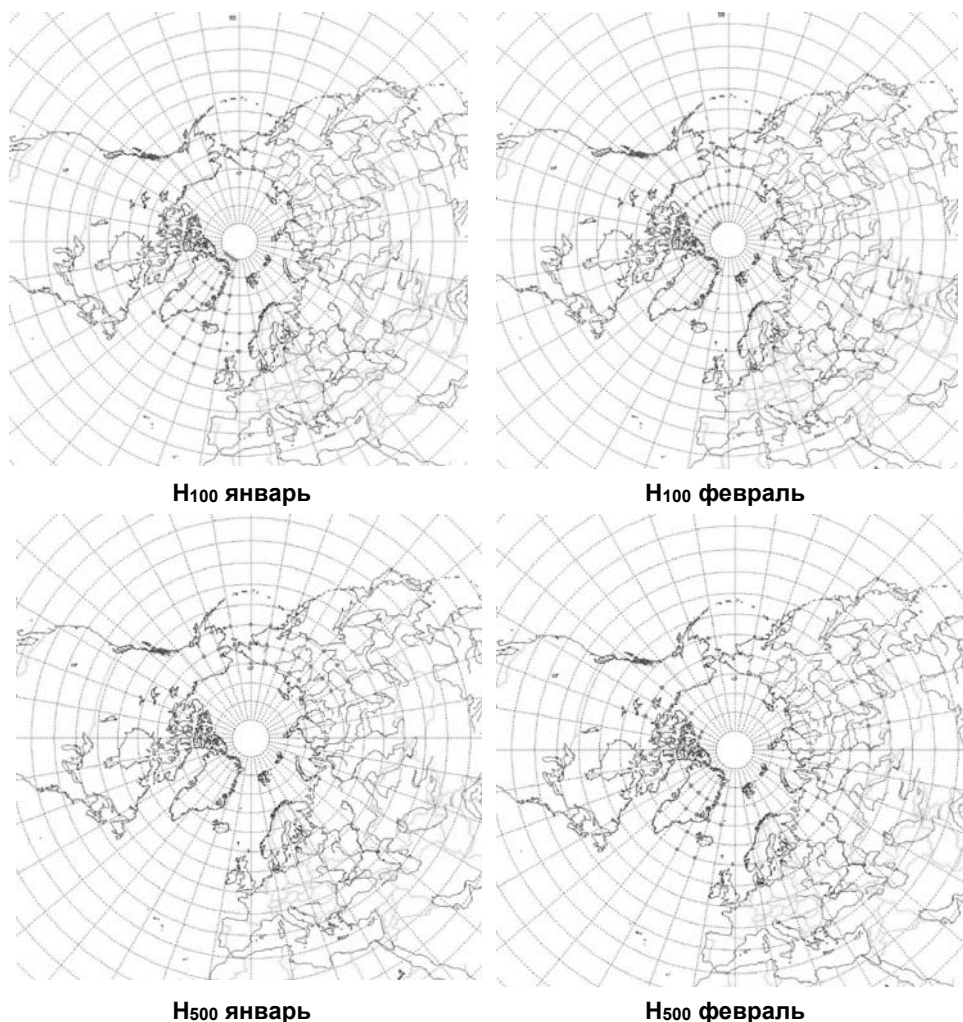


Рис. 3. Схемы расположения значимых районов, в которых произведено разложение метеорологических полей по естественным составляющим.
Fig. 3. Diagrams of the location of significant areas in which the decomposition of meteorological fields according to natural components has been carried out.

[illegible]

Таким образом, каждое выявленное значимое поле подвергалось разложению по е.о.ф. с целью получения коэффициентов разложения, которые использовались в прогностических уравнениях в качестве потенциальных предикторов дат начала весенних ледовых явлений рассматриваемого гидрологического района.

Как было сказано выше, для процессов вскрытия рек важное значение имеет теплообмен атмосферы с поверхностью океана в энергоактивных областях Северной Атлантики и северо-западной части Тихого океана. Вследствие этого вполне целесообразно использовать характеристики атмосферных полей совместно с полями ТПО, чтобы получить комплексные прогностические зависимости с помощью пошагового регрессионного анализа. Суть регрессионного анализа заключается в поиске линии тренда, показывающей взаимосвязь элементов и предсказывающей значение зависимой переменной по новому значению независимой, не участвовавшей в анализе.

Для процедуры пошагового регрессионного анализа по каждому гидрологическому пункту отбирались от 2 до 6 выявленных значимых коэффициентов разложения метеорологических характеристик за январь и февраль и 10 коэффициентов разложения полей Северной Атлантики за январь и февраль. В табл. 1 приводятся коэффициенты разложения,

полученные в ходе регрессионного анализа и вошедшие в прогностические уравнения. Как было предложено в [3], для удобства были введены условные обозначения TB^{I-III}_{1-10} и AB^{I-III}_{1-10} – коэффициенты разложения среднемесячных значений температуры поверхности Тихого (ТВ) или Атлантического (АВ) океанов, где 1–10 – номер коэффициента разложения; III – номер месяца. $H^{I-III}_{100\ 1-10}$, $H^{I-III}_{500\ 1-10}$ – коэффициенты разложения полей H_{100} и H_{500} , 1–10 – номер коэффициента, I–III – номер месяца.

Таблица 1. Коэффициенты разложения полей аномалий ТПО по е.о.ф. и полей геопотенциалов, учитываемые в качестве предикторов сроков вскрытия ото льда на реках

Table 1. Coefficients of decomposition of SST anomaly fields according to natural orthogonal functions and geopotential fields, taken into account as predictors of the timing of opening from ice on rivers

Пункт	Площадь водосбора, км ²	Зависимый ряд	Предикторы, вошедшие в уравнение
Аркуль	96900	1984–2014	$H^I_{100\ 1}$, $H^I_{500\ 1}$, $H^{II}_{500\ 4}$, AB^I_7 , AB^{II}_4 , AB^{II}_6
Котельнич	72000	1980–2009	$H^I_{500\ 1}$, $H^{II}_{500\ 1}$, $H^{II}_{500\ 3}$, AB^I_1
Вятские Поляны	124000	1987–2010	$H^I_{100\ 1}$, $H^I_{100\ 2}$, $H^{II}_{100\ 1}$, $H^{II}_{500\ 4}$, AB^{II}_4 , AB^{II}_5
Киров	48300	1987–2010	$H^I_{100\ 1}$, $H^{II}_{500\ 1}$, AB^I_7 , AB^{II}_6
Кирс	4040	1984–2014	$H^I_{100\ 1}$, $H^I_{500\ 1}$, $H^{II}_{500\ 2}$
Великорецкое	3410	1980–2009	$H^I_{100\ 1}$, $H^{II}_{100\ 1}$, $H^{II}_{100\ 3}$, AB^I_2 , AB^{II}_9
Нагорск	16500	1983–2013	$H^I_{100\ 1}$, $H^I_{500\ 1}$, TB^{II}_5 , TB^{II}_6
Троица	1480	1980–2019	$H^{II}_{100\ 1}$, $H^I_{500\ 1}$, AB^I_3
Пермятский	6070	1980–2009	$H^I_{500\ 1}$, $H^I_{500\ 2}$, AB^I_2 , TB^{II}_5 , TB^{II}_7
Синегорье	45010	1980–2009	$H^I_{100\ 2}$, $H^I_{500\ 1}$, $H^I_{500\ 3}$, AB^I_3 , TB^{II}_9 , TB^{II}_{10}
Целоусы	18900	1984–2010	$H^I_{100\ 3}$, $H^{II}_{100\ 1}$, $H^{II}_{500\ 1}$, TB^I_6 , AB^I_8

Конечным результатом всего пошагового регрессионного анализа явились комплексные прогностические регрессионные уравнения для каждого гидрологического пункта Вятского бассейна, допустимая ошибка определялась как $\delta = 0,673\sigma$.

Каждое полученное уравнение содержит предикторы, которые характеризуют распределение аномалий температуры океанов и состояние атмосферных процессов в предшествующий период. В каждое комплексное уравнение вошло от 3 до 6 предикторов, которые были проверены на материалах независимого ряда (табл. 2).

Таблица 2. Комплексные прогностические уравнения для составления прогнозов сроков вскрытия рек бассейна Вятки
Table 2. Complex prognostic equations for forecasting the timing of the opening of the rivers of the Vyatka basin

Река	Пункт (площадь водосбора, км ²)	Прогностическое уравнение	s/σ	Дата выпуска прогноза	Забла- говремен- ность, дни	
					Min	Max
Вятка	Аркуль (96900)	$16,61 - 0,03 H_{500\ 1}^I + 0,93 AB_{4\ 4}^{II} -$ $- 0,49 H_{500\ 4}^{II} - 3,43 AB_{6\ 6}^{II} +$ $+ 3,22 AB_{7\ 7}^I - 0,4 H_{100\ 1}^I$	0,73	28.02	35	64
	Котельнич (72000)	$18,08 - 0,1 H_{500\ 1}^I + 0,32 H_{500\ 3}^{II} -$ $- 0,13 H_{500\ 1}^{II} + AB_{1\ 1}^I$	0,68	28.02	35	67
	Вятские Поляны (124000)	$14,11 + 2,63 H_{100\ 1}^I + 2,3 AB_{4\ 4}^{II} +$ $+ 1,24 H_{100\ 1}^{II} + 0,12 H_{500\ 4}^{II} +$ $+ 2,75 H_{100\ 2}^I + 2,23 AB_{5\ 5}^{II}$	0,54	28.02	34	60
	Киров (48300)	$15,27 - 0,57 H_{100\ 1}^I + 0,11 H_{500\ 1}^{II}$ $+ 3,89 AB_{7\ 7}^I - 3,89 AB_{6\ 6}^{II}$	0,57	28.02	34	63
	Кирс (4040)	$21,45 - 0,28 H_{100\ 1}^I - 0,17 H_{500\ 2}^{II}$ $- 0,06 H_{500\ 1}^{II}$	0,71	28.02	35	67
	Нагорск (16500)	$21,92 - 5,34 TB_{6\ 6}^{II} - 0,22 H_{100\ 1}^I -$ $- 0,09 H_{500\ 1}^{II} - 3,28 TB_{5\ 5}^{II}$	0,58	28.02	36	67
Великая	Великоречное (3410)	$20,76 + 1,79 H_{100\ 1}^I - 1,71 H_{100\ 1}^{II}$ $+ 5,03 AB_{9\ 9}^{II} - 2,21 H_{100\ 3}^{II} +$ $+ 0,93 AB_{2\ 2}^I$	0,57	28.02	32	63
Черная Холуница	Троица (1480)	$22,57 - 0,08 H_{500\ 1}^I - 2,45 AB_{3\ 3}^I -$ $- 0,3 H_{100\ 1}^{II}$	0,71	28.02	36	67
Молома	Пермятский (6070)	$25,65 + 2,75 AB_{2\ 2}^I - 8,02 TB_{5\ 5}^{II} -$ $- 0,08 H_{500\ 1}^I + 3,94 TB_{7\ 7}^{II} +$ $+ 0,14 H_{500\ 2}^I$	0,49	28.02	35	66
Кобра	Синегорье (45010)	$26,19 - 0,15 H_{500\ 1}^I - 1,72 AB_{3\ 3}^I -$ $- 6,05 TB_{9\ 9}^{II} - 0,40 H_{500\ 3}^I +$ $+ 4,27 TB_{10\ 10}^{II} + 0,76 H_{100\ 2}^I$	0,53	28.02	37	68
Чепца	Целоусы (18900)	$18,40 - 0,12 H_{500\ 1}^{II} -$ $- 4,13 H_{100\ 3}^I + 0,12 H_{500\ 1}^{II} -$ $- 0,28 H_{100\ 1}^I - 2,91 AB_{8\ 8}^I +$ $+ 2,57 TB_{6\ 6}^{II}$	0,45	28.02	37	66

Рассматривая полученные уравнения, можно сказать, что предикторы ТПО составляют 43 %, а предикторы геопотенциалов – 57 %, т. е. представлены практически поровну. Также следует отметить, что из числа предикторов, которые отражают атмосферные процессы в предшествующий период, геопотенциал H_{100}^{I-II} в прогностических зависимостях участвует в 35 %, H_{500}^{I-II} – в 65 %, причем предикторов за январь наблюдается несколько больше.

Средняя оправдываемость по проверочным прогнозам составила 73 %, однако, как отмечает ряд авторов, около 25 % долгосрочных

прогнозов оказываются неудовлетворительными, поэтому рекомендуется разработка среднесрочных и краткосрочных прогнозов с использованием декадной температуры воздуха для уточнения прогноза и возможности избежать ущерба от его ошибки.

Заключение

В данной работе была проведена попытка составления долгосрочного прогноза сроков наступления весенних ледовых явлений на реках бассейна реки Вятки. В результате проведенных исследований был создан архив данных геопотенциалов H_{100} и H_{500} с 1952 по 2018 год по всем месяцам области Северного полушария от 40° до 85° в виде электронных таблиц из данных реанализа ERA 40 и ERA Interim модели Integrated Forecast Model Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП). Кроме того, создан архив аномалий температуры поверхности Северной Атлантики и северо-запада Тихого океана и сформированы электронные архивы данных по срокам наступления исследуемых характеристик гидрологического режима рек, выполнен анализ однородности полученных рядов.

Сравнение прогноза с фактическими данными шло на зависимом ряду и проверено на независимом. Результаты прогнозов, как видно из табл. 2, показали на момент разработки методики хорошее качество прогностических уравнений ($S/\sigma = 0,45\text{--}0,73$) при условии $S/\sigma \leq 0,75$, которое было признано удовлетворительным. При выпуске прогноза с 28 февраля по 3 марта средняя заблаговременность составляет от 35 до 65 суток, а максимальная – от 37 до 68 суток. Оправдываемость долгосрочных прогнозов достаточно высокая при заблаговременности от 1 до 2 месяцев, следовательно, все разработанные прогностические уравнения по показателям качества получились удовлетворительными и соответствуют требованиям Наставления по службе прогнозов. Это позволяет использовать разработанное прогностическое уравнение в оперативной практике.

Таким образом, можно утверждать наличие существенного влияния пространственного распределения температуры поверхности воды Северной Атлантики, северо-запада Тихого океана и полей геопотенциала на уровнях H_{100} и H_{500} в январе и феврале на весь процесс вскрытия рек Вятского бассейна.

В данном прогнозе есть возможность уточнения с достаточной заблаговременностью путем добавления в прогностические модели данных по температуре воздуха, толщине льда и других косвенных характеристик за первую декаду марта, которые потенциально могут влиять на наступление весенних ледовых явлений.

Наметившиеся в ходе работы новые возможности заслуживают дальнейшего изучения. Поэтому необходимо произвести увеличение зависимых рядов и включение в предикторы различных косвенных характеристик, например температуры воздуха за третью декаду февраля и максимальной толщины льда за зимний период для повышения точности прогноза и гибкости прогностической модели.

Список литературы

1. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. 1959. Вып. 74. С. 3-18.
2. Борщ С.В., Гинзбург Б.М., Ефремова Н.Д. Долгосрочный фоновый прогноз сроков вскрытия рек европейской территории СНГ // Метеорология и гидрология. 2001. № 7. С. 101-110.
3. Гинзбург Б.М. Влияние температуры поверхности океанов на сроки замерзания и вскрытия рек. Методы его учета в прогнозах. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 99 с.
4. Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И. Влияние пространственного распределения температуры поверхности океанов на сроки замерзания и вскрытия рек азиатской территории России // Метеорология и гидрология. 2004. № 1. С. 89-95.
5. Калинин В.Г. Ледовый режим рек и водохранилищ бассейна Верхней и Средней Камы. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2008. 252 с.
6. Лаппо С.С., Гулев С.К., Рождественский А.Е. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан-атмосфера и энергоактивные области мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 336 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 11. Средний Урал и Приуралье. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 848 с.

References

1. Bagrov N.A. Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteorologicheskikh poley posredstvom estestvennykh ortogonal'nykh sostavlyayushchih. *Trudy TSIP*, 1959, vol. 74, pp. 3-18 [in Russ.].
2. Borshch S.V., Ginzburg B.M., Efremova N.D. Long-Term Background Forecast of Ice Breakup Dates in European CIS Territory. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2001, no. 7, pp. 101-110 [in Russ.].
3. Ginzburg B.M. Vliyanie temperatury poverhnosti okeanov na sroki zamerzaniya i vskrytiya rek. Metody ego ucheta v prognozah. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2005, 99 p. [in Russ.].
4. Ginzburg B.M., Silnitskaya M.I. Effect of the Sea Surface Temperature Distribution on Freeze-up and Breakup Dates on Rivers on the Asian Territory of Russia. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2004, no. 1, pp. 89-95 [in Russ.].
5. Kalinin V.G. Ledovyy rezhim rek i vodohranilishch basseyna Verhney i Sredney Kamy. Perm: Perm. gos. un-t Publ., 2008, 252 p. [in Russ.].
6. Lappo S.S., Gulev S.K., Rozhdestvenskiy A.E. Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodeystvie v sisteme okean-atmosfera i energoaktivnye oblasti mirovogo okeana. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990, 336 p. [in Russ.].
7. Resursy poverhnostnykh vod SSSR. Tom 11 Sredniy Ural i Priural'e. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1973, 848 p. [in Russ.].

Поступила 14.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 14.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-112-133>

УДК 502.3/7(614.7)

Влияние первой волны пандемии COVID-19 на экосистему Европы

В.В. Кривошеев, А.И. Столяров

*Автономное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Технопарк высоких технологий», г. Ханты-Мансийск, Россия
tp@tp86.ru*

Приведены результаты аналитических исследований, свидетельствующих о том, что ограничительные мероприятия, проведенные с целью снижения скорости распространения SARS-CoV-2 и масштабов пандемии COVID-19 на территории Западной Европы и Российской Федерации, привели к существенному снижению антропогенной нагрузки на окружающую природную среду и значительному улучшению экологической обстановки по основным типам загрязнителей. Одновременно с этим установлен существенный рост содержания озона в тропосфере в период блокировки практически по всем изученным территориям. Показано, что после прекращения ограничительных мероприятий, уже к сентябрю – в Западной Европе и к октябрю – на Европейской территории России, уровень загрязнения атмосферного воздуха стал соответствовать первоначальному. Полученные результаты свидетельствуют о том, что плохое качество воздуха отягчает последствия COVID-19, причем значительную роль в этом играет концентрация мелкодисперсных твердых частиц $PM_{2.5}$, которые могут глубоко проникать в легкие человека и обострять течение респираторных заболеваний.

Ключевые слова: COVID-19, экология, состояние тропосферы, спутниковая информация, уровень смертности населения и качество воздуха

The influence of the Covid-19 first wave on the European ecosystem

V.V. Krivosheev, A.I. Stoliarov

*Autonomous Institution of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra
«High Technology Parc», Khanty-Mansiysk, Russia
tp@tp86.ru*

The results of analytical studies are presented, which show that restrictive measures for reduction of SARS-CoV-2 propagation speed and the incidence of the COVID-19 pandemic on the territory of Western Europe and the Russian Federation have led to a significant reduction of anthropogenic load on the natural environment and a considerable improvement of environmental conditions for the main types of contaminants. At the same time there is a dramatic growth of total ozone in the troposphere during the period of restrictions almost for all studied territories. It is revealed that after finishing the restrictive measures the level of air contamination reached its initial point: by September in Western Europe and by October in the European part of Russia. The calculations demonstrated that poor air quality aggravates the consequences of COVID-19, and a significant

contribution is made by the PM2.5 concentration of fine solid particles, which can penetrate deeper into the human lungs and exacerbate the course of respiratory diseases.

Keywords: COVID-19, ecology, tropospheric conditions, satellite information, morbidity level and air quality

Введение. Человек и природа

Во второй половине XX столетия в сфере проблем современного естествознания активно обсуждалась вызвавшая много споров теория Геи, названная по имени богини древнегреческой мифологии, олицетворяющей Землю, сформулированная британским климатологом Джеймсом Лавлоком. Согласно этой теории, Земля является динамической многокомпонентной системой, включающей в себя биосферу, неким единым глобальным организмом, который, путём взаимного влияния его живых и неживых составляющих, сам себя регулирует и поддерживает необходимые условия для существования человека и внешней среды. Эта теория (или гипотеза), на наш взгляд, является поздним отголоском философских взглядов Владимира Ивановича Вернадского на роль человека как новой геологической силы в преобразовании биосферы в ноосферу – сферу разума.

В своих работах по проблеме взаимопроникновения и взаимовлияния человека и внешней среды (живого и косного), большая часть которых была опубликована через несколько десятилетий после его смерти, Владимир Иванович писал *«Реально это единство человека, его отличие от всего живого, новая форма власти живого организма над биосферой, большая его независимость, чем всех других организмов, от ее условий являются основным фактором, который в конце концов выявился в геологическом эволюционном процессе создания ноосферы. <...> В течение долгих поколений единство человеческих обществ, их общение и их власть – стремление к проявлению власти над окружающей природой – проявлялись случайно, прежде чем они выявились и были осознаны идеологически. В эру человека, или психозойскую, мы в действительности имеем картину более резкую, чем те, которые связаны с критическими периодами земной коры. Мы видим сейчас резкое изменение всей фауны и всей флоры, уничтожение огромного числа видов и создание новых культурных рас. Наряду с этим, связанным с земледелием, созданием нового облика планеты, несомненно вне воли и понимания человека, совершается изменение диких видов организмов, приспособляющихся к новым условиям жизни в измененной культурой биосфере. Но, сверх того, один вид организмов – *Homo sapiens faber* – охватил всю планету и занял в ней господствующее среди живого положение. Этого никогда не бывало»* [2].

На Всемирном экономическом форуме в Давосе 25 января 2021 года Генеральный секретарь Организации объединенных наций Антониу Гутерриш, говоря о причинах возникновения пандемии коронавируса,

заявил, что человечество ведет войну с природой и разрушает собственную систему жизнеобеспечения, а природа наносит человечеству ответный удар [30].

Alessio Facciola et al. (University of Messina, Italy), рассуждая о последствиях глобального изменения окружающей среды, обсуждает весьма популярную нынче гипотезу о том, что участвовавшие в последнее время эпидемии, в том числе пандемия COVID-19, являются естественной реакцией природы на антропогенную деятельность, неким ответным «сигналом, посланным Геей людям, чтобы они переосмыслили наши отношения с окружающей средой и наше злонамеренное управление живыми ресурсами» [10]. Roberto Cazzolla Gatti (Konrad Lorenz Institute for Evolution and Cognition Research, Austria; **Tomsk State University, Russia**) пишет «*Наши массивные выбросы углерода, хранящегося в земле в течение миллионов лет, наша глубокая деградация лесных и морских экосистем, которая угрожает их целостности и устойчивости, наша растущая урбанизация и загрязнение, которое засоряет даже самые отдаленные районы планеты, и наше давление на другие виды, которое ведет биоразнообразие мира к шестому массовому вымиранию, не может сделать ничего другого, кроме как нанести вред глобальной экосистеме и вызвать опасные обратные реакции природы*» [26].

Последствия пандемии COVID-19

На момент подготовки статьи пандемия COVID-19 унесла более 4,5 миллионов человеческих жизней. Цивилизация и современное общество не видели такой разрушительной глобальной чрезвычайной ситуации и экономического спада со времен Второй мировой войны.

Наряду с невосполнимыми моральными потерями, общество несет совершенно прагматические, измеряемые в числах экономические потери, которые уже сегодня достигают триллионов долларов. К концу 2021 года, по прогнозам Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), суммарный ущерб для мировой экономики от пандемии коронавируса достигнет семи триллионов долларов, что сопоставимо с совокупным годовым бюджетом США и Китая [31].

Однако ущерб, который наносит пандемия COVID-19, этим не исчерпывается. Saeida Saadat et al. (Gujarat Forensic Sciences University, India), Diana Brahams (UK) обращают внимание на то, что распространение SARS-CoV-2 в качестве меры предосторожности заставило людей носить маски, ежедневно пользоваться перчатками и дезинфицирующими средствами, что привело к образованию огромного количества медицинских отходов. Миллионы людей были изолированы, чтобы уменьшить передачу вируса. Пандемия изменила образ жизни и поставила под угрозу жизнеобеспечение сотен миллионов людей, поскольку многие предприятия закрываются, чтобы приостановить распространение вируса, что приводит к огромному сокращению рабочих мест [15, 28].

Тем не менее, как бы это ни выглядело неуместным, нельзя закрывать глаза и на положительные последствия пандемии, которые имеют место быть. Положительные последствия пандемии COVID-19 совершенно отчетливо просматриваются и в экономической, и в экологической сферах.

Известный российский экономист С.Ю. Глазьев (РАН) утверждает, что пандемический кризис помог укрепиться новому технологическому укладу, ядром которого являются информационно-коммуникационные технологии, также он оказал огромное стимулирующее действие на биоинженерные компании. А биоинженерия – это еще один ключевой элемент ядра нового технологического уклада. Комплекс производств ядра нового технологического уклада по-прежнему растет с темпом 25–30 % в год, и кризис только усилил эти структурные изменения, на фоне свертывания устаревших производств в обрабатывающей промышленности и в сырьевом комплексе [3]. Это подтверждается в работе В.В. Печаткина и Т.А. Малышева (Институт социально-экономических исследований – ОСП ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН) [6]. В статье приводится информация о том, что, в частности, в 5,3 раза (до \$123,3 млрд) выросли акции компании Moderna, разработавшей вакцину против коронавируса; акции Zoom Video Communications выросли в 2020 г. в 4,5 раза, поскольку самоизоляция и карантин вызвали рост спроса на программное обеспечение компании; вследствие развития дистанционной работы и учебы акции компании Etsy – электронной торговой площадки выросли почти в 3,3 раза и т. д.

Ashwani Kumar et al. (Dr. Harisingh Gour University, India), анализируя проблемы, обостренные пандемией COVID-19 в условиях глобальных кризисов – дестабилизации климата, демографического взрыва, растущего уровня неравенства между людьми, экономической неопределенности, растущей угрозы общественному здоровью, – говорят о том, что *«Природа, похоже, нажала кнопку сброса, восстанавливая пространство, чтобы исцелить себя за счет замедления антропогенной деятельности. Но, среди мрака и обреченности COVID-19, кажется, есть пресловутая «серебряная подкладка» и некоторые положительные последствия»* [11].

«Серебряная подкладка», в данном случае, выражается в том, что ограничение антропогенной деятельности, осуществляемое властными органами различного уровня с целью снижения скорости и масштабов распространения пандемии COVID-19, сопровождается улучшением экологического состояния окружающей среды.

К сожалению, в литературе весьма скупо изложена информация об изменении состояния атмосферного воздуха, связанном со снижением антропогенной нагрузки во время пандемии COVID-19, на территории Западной Европы, а имеющаяся информация не систематизирована и зачастую противоречива. Исследования по этой проблеме для территории Восточной Европы, а тем более для территории Российской Федерации, практически отсутствуют вообще. Кроме всего прочего следует обратить

внимание на то, что о влиянии ограничительных мероприятий во время пандемии на состояние окружающей среды, а также о влиянии качества атмосферного воздуха на уровень заболеваемости и смертности населения в связи с COVID-19 нам не удалось найти ни одной печатной работы отечественных авторов, опубликованной в российских рецензируемых журналах или в серьезных зарубежных журналах с устойчивой международной репутацией.

В связи с этим нами были проведены аналитические и статистические исследования с целью систематизации информации по проблеме снижения нагрузки на окружающую среду на территории Европы, включая европейскую часть Российской Федерации.

Методы

При подготовке обзора проблемы снижения нагрузки на экосистему во время ограничительных мероприятий, направленных на снижение негативных последствий пандемии COVID-19, было изучено более 500 статей, опубликованных в ведущих зарубежных журналах, таких как *Science of The Total Environment*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *Environmental Research* и др., включенных в международную базу данных «Scopus». Космические снимки состояния атмосферного воздуха получены из открытых источников, находящихся на сайтах National Aeronautics and Space Administration (NASA) и European Space Agency (ESA).

Фактические данные о динамике заболеваемости и смертности населения получены с сайта «Статистика развития пандемии коронавируса Covid-19 в России» (<https://coronavirus-monitor.info/country/russia/>).

Информация о загрязненности атмосферы получена с сайта «Индекс качества воздуха» (<https://www.iqair.com/russia/moscow>). AQI, или индекс качества воздуха, — это интегрированный показатель, имеющий довольно сложную методику вычисления, которая учитывает до шести основных загрязнителей (содержание тонкодисперсных частиц размером менее 2,5 мкм $PM_{2,5}$, менее 10 мкм PM_{10} , окись углерода CO, диоксид серы SO_2 , диоксид азота NO_2 и озон O_3) на уровне земли. Американская компания AirVisual, на данных которой базируются наши исследования, использует Национальные стандарты качества атмосферного воздуха EPA США для расчета AQI.

Влияние блокировки на экосистему Западной Европы

Рассмотрим некоторые работы, посвященные влиянию блокировки на состояние окружающей природной среды на территории Западной Европы. Большая часть этих публикаций связана с экологической ситуацией в Италии и Испании, что не вызывает удивления, поскольку население этих стран первыми в Европе столкнулись с пандемией COVID-19, причем на севере Италии, в Ломбардии, во время первой волны пандемии

наблюдался самый высокий из зарегистрированных процент смертности населения, зараженного SARS-CoV-2.

Maria Cristina Collivignarelli et al. (University of Pavia, Italy) изучили закономерности влияния блокировки на качество воздуха в Милане. 8 марта 2020 года, когда в Ломбардии количество заражений составило 5963 случаев, правительство приняло жесткие меры сдерживания в значительной части Северной Италии, объявив частичную блокировку (PL) и запретив все передвижения, если они не необходимы для достижения рабочего места или не связаны с основными потребностями. 23 марта 2020 года была введена полная блокировка (TL), и только заводы, относящиеся к основным цепочкам поставок (продуктов питания, фармацевтических препаратов и т. д.), имели право продолжать работать. В результате жестких мер после PL и последующего TL было зарегистрировано значительное снижение концентрации загрязняющих веществ (PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC, benzene, CO, NO_x). Блокировка привела к заметному падению SO_2 только в городе Милан, в то время как в прилегающих районах он остался неизменным [23].

Hervé Petetin et al. (Barcelona Supercomputing Center, Spain) установили, что введение ограничительных мероприятий в Испании с 14 марта до 23 апреля 2020 года привело к снижению уровня NO_2 в среднем на 50 % по всем провинциям. Блокировка в Испании проходила так же, как и в других странах, в несколько этапов с различным уровнем ограничений. Совершенно естественно, что положительная динамика NO_2 была более заметна в периоды более строгих фаз – №2 (наиболее строгой) и №3, чем во время фазы №1 [19]. Aurelio Tobías et al. (Institute of Environmental Assessment and Water Research, Spain) приводят информацию о том, что после двух недель изоляции загрязнение воздуха в Барселоне заметно снизилось. Наиболее значительное снижение было отмечено по NO_2 (от 45 до 51 %), главным образом связанного с выбросами транспортных средств. Более низкое снижение наблюдалось для мелкодисперсных твердых частиц PM_{10} (от 28 до 31 %) [12]. Akash Biswal et al. (Panjab University, India), José M. Baldasano (Technical University of Catalonia (UPC), Spain) сообщили о снижении за период блокировки поверхностных концентраций NO_2 в Мадриде и Барселоне на 62 и 50 % соответственно [8, 20]. В Сарагосе средняя концентрация $PM_{2.5}$ в период с декабря 2019 до марта 2020 года составляла около $29,38 \text{ мкг/м}^3$, а в марте произошел значительный спад (58 %). В Риме средняя концентрация $PM_{2.5}$ с декабря 2019 до марта 2020 года составляла $35,0 \text{ мкг/м}^3$, а в марте 2020 года она стала на 24 % ниже по сравнению с февралем и на 159 % по сравнению с январем 2020 года [9].

Ученые Королевского института метеорологии Нидерландов (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI) опубликовали результаты мониторинга загрязнения воздуха над Европой весной 2020 г., используя данные прибора TROPOMI со спутника Copernicus Sentinel-5P, полученные в рамках программы Европейского союза Copernicus (рис. 1).

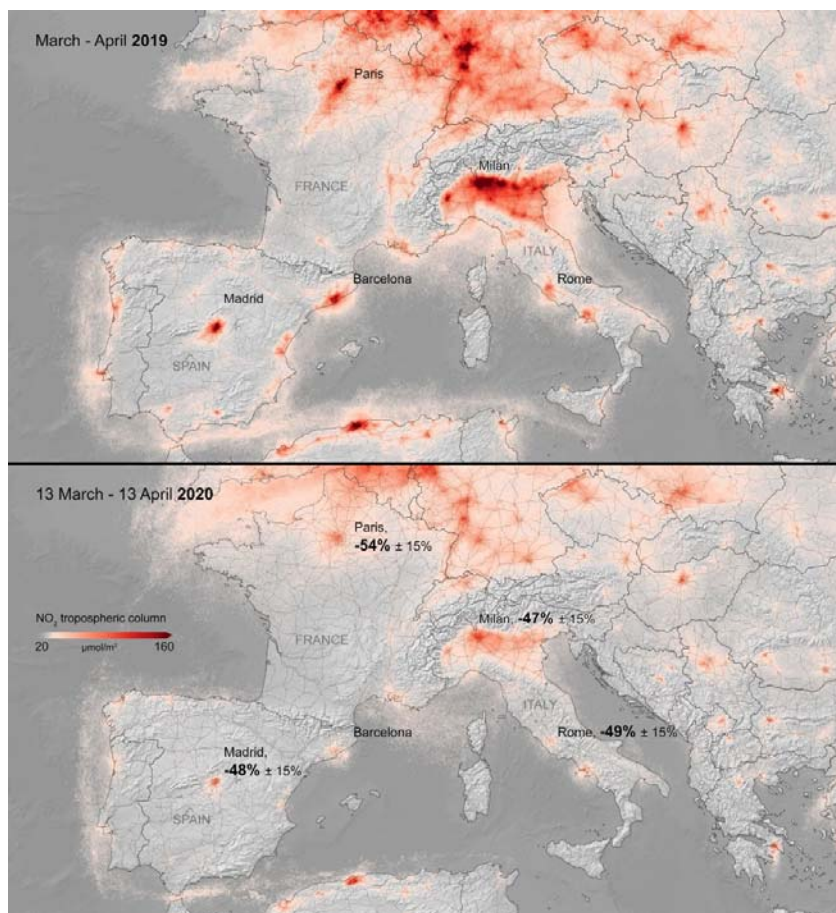


Рис. 1. Концентрация диоксида азота в Европе в марте-апреле 2019 г. (вверху) и 13 марта – 13 апреля 2020 г. (внизу). Фото с сайта: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_remains_low_as_Europeans_stay_at_home.

Fig. 1. Concentration of nitrogen dioxide in Europe in March-April of 2019 (above), and March, 13 – April, 13 of 2020 (below). Photo from website: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_remains_low_as_Europeans_stay_at_home.

Концентрация диоксида азота связана не только с количеством выбросов, но в значительной мере регламентируется погодными условиями и находится в состоянии непрерывного трансформирования. Поэтому делать выводы на основе наблюдений за одни сутки невозможно, но объединение данных за более протяженный период времени (не менее 10 суток) позволяет в значительной мере исключить метеорологическую изменчивость и увидеть реальную динамику показателей, связанных с антропогенной деятельностью.

Приведенные на рис. 1 изображения показывают существенные снижения концентрации диоксида азота в период строгих карантинных мер, применяемых в Западной Европе с 13 марта по 13 апреля 2020 года по сравнению с усредненными концентрациями в марте–апреле 2019 года. В Мадриде, Милане и Риме наблюдалось снижение на 47–49 %, а в Париже чуть более заметное снижение (на 54 %), что говорит о значительном влиянии ограничительных мероприятий на состояние экосистемы.

Для справки: Copernicus Sentinels (Стражи Коперника) – это флот специализированных спутников, принадлежащих ЕС, предназначенных для регистрации данных и изображения информации экологической программы Европейского союза Copernicus [32]. TROPOMI (аббревиатура от Tropospheric Monitoring Instrument) – это прибор на борту Sentinel-5P – спектрометр в ультрафиолетовом, видимом для человека и инфракрасном свете (<https://deru.abcdef.wiki/wiki/Sentinel-5P>).

Диоксид азота NO₂

Одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха является диоксид азота NO₂. Естественными источниками NO₂ являются лесные пожары и грозы, микробиологические реакции в почве, но главным поставщиком этого поллютанта является антропогенная деятельность – сжигание топлива автомобилями и промышленными установками.

Ионов Д.В. и др. (Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока) пишут о том, что до 60 % выбросов NO₂ в тропосферу обусловлено сжиганием топлива автомобилями и промышленными установками [4], при этом доля автотранспорта составляет около 70 % суммарной антропогенной эмиссии NO_x [5]. Ситнов А.И. (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН) склоняется к мысли, что не менее 50 % содержания NO₂ в тропосфере определяется сжиганием топлива, т. е. имеет антропогенное происхождение [7].

NO₂ оказывает существенное отрицательное влияние на здоровье человека и состояние природной экосистемы. Так, у людей, подвергшихся воздействию высоких концентраций NO₂, понижается иммунитет и устойчивость к инфекциям дыхательных путей (высокий риск катара верхних дыхательных путей, бронхита, воспаления легких). Эпидемиологические исследования позволили получить доказательства того, что длительное воздействие NO₂ может вызывать снижение легочной функции и повышение риска возникновения симптомов респираторных заболеваний [1]. Наличие окислов азота в тропосфере является одной из причин кислотных дождей, приводящих к деградации экосистем водоемов и лесов. В урбанизированных регионах высокие содержания NO₂ в пограничном слое атмосферы способствуют дополнительному радиационному нагреву тропосферного воздуха [7].

Бручковский И.И., Красовский А.Н. (Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Беларусь)

приводят информацию о том, что химические преобразования NO_2 в верхней атмосфере являются важным фактором динамики атмосферы и процессов переноса энергии. NO_2 имеет хорошо выраженные полосы поглощения с сечением порядка $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в области 390–470 нм, что при наличии даже незначительных содержаний позволяет уверенно восстанавливать NO_2 методом DOAS (универсальный метод измерения концентраций атмосферных следовых газов, использующий характерные особенности поглощения молекул газа вдоль пути известной длины в открытой атмосфере) [1]. В свою очередь, Ионов Д.В. и Тимофеев Ю.М. отмечают настолько высокий антропогенный вклад NO_2 в суммарное загрязнение атмосферы, что он становится заметен в данных наблюдений спутниковых систем глобального мониторинга. **Это обстоятельство позволяет использовать результаты спутниковых измерений содержания NO_2 в качестве индикатора антропогенного загрязнения** [4].

Влияние блокировки на экосистему Европейской территории России

Ограничительные меры для снижения скорости распространения и масштабов заражения SARS-CoV-2 в России фактически стартовали с начала марта 2020 года, и эпицентром развития событий стала Москва. 05.03.2020 г. мэром Москвы был издан указ №12-УМ «О введении мер повышенной готовности», которым было временно приостановлено (читай – запрещено) с 21 марта по 31 мая 2020 г. посещение обучающимися образовательных организаций, предоставляющих общее, дополнительное образование, осуществляющих спортивную подготовку, а также профессиональных образовательных организаций среднего профессионального образования. С 28 марта по 31 мая 2020 г. временно приостановлена работа ресторанов, кафе, столовых, буфетов, баров, закусочных и иных предприятий общественного питания, запрещено до 31 мая 2020 г. проведение на территории города Москвы спортивных, зрелищных, публичных и иных массовых мероприятий (<https://base.garant.ru/73711482/>).

На рис. 2 приведена динамика тропосферного содержания NO_2 над Европейской территорией России.

В феврале 2020 г. (рис. 2а) наибольший уровень тропосферного содержания двуоксида азота наблюдался над Московской областью и Санкт-Петербургом – на уровне $8\text{--}9 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$. Над остальной территорией содержание NO_2 колебалось в пределах от 0 до $3 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$.

В марте 2020 г. (рис. 2б) в столичном регионе в эпицентре загрязнения содержание NO_2 на уровне $10 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$, снижаясь к Калуге и Туле до $4\text{--}5 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$. В Санкт-Петербурге тропосферное содержание диоксида натрия было существенно ниже, чем в столице, на уровне $4\text{--}5 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$, такая же степень загрязнения тропосферы наблюдалась в районе Нижнего Новгорода и на юго-западе Российской Федерации, в районе Ростова-на-Дону.

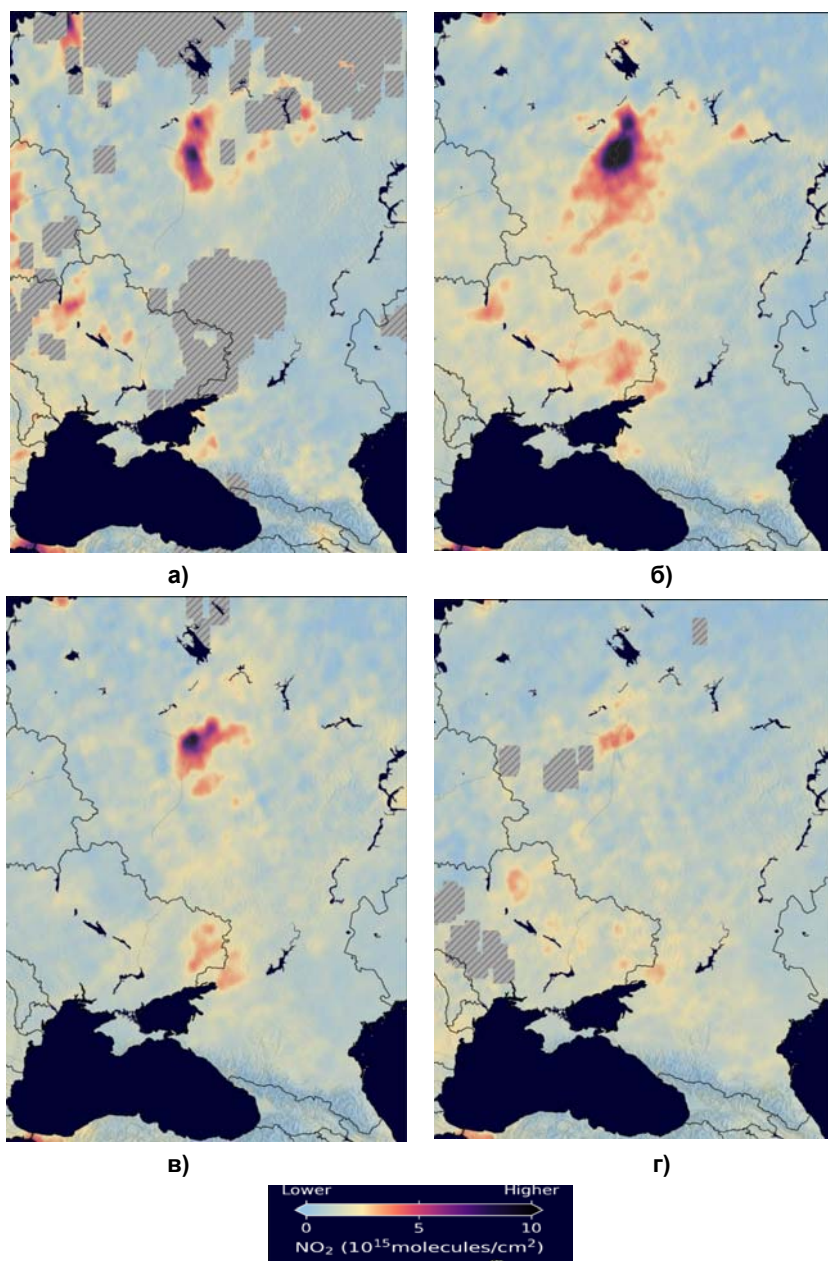


Рис. 2. Среднее тропосферное содержание диоксида азота в 2020 году над Европейской территорией России: февраль (а); март (б); апрель (в); май (г). Фото с сайта NASA: https://so2.gsfc.nasa.gov/no2/pix/htmls/Moscow_data.html.
Fig. 2. Average tropospheric content of nitrogen dioxide in 2020 over the European territory of Russia: February (a); March (б); April (в); May (г). Photo from website NASA: https://so2.gsfc.nasa.gov/no2/pix/htmls/Moscow_data.html.

Фактические значительные ограничения, введенные в действие правительством Российской Федерации и региональными властями, начали действовать в конце марта 2020 г., что привело к значительному снижению нагрузки на окружающую природную среду. В апреле (рис. 2в) тропосферное содержание NO_2 над большей частью Европейской территории России снизилось в среднем на 25 %. Наибольшее снижение на 50 % произошло в районе Нижнего Новгорода, а наименьшее – на 10–15 % в эпицентре загрязнения.

В мае 2020 г. (рис. 2г) была зафиксировано самое низкое тропосферное содержание NO_2 над Европейской территорией России за период наблюдений 2020–2021 гг. Над Москвой содержание NO_2 не превышало $3\text{--}4 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$, в районе Санкт-Петербурга и Ростова-на-Дону – $2\text{--}3 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$, на остальной территории содержание NO_2 колебалось в пределах от 0 до $2 \cdot 10^{15} \text{ м/см}^2$.

Возврат к традиционному уровню загрязнения

То, что очищение атмосферного воздуха от продуктов антропогенной деятельности, связанное с ограничительными мероприятиями, явление временное и скоропроходящее, прогнозировалось многими специалистами: Kai Chen et al. (Yale School of Public Health, USA) [21], Qiang Wang et al. (China University of Petroleum) [25], Surender Kumar et al. (University of Delhi, India) [29] и др.

Продемонстрируем динамику очищения атмосферы от NO_2 в период блокировки и ее последующую деградацию на примере Западной Европы по материалам, приведенным на сайте NASA (рис. 3).

Информация, приведенная на рис. 3, весьма красноречива. Все достижения по очистке атмосферного воздуха от диоксида азота, достигнутые в период блокировок в марте–июне 2020 года, были утрачены уже в сентябре.

Такое положение вещей очень образно и точно обрисовали французский ученый Frédéric Dutheil et al. (University Hospital of Clermont-Ferrand, France): *«Первая глобальная блокировка весной 2020 года вызвала снижение загрязнения воздуха до уровня, предшествующего промышленной революции. Человечество жило в здоровой атмосфере в течение 8 месяцев, примерно с февраля по сентябрь 2020 года. Однако после окончания первой волны SARS-CoV-2 большинство стран быстро увеличило свои выбросы парниковых газов, чтобы оживить мировой рынок и избежать его краха. С октября 2020 года уровни NO_2 и CO увеличились во всем мире с тревожной концентрацией по сравнению с уровнями до пандемии COVID-19. Чтобы быстро перезапустить экономическую машину большинство стран сжигают ископаемое топливо и продолжают эксплуатировать угольные шахты, погружая мир в экологическую катастрофу. В то время как кризис COVID-19, вероятно, завершится в 2022–2023 годах с беспрецедентным уровнем смертности, мы могли бы спросить*

будущие молодые поколения: «Мир после COVID-19 создан для вас?». Даже если потребности устойчивости глобальной экономики жизненно важны человечеству, представляется приоритетным рассмотрение нашей планеты в качестве главного жизненно важного ресурса, а не средства для решения сиюминутных проблем» [18].

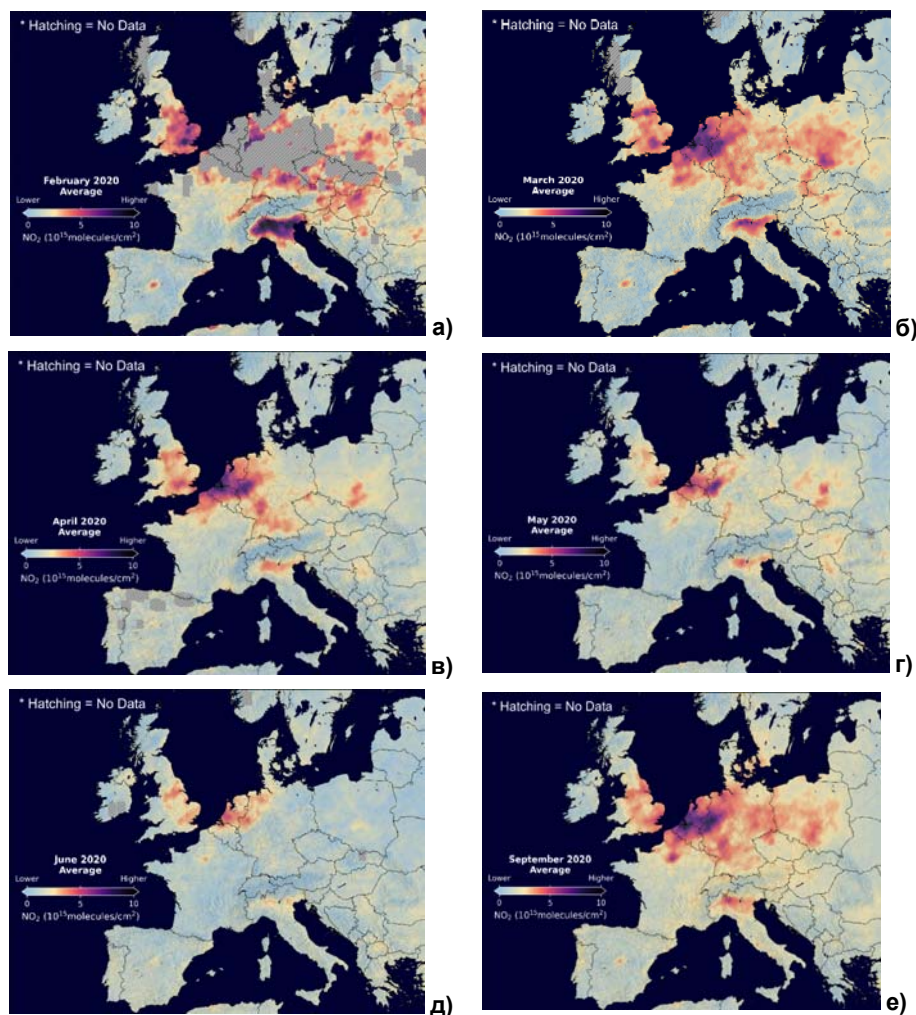


Рис. 3. Среднее тропосферное содержание диоксида азота NO_2 в 2020 г. над территорией Западной Европы: февраль (а); март (б); апрель (в); май (г); июнь (д); сентябрь (е). Фото с сайта NASA:

https://so2.gsfc.nasa.gov/no2/pix/htmls/Moscow_data.html.

Fig. 3. Average tropospheric content of nitrogen dioxide NO_2 in 2020 over European territory of Western Europe: February (a); March (б); April (в); May (г); June (д); September (е). Photo from website NASA:

https://so2.gsfc.nasa.gov/no2/pix/htmls/Moscow_data.html.

Аналогичная ситуация сложилась и на Европейской территории России (рис. 4).

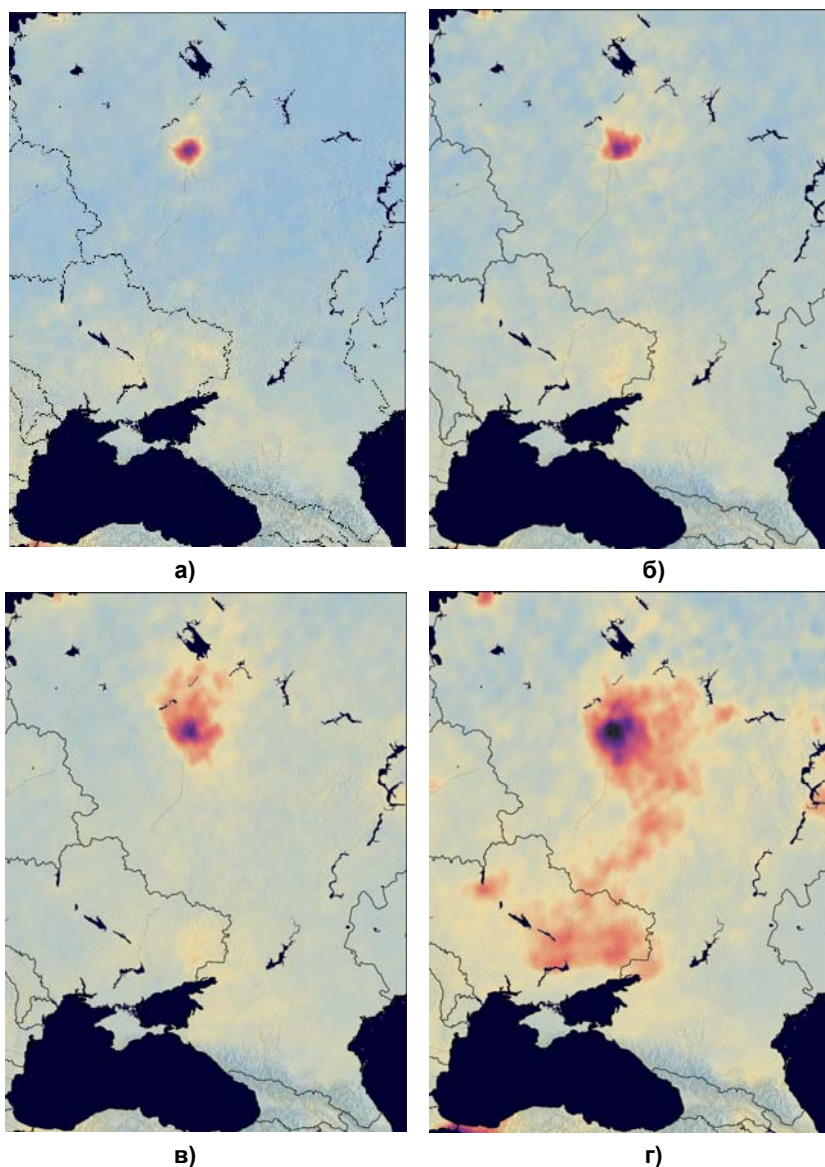


Рис. 4. Среднее тропосферное содержание диоксида азота NO_2 в 2020 г. над Европейской территорией России: июнь (а); июль (б); сентябрь (в); октябрь (г). Фото с сайта NASA:

https://so2.gsfc.nasa.gov/no2/pix/htmls/Moscow_data.html.

Fig. 4. Average tropospheric content of nitrogen dioxide NO_2 in 2020 over European territory of Russia: June (a); July (б); September (в); October (г). Photo from website NASA: https://so2.gsfc.nasa.gov/no2/pix/htmls/Moscow_data.html.

На рис. 4 видно, что в июне 2020 г. (рис. 4а) экологическая ситуация на территории Европейской территории России была весьма благоприятной. Напряженная ситуация сохранялась только в пределах Москвы и ближайшего Подмосковья. На остальной территории тропосферное содержание NO_2 не превышало $3 \cdot 10^{15}$ мол/см². В июле (рис. 4б), когда ограничительные правила стали отменяться в большинстве субъектов федерации, началось незначительное ухудшение экологической ситуации, которое заметно развилось в сентябре (рис. 4в), а в октябре (рис. 4г) уровень загрязнения атмосферы диоксидом азота в столичном регионе приблизился к исходному уровню марта 2020 года.

Озон

Озон (O_3) играет огромную роль в экосистеме планеты, поскольку озоновый слой защищает Землю от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Озон обладает очень высокой окислительной способностью, благодаря чему он широко используется в промышленности и медицине для стерилизации изделий, отбеливания бумаги, очистки масел, очистки воды и воздуха от микроорганизмов. Однако окислительные способности озона имеют и другую, негативную сторону. Воздействие озона на организм человека является общетоксическим, раздражающим и канцерогенным. Наиболее опасно воздействие высоких концентраций озона на органы дыхания, для которых он служит прямым раздражителем, и которые являются основным объектом атаки со стороны SARS-CoV-2, что особенно опасно в период пандемии COVID-19.

Таким образом, стратосферный озон является для Земли и ее обитателей благом, а тропосферный озон – ядом и загрязнителем воздуха.

Во многих статьях, посвященных комплексному изучению изменений компонентного состава атмосферного воздуха до и после ограничительных мероприятий, отмечается, существенный рост содержания озона O_3 в приземном слое атмосферы.

Pierre Sicard et al. (ARGANS, France) установили, что изоляция из-за пандемии COVID-19 в четырех южно-европейских городах (Ницца, Рим, Валенсия и Турин), по сравнению с аналогичным периодом 2017–2019 гг., привело к росту среднесуточной концентрации O_3 на 24 % в Ницце, 14 % в Риме, 27 % в Турине и на 2,4 % в Валенсии. [24]. Maria Cristina Collivignarelli et al. (University of Pavia, Italy) приводит информацию о том, что в Милане первоначальная концентрация озона составляла $20,1 \pm 2,1$ мкг/м³, в период первой фазы блокировки (PL) она поднялась до $43,7 \pm 2,4$ мкг/м³, а после второй фазы блокировки (TL) до $59,0 \pm 2,1$ мкг/м³ [23]. Khaled Elsaid et al. (Chemical Engineering Program, Texas A&M University at Qatar, Qatar) свидетельствуют об увеличении концентрации O_3 во время блокировки в Испании на 56,3 % [22]. Feng Liu et al. (Southeast University, China), исследовав ситуацию в 597 крупных городах мира в период с 1 января по 5 июля 2020 г., установили, что

во время блокировки концентрация O_3 в приземном слое атмосферы увеличивается на 10–27 % [17].

Влияние загрязнения атмосферного воздуха на заболеваемость и смертность населения

О том, что загрязнение атмосферного воздуха усиливает заболеваемость COVID-19, свидетельствуют многие специалисты: Roberto Dragone et al. (Institute for the study of nanostructured materials, Italy) [27], Edoardo Conticini et al. (University of Siena, Ital) [16], Daniele Fattorini et al. (Marche Polytechnic University, Italy) [14], при этом превалирует мнение о том, что мелкодисперсные твердые частицы $PM_{2,5}$ являются наиболее опасным катализатором динамики COVID-19 [13].

Для изучения этого вопроса мы провели корреляционный анализ зависимостей между уровнем смертности населения 22 субъектов Российской Федерации, заболевших COVID-19 во время второй волны пандемии коронавируса, с одной стороны, и индексом качества воздуха AQI (рис. 5) и содержанием в воздухе мелкодисперсных твердых частиц $PM_{2,5}$ (рис. 6), с другой стороны. Исследованы следующие субъекты Российской Федерации: Амурская, Архангельская, Волгоградская, Вологодская, Воронежская, Иркутская, Московская, Мурманская, Нижегородская, Ростовская, Самарская, Саратовская, Свердловская, Томская, Ульяновская, Челябинская области, Забайкальский и Пермский края, г. Москва, Республика Бурятия, Республика Карелия и Ямало-Ненецкий автономный округ.

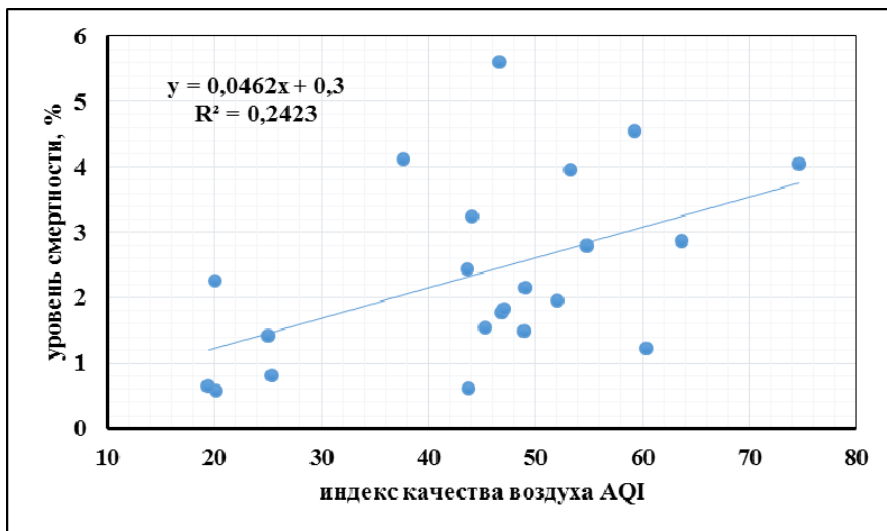


Рис. 5. Зависимость уровня смертности населения Российской Федерации от индекса качества воздуха AQI.

Fig. 5. Dependence of mortality level of Russian population on air quality index AQI.

Период изучения зависимости уровня смертности населения от качества воздуха соответствовал второй волне пандемии. В разных субъектах начало и окончание этого периода несколько отличаются, но не выходят за пределы с 18.09.2020 г. по 10.03.2021 года.

Расчетное значение статистики Стьюдента $t_p = 2,399$ больше табличного значения $t_t = 1,725$ при количестве парных замеров $N=22$ и вероятности 0,95, что говорит о наличии устойчивой прямо пропорциональной зависимости между уровнем смертности, который рассчитан как процент летальных исходов от количества заболевших COVID-19, и индексом качества атмосферного воздуха на территории субъекта федерации.

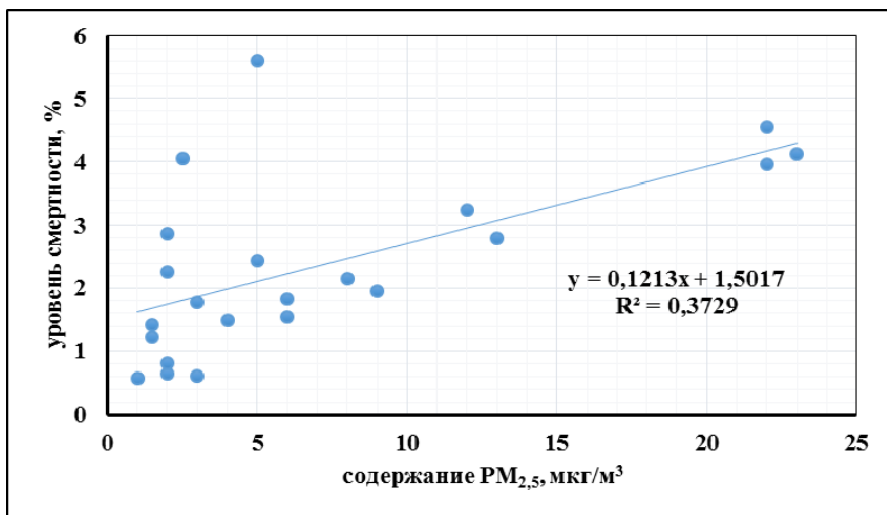


Рис. 6. Зависимость уровня смертности населения Российской Федерации от содержания мелкодисперсных твердых частиц PM_{2,5} в воздухе.

Fig. 6. Dependence of mortality level of Russian population on concentration of low-level solids PM_{2,5} in the air.

Расчетное значение статистики Стьюдента $t_p=3,272$ больше табличного значения $t_t= 2,528$ при количестве парных замеров $N=22$ и вероятности 0,99, что говорит о наличии еще более устойчивой прямо пропорциональной зависимости между уровнем смертности и содержанием мелкодисперсных твердых частиц в атмосферном воздухе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что плохое качество воздуха отягчает последствия COVID-19, увеличивая процент смертности. Причем, значительную роль в этом играет концентрация мелкодисперсных твердых частиц PM_{2,5}, которые могут глубже проникать в легкие человека и обострять течение респираторных заболеваний.

Заключение

Ограничительные мероприятия, проведенные органами власти различного уровня для снижения скорости распространения SARS-CoV-2 и масштабов пандемии COVID-19 на территории Западной Европы и Российской Федерации, привели к существенному снижению антропогенной нагрузки на окружающую природную среду и значительному улучшению экологической обстановки.

Практически повсеместно и наиболее выразительно наблюдалось снижение тропосферного содержания NO_2 (23–37 %), другие основные загрязнители воздуха PM_{10} , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ снижались несколько меньше (на 10–20 %), причем это снижение наблюдалось не на всех территориях. Меньшее снижение было продемонстрировано CO (5–10 %) относительно концентраций, наблюдаемых до начала ограничительных мероприятий.

За редким исключением, ограничение техногенной нагрузки на окружающую среду привело к весьма существенному росту концентрации озона O_3 , причем в ряде случаев рост концентрации озона достигал 150–200 % и более.

После прекращения ограничительных мероприятий, уже к сентябрю в Западной Европе и к октябрю на Европейской территории России уровень загрязнения атмосферного воздуха стал соответствовать первоначальному.

Наши расчеты позволяют предположить, что уровень смертности населения Российской Федерации от COVID-19 тесно связан с качеством атмосферного воздуха, особенно с уровнем концентрации в нем мелкозернистых твердых частиц $\text{PM}_{2.5}$.

Список литературы

1. Бручковский И.И., Красовский А.Н. Особенности распределения NO_2 в атмосфере. Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата // Материалы Международной научной конференции, 5–8 мая 2015 г. Минск: Белорус. гос. ун-т, 2015. 337 с.
2. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2012. 576 с. (Библиотека истории и культуры).
3. Глазьев С.Ю. Пандемический кризис помог укрепиться новому технологическому укладу // Научные труды ВЭО России. 2020. Т. 225, № 5. С. 26–35. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-225-5-26-35.
4. Ионов Д.В., Поберовский А.В. Двуокись азота в воздушном бассейне Санкт-Петербурга: Дистанционные измерения и численное моделирование // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Том 48, № 4. С. 422–433.
5. Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М. Региональный космический мониторинг содержания двуокси азота в тропосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Том 45, № 4. С. 467–476.
6. Печаткин В.В., Малышев Т.А. Конкурентоспособность реального сектора экономики США, Китая и России в условиях пандемии // Экономические отношения. 2021. Том 11, № 2. С. 319–334. DOI: 10.18334/eo.11.2.111995.

7. *Ситнов А.И.* Анализ спутниковых наблюдений тропосферного содержания NO₂ над московским регионом // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Том. 47, № 2. С. 184-203.
8. *Akash Biswal, Tanbir Singh, Vikas Singh, Tanbir Singh, Suman Mor.* COVID-19 lockdown and its impact on tropospheric NO₂ concentrations over India using satellite-based data // *Heliyon*. 2020. Vol. 6, no. 9. P. e04764. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04764.
9. *Akshansha Chauhan, Ramesh P Singh.* Decline in PM 2.5 concentrations over major cities around the world associated with COVID-19 // *Environmental Research*. 2020. Vol. 187. P. 109634. DOI:10.1016/j.envres.2020.109634.
10. *Alessio Facciola, Pasqualina Laganà, Gabriella Caruso.* The COVID-19 pandemic and its implications on the environment // *Environmental Research*. 2021. Vol. 201. P. 111648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111648>
11. *Ashwani Kumar, Muneer Ahmad Malla, Anamika Dubey.* With Corona Outbreak: Nature Started Hitting the Reset Button Globally // *Front Public Health*. 2020. Vol. 24, no. 8. P. 569353. DOI: 10.3389/fpubh.2020.569353.
12. *Aurelio Tobías, Cristina Carnerero, Cristina Reche, Jordi Massagué, Marta Via, Maria Cruz Minguillón, Andrés Alastuey, Xavier Querol.* Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 15, no. 726. P. 138540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138540.
13. *Bo Pieter, Johannes Andrée.* Incidence of COVID-19 and Connections with Air Pollution Exposure: Evidence from the Netherlands // *Policy Research Working Papers*. 2020. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.1596/1813-9450-9221>
14. *Daniele Fattorini, Francesco Regoli.* Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Ital // *Environment Pollution*. Sep. 2020. Vol. 264. P. 114732. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114732
15. *Diana Brahams.* Spring in London with Covid-19: a personal view // *International Journal of Legal Medicine*. 2020. Vol. 88, no. 2. P. 57-64. DOI: 10.1177/0025817220923692.
16. *Edoardo Conticini, Bruno Frediani, Dario Caro.* Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 261. DOI: 114465 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465>
17. *Feng Liu, Meichang Wang, Meina Zheng.* Effects of COVID-19 lockdown on global air quality and health // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 10, no. 755. P. 142533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142533.
18. *Frédéric Dutheil, Julien S. Baker, Valentin Navel.* Air pollution in post-COVID-19 world: the final countdown of modern civilization? Letter to the Editor // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 17. Comment on: «COVID-19 and air pollution: the worst is yet to come». DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-14433-0>
19. *Hervé Petetin, Dene Bowdalo, Albert Soret et al. Oriol Jorba, Kim Serradell, Carlos Pérez García-Pando, Dene Bowdalo.* Meteorology-normalized impact of COVID-19 lockdown upon NO₂ pollution in Spain // *Atmos. Chem. Phys*. Vol. 20. P. 11119-11141. DOI: 10.5194/acp-20-11119-2020
20. *José M. Baldasano.* COVID-19 lockdown effects on air quality by NO₂ in the cities of Barcelona and Madrid (Spain) // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 1, no. 741. P. 140353. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140353.

21. Kai Chen, Meng Wang, Patrick L. Kinney, Paul T. Anastasa. Reduction in air pollution and attributable mortality due to COVID-19 lockdown – Authors' reply // *Lancet Planet Health*. 2020. Vol. 4, no. 7. P. e269. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30149-2
22. Khaled Elsaid, Valentina Olabi, Enas Taha Sayed, Tabbi Wilberforce, Mohammad Ali Abdelkareem. Effects of COVID-19 on the environment: An overview on air, water, wastewater, and solid waste // *Environmental Resources Management*. 2021. Vol. 15, no. 292. P. 112694. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112694.
23. Maria Cristina Collivignarelli, Alessandro Abbà, Giorgio Bertanza, Roberta Pedrazzani, Paola Ricciardi, Marco Carnevale Miino. Lockdown for CoViD-2019 in Milan: What are the effects on air quality? // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 25, no. 732. P. 139280. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139280
24. Pierre Sicard, Alessandra De Marco, Evgenios Agathokleous, Zhaozhong Feng, Xiaobin Xu, Elena Paoletti, José Jaime Diéguez Rodríguez, Vicent Calatayud. Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 15, no. 735. P. 139542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139542
25. Qiang Wang, Min Su. A preliminary assessment of the impact of COVID-19 on environment – A case study of China // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 1, no. 728. P. 138915. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138915
26. Roberto Cazzolla Gattiab. Coronavirus outbreak is a symptom of Gaia's sickness // *Ecological Modelling*. 2020. Vol. 15, no. 426. P. 109075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109075>
27. Roberto Dragone, Giorgio Licciardi, Gerardo Grasso, Costantino Del Gaudio, Jocelyn Chanussot. Analysis of the Chemical and Physical Environmental Aspects that Promoted the Spread of SARS-CoV-2 in the Lombard Area // *Public Health*. 2021. Vol. 18, no. 3. P. 1226. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031226>
28. Saeida Saadat, Deepak Rawtani, Chaudhery Mustansar Hussain. Environmental perspective of COVID-19 // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 1, no. 728. P. 138870. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138870
29. Surender Kumar, Shunsuke Managi. Does Stringency of Lockdown Affect Air Quality? Evidence from Indian Cities // *Economics of Disasters and Climate Change*. 2020. Vol. 15. P. 1-22. DOI: 10.1007/s41885-020-00072-1
30. Специальное выступление Генерального секретаря в Давосе. 25 января 2021 года. Организация Объединенных Наций. Генеральный секретарь. Электронный ресурс. URL: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/statement/2021-01-25/secretary-generals-special-address-davos-agenda-delivered> (Дата обращения 15.07.2021).
31. Минус семь триллионов: коронавирус опустошил мировую экономику. Электронный ресурс. URL: <https://ria.ru/20200921/tsena-pandemii-1577459576.html> (Дата обращения 25.05.2021).
32. Загрязнение воздуха остается низким поскольку европейцы остаются дома. 16/04/2020. ESA/Приложения/Наблюдение Земли/Copernicus/Sentinel-5P. Электронный ресурс. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_remains_low_as_Europeans_stay_at_home (Дата обращения 04.08.2021)

References

1. Bruchkovskij I.I., Krasovskij A.N. Osobennosti raspredeleniya NO₂ v atmosfere. Problemy gidrometeorologicheskogo obespecheniya hozyaystvennoy deyatel'nosti v usloviyah izmenyayushchegosya klimata [Features of the distribution of NO₂ in the atmosphere]. *Problems of hydrometeorological support of economic activity in a changing climate: materials of the International Scientific Conference*, May 5–8, 2015, Belarusian State University. Minsk, 2015, 337 p. [in Russ.].
2. Vernadskij V.I. Biosfera i noosfera [Biosphere and noosphere]. Moscow: Irispress Publ., 2012, 576 p. [in Russ.].
3. Glaz'ev S.Yu. Pandemic crisis helped to strengthen the new technological order. *Nauchnye trudy VEO Rossii* [Scientific Works of the Free Economic Society of Russia], vol. 225, no. 5, 2020, pp. 26-35. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-225-5-26-35 [in Russ.].
4. Ionov D.V., Poberovskij A.V. Nitrogen dioxide in the air basin of St. Petersburg: Remote measurements and numerical modeling. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 373-383. DOI: 10.1134/S0001433812040093.
5. Ionov D.V., Timofeev Yu.M. Regional space monitoring of nitrogen dioxide content in the troposphere. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 434-443. DOI: 10.1134/S0001433809040045.
6. Pechatkin V.V., Malyshev T.A. Competitiveness of the real sector of the economy of the United States, China and Russia in the context of the pandemic. *Ekonomicheskie otnosheniya* [Economic relations], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 319-334. DOI: 10.18334/eo.11.2.111995 [in Russ.].
7. Sinov A.I. Analysis of satellite observations of tropospheric content NO₂ over the Moscow region. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 166-185. DOI: 10.1134/S0001433811010129.
8. Akash Biswal, Tanbir Singh, Vikas Singh. Tanbir Singh, Suman Mor. COVID-19 lockdown and its impact on tropospheric NO₂ concentrations over India using satellite-based data. *Heliyon*. 2020, vol. 6, no. 9, p. e04764. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04764
9. Akshansha Chauhan, Ramesh P. Singh. Decline in PM 2,5 concentrations over major cities around the world associated with COVID-19. *Environmental Research*, 2020, vol. 187, p. 109634. DOI:10.1016/j.envres.2020.109634
10. Alessio Facciola, Pasqualina Laganà, Gabriella Caruso. The COVID-19 pandemic and its implications on the environment. *Environmental Research*, 2021, vol. 201, p. 111648. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111648
11. Ashwani Kumar, Muneer Ahmad Malla, Anamika Dubey. With Corona Outbreak: Nature Started Hitting the Reset Button Globally. Review. *Front Public Health*, 2020, vol. 24, no. 8, p. 569353. DOI: 10.3389/fpubh.2020.569353. eCollection 2020.
12. Aurelio Tobías, Cristina Carnerero, Cristina Reche, Jordi Massagué, Marta Via, María Cruz Minguillón, Andrés Alastuey, Xavier Querol. Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 15, no. 726, p. 138540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138540.
13. Bo Pieter, Johannes Andrée. Incidence of COVID-19 and Connections with Air Pollution Exposure: Evidence from the Netherlands. *Policy Research Working Papers*, 2020, vol. 9. DOI: 10.1596/1813-9450-9221

14. Daniele Fattorini, Francesco Regoli. Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Ital. *Environment Pollution.*, 2020, vol. 264, p. 114732. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114732
15. Diana Brahams. Spring in London with Covid-19: a personal view. *International Journal of Legal Medicine.* 2020, vol. 88, no. 2, pp. 57-64. DOI: 10.1177/0025817220923692.
16. Edoardo Conticini, Bruno Frediani, Dario Caro. Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? *Environmental Pollution*, 2020, vol. 261. DOI: 114465https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465
17. Feng Liu, Meichang Wang, Meina Zheng. Effects of COVID-19 lockdown on global air quality and health. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 10, no. 755, p. 142533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142533.
18. Frédéric Dutheil, Julien S. Baker & Valentin Navel. Air pollution in post-COVID-19 world: the final countdown of modern civilization? Letter to the Editor. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. Comment on: «COVID-19 and air pollution: the worst is yet to come». DOI: 10.1007/s11356-021-14433-0
19. Hervé Petetin, Dene Bowdalo, Albert Soret et al. Oriol Jorba, Kim Serradell, Carlos Pérez García-Pando, Dene Bowdalo Meteorology-normalized impact of COVID-19 lockdown upon NO₂ pollution in Spain. Discussion started: 2020 May 25. DOI: 10.5194/acp-2020-446
20. José M. Baldasano. COVID-19 lockdown effects on air quality by NO₂ in the cities of Barcelona and Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 1, no. 741, p. 140353. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140353
21. Kai Chen, Meng Wang, Patrick L. Kinney and Paul T. Anastasa. Reduction in air pollution and attributable mortality due to COVID-19 lockdown – Authors' reply. *Lancet Planet Health.*, 2020, vol. 4, no. 7, p. e269. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30149-2
22. Khaled Elsaid, Valentina Olabi, Enas Taha Sayed, Tabbi Wilberforce, Mohammad Ali Abdelkareem. Effects of COVID-19 on the environment: An overview on air, water, wastewater, and solid waste. Review. *Environmental Resources Management*, 2021, vol. 15, no. 292, p. 112694. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112694
23. Maria Cristina Collivignarelli, Alessandro Abbà, Giorgio Bertanza, Roberta Pedrazzani, Paola Ricciardi, Marco Carnevale Miino. Lockdown for CoViD-2019 in Milan: What are the effects on air quality? *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 25, no. 732, p. 139280. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139280.
24. Pierre Sicard, Alessandra De Marco, Evgenios Agathokleous, Zhaozhong Feng, Xiaobin Xu, Elena Paoletti, José Jaime Diéguez Rodríguez, Vicent Calatayud. Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 15, no. 735, p. 139542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139542
25. Qiang Wang, Min Su. A preliminary assessment of the impact of COVID-19 on environment - A case study of China. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 1, no. 728, p. 138915. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138915.
26. Roberto Cazzolla Gattiab. Coronavirus outbreak is a symptom of Gaia's sickness. *Ecological Modelling*, 2020, vol. 15, no. 426, p. 109075. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109075

27. Roberto Dragone, Giorgio Licciardi, Gerardo Grasso, Costantino Del Gaudio, Jocelyn Chanussot. Analysis of the Chemical and Physical Environmental Aspects that Promoted the Spread of SARS-CoV-2 in the Lombard Area. *Public Health*, 2021, vol. 18, no. 3, p. 1226. DOI: 10.3390/ijerph18031226

28. Saeida Saadat, Deepak Rawtani, Chaudhery Mustansar Hussain. Environmental perspective of COVID-19. Review. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 1, no. 728, p. 138870. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138870.

29. Surender Kumar, Shunsuke Managi. Does Stringency of Lockdown Affect Air Quality? Evidence from Indian Cities. *Economics of Disasters and Climate Change*, 2020, vol. 15, pp. 1-22. DOI: 10.1007/s41885-020-00072-1

30. Secretary-General's special address at Davos Agenda. 25 January 2021. United Nations. Available at: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/statement/2021-01-25/secretary-generals-special-address-davos-agenda-delivered>.

31. Minus sem' trillionov: koronavirus opustoshil mirovuyu ekonomiku. Elektronnyy resurs. Available at: <https://ria.ru/20200921/tsena-pandemii-1577459576.html> [in Russ.].

32. Air pollution remains low as Europeans stay at home. 16/04/2020. The European Space Agency (ESA). Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_remains_low_as_Europeans_stay_at_home.

Поступила 27.09.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 27.09.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-134-148>

УДК 551.510.411:551.510.42

Аномальное аэрозольное загрязнение воздуха в Москве вблизи локального антропогенного источника в июле 2021 года

***Д.П. Губанова, А.А. Виноградова,
А.И. Скороход, М.А. Иорданский***

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия
gubanova@ifaran.ru*

Анализируется состав приземного аэрозоля в центре Москвы вблизи временно-го локального интенсивного антропогенного источника загрязнения, связанного со сносом многоэтажных строений. Аномальный рост концентрации аэрозольных частиц в дневное время до 5 ПДК среднесуточной и до 14 ПДК максимальной разовой концентрации аэрозоля PM_{10} усугублялся неблагоприятными метеорологическими условиями в середине июля 2021 года. Выполнена предварительная оценка мощности пылевого аэрозоля и его влияния на аэрозольное загрязнение воздуха близлежащих районов города. Определены экстремальные и «фоновые» значения массовой концентрации аэрозоля, его элементный и дисперсный состав в период воздействия источника. Обсуждается необходимость учета подобных точечных источников загрязняющих веществ при оценке и прогнозировании экологической обстановки в многонаселенном городском районе.

Ключевые слова: приземный аэрозоль, локальный антропогенный источник, Москва, массовая концентрация, элементный состав, метеорологические условия

Abnormal aerosol air pollution in Moscow near the local anthropogenic source in July 2021

***D.P. Gubanova, A.A. Vinogradova,
A.I. Skorokhod, M.A. Iordanskii***

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
gubanova@ifaran.ru*

The paper analyzes the composition of surface aerosol close to the local intense anthropogenic source of pollution associated with the active phase of demolition of multi-storey buildings in the center of Moscow. An abnormal increase in the daytime PM_{10} aerosol particle concentration to 5 MPC for daily values and to 14 MPC for maximum single values was reinforced by unfavorable meteorological conditions in the middle of July 2021. Preliminary estimation of the power of the dust aerosol source and its effect on the aerosol air pollution in nearby areas of the city is performed. The extreme and background values of the aerosol mass concentration, its elemental composition and particle size distribution during this period are determined. It is necessary to take into

account such point pollutant sources in estimating and forecasting environmental conditions in a densely populated city.

Keywords: surface aerosol, local anthropogenic source, Moscow, aerosol mass concentration, elemental composition, meteorological conditions

Введение

Вопросы загрязнения и контроля качества воздушного бассейна города весьма актуальны для всех стран и регионов [16]. Смешение в приземном воздухе выбросов (газов и аэрозолей) различных промышленных предприятий, транспорта и служб жизнеобеспечения населения с эмиссиями природных источников (растения, почвы) создает в городе разнородную пространственную структуру загрязнения воздуха, быстро меняющуюся благодаря подвижности воздушных масс и активной химии газов и аэрозолей.

Москва – крупнейший мегаполис в Европе (только для «старой» Москвы, до официального включения юго-западных районов города, расположенных за МКАД, площадь была $>1116 \text{ км}^2$, население $>12 \text{ млн чел.}$), где есть многочисленные территории разного качества, от районов жилой застройки и парковых зон отдыха до интенсивных транспортных магистралей и промышленных комплексов. Развернутая в последние годы программа реновации и обновления зданий, затронувшая все городские округа, включает как строительство новых сооружений, так и разрушение и вывоз с территории города старых построек. К сожалению, такие работы не всегда ведутся с соблюдением методик и норм охраны воздуха для жилых территорий.

Регулярный контроль за качеством воздуха в Москве осуществляет ГПБУ «Мосэкомониторинг» (далее – МЭМ [<https://mosecom.mos.ru/>]), имеющий более 50 станций наблюдений, расположенных в разных районах города. Кроме газовых составляющих атмосферы, этой службой оценивается и аэрозольное загрязнение по величинам концентраций частиц размерами менее 10 мкм (PM_{10}) и менее 2.5 мкм ($\text{PM}_{2.5}$). Имея в виду большую площадь Москвы, пространственное разрешение сети невысоко, эта служба скорее предназначена для оценки состояния атмосферы города в целом. В случае появления локального точечного источника загрязнения воздуха (например, площадки, расчищаемой под строительство новых зданий, ремонта и реконструкции дворов и улиц), радиус воздействия которого сравнительно невелик ($1\text{--}10 \text{ км}$), станции МЭМ не всегда могут его зафиксировать.

Ряд исследовательских работ по изучению состава воздуха в Москве эпизодически выполнялись и выполняются в разных районах города учеными и исследователями различных московских организаций (например, МГУ им. М.В. Ломоносова, НИФХИ им. Л.Я. Карпова, ИФА им. А.М. Обухова РАН [2, 4, 8, 11, 13–15]). Но и этого недостаточно для создания

общей картины загрязнения города и учета источников этого загрязнения различного происхождения.

Данная работа посвящена описанию эпизода экстремального аэрозольного загрязнения воздуха в центре Москвы под воздействием локального антропогенного источника и его влияния на изменение состава аэрозоля приземной атмосферы ближайших территорий.

Аппаратура, методы измерений и анализа данных

В течение последних двух лет (с октября 2019 до ноября 2021 года) в ИФА им. А.М. Обухова РАН (далее – ИФА РАН) сотрудниками этого института проводится уникальный комплексный аэрозольный эксперимент по исследованию физико-химических характеристик приземного аэрозоля [3]. Пункты наблюдения выбраны в административном центре мегаполиса (двор ИФА РАН, Пыжевский пер., 3, муниципальный р-н «Якиманка», ЦАО г. Москвы, координаты 55,739085° с. ш., 37,623807° в. д.) и в условно фоновом районе Подмоскovie на Звенигородской научной станции (ЗНС ИФА РАН, дер. Новошихово, Одинцовский р-н Московской обл., 55,695895° с. ш., 36,773343° в. д.). Комплекс измерительной аппаратуры в обоих пунктах включает:

- аспирационные пробоотборники для ежесуточного забора аэрозольных проб на аналитические фильтры типа АФА с последующим гравиметрическим и элементным анализом;

- 6-каскадные импакторы, снаряженные гидрофобными фильтрами, для определения массового фракционного и элементного состава аэрозоля в каналах размеров частиц: больше 6.5 мкм; 4.0–6.5 мкм; 2.5–4.0 мкм; 1.5–2.5 мкм; 0.5–1.5 мкм; меньше 0.5 мкм;

- лазерные аэрозольные спектрометры типа ЛАС-П для определения дисперсного состава и счетной концентрации аэрозольных частиц размерами 0.15–2.0 мкм при концентрации до $2 \cdot 10^3$ частиц/см³, 10 каналов измерений, частота регистрации сигнала 5 минут;

- оптико-электронные аэрозольные спектрометры типа ОЭАС-05 для определения дисперсного состава и счетной концентрации аэрозольных частиц размерами 0.2–10.0 мкм при концентрации до 10^3 частиц/см³, 10 каналов измерений, частота регистрации сигнала 5 минут;

- пробоотборные устройства, снаряженные гидрофобными фторопластовыми фильтрами, собирающие пробы для исследования морфологической структуры аэрозольных частиц и химического состава.

Массовую концентрацию аэрозолей определяли гравиметрическим методом, а также численным методом с использованием измеренной счетной концентрации приземного аэрозоля. Элементный состав аэрозольных проб исследовали методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП, АЭС-ИСП), а также методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА)

[5, 6, 9]. Выполнен анализ содержания в приземном аэрозоле более 60 химических элементов различного генезиса – элементы глобального распространения, редкоземельные и радиоактивные элементы, тяжелые металлы и металлоиды.

Эксперимент методически был построен таким образом, что за два года наблюдений получены непрерывные ряды данных о дисперсном составе, счетной и массовой концентрации субмикронных и микронных аэрозольных частиц в диапазоне размеров 0,25–10 мкм в приземном слое атмосферы мегаполиса и пригорода. Кроме этого, каждый сезон в течение 35–40 суток проводился интенсивный комплексный эксперимент, когда дополнительно гравиметрическим методом определяли суточную массовую концентрацию всех аэрозольных частиц (размером до 30–40 мкм), а также исследовали элементный состав приземного аэрозоля – на основе суточных проб, собранных с помощью аспирационных пробоотборников как в городе, так и в пригороде (анализ первых результатов в [3, 4, 14]).

Основные результаты непрерывного мониторинга

На рис. 1 представлены непрерывные ряды среднесуточной массовой концентрации аэрозолей PM_{10} на площадках ИФА РАН и ЗНС ИФА РАН в сравнении с непрерывными данными, полученными на станции МЭМ «Спиридоновка» (<https://mosecom.mos.ru/spiridonovka/>) как наиболее близкой к ИФА РАН не только по географическому положению, но и по особенностям застройки и интенсивности автотранспортной нагрузки вблизи данных пунктов. Высокая корреляция и хорошая сходимости данных по наблюдениям в ИФА РАН и на ст. «Спиридоновка» в различные сезоны свидетельствуют о правомерности такого сравнения для контроля качества получаемых данных.

За весь период двухлетних наблюдений в ИФА РАН было выявлено (рис. 1) несколько эпизодов с экстремальным ростом содержания в воздухе аэрозольных частиц (общей массы и массы частиц разной размерности), связанных с региональным и дальним переносом аэрозолей горения и пылевых аэрозолей при адвекции воздуха в условиях блокирующих антициклонов весной и осенью [3]. Однако рекордный рост концентрации приземного аэрозоля был зарегистрирован в пункте наблюдения ИФА РАН в период с 14 по 23 июля 2021 года. Подробному анализу именно этого эпизода и посвящена данная работа.

Влияние локального антропогенного аэрозольного источника в сложившихся метеорологических условиях

Аномальное аэрозольное загрязнение приземного воздуха в окрестностях пункта наблюдения в ИФА РАН в дневное время в середине июля 2021 года связано с появлением сильного локального антропогенного источника пылевого аэрозоля.

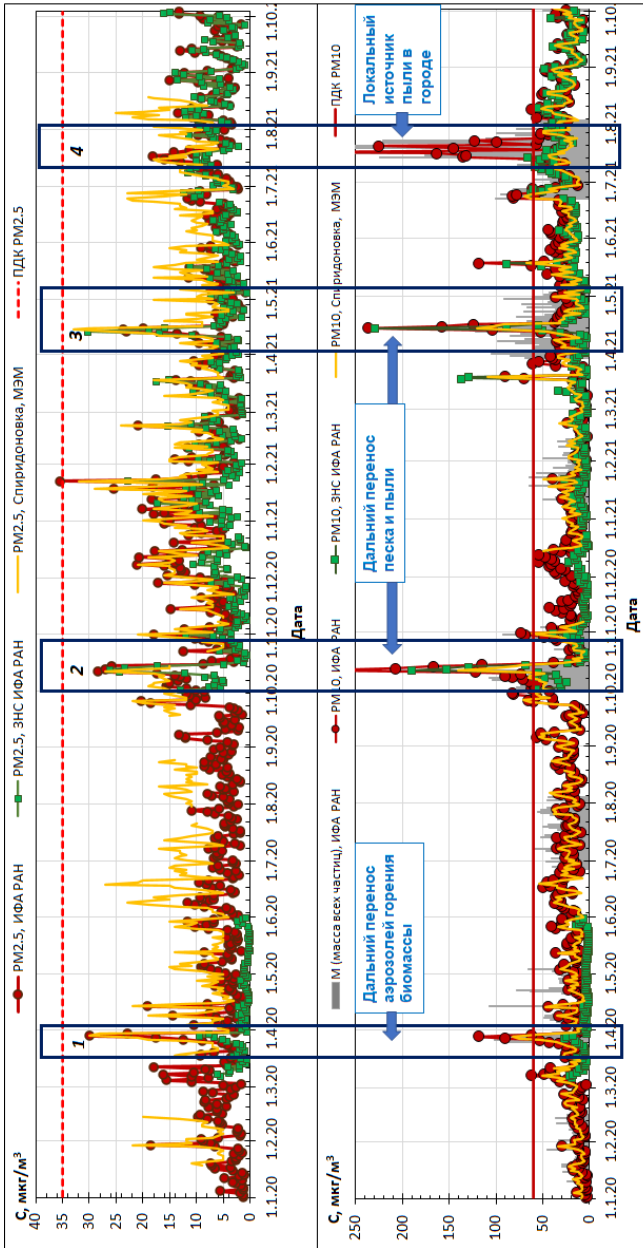


Рис. 1. Среднесуточная концентрация аэрозолей $PM_{2.5}$ (вверху) и PM_{10} (внизу) в приземной атмосфере на площадке ИФА РАН (красный), ЗНС ИФА РАН (зеленый), «Спиридоновка» МЭМ (желтый), а также всей массы аэрозоля (серый) с 01.01.2020 по 01.10.2021 г. Горизонтальные красные линии – ПДКс.с. для аэрозолей соответствующей размерности. Эпизоды anomalously высокой концентрации загрязнения воздуха выделены рамками.

Fig. 1. Average daily concentration of aerosols $PM_{2.5}$ (top) and PM_{10} (bottom) in the surface atmosphere at IAP RAS (red), ZSS IAP RAS (green), Spiridonovka, MEM (yellow), as well as the entire aerosol mass (gray) – from 01.01.20 to 01.10.21. Horizontal red lines – MPC for daily aerosol concentration of corresponding sizes. The episodes of anomalously high air pollution are highlighted with boxes.

На территории, расположенной в 100–300 м в направлении ЗСЗ от пункта наблюдения ИФА РАН осуществлялся демонтаж и снос зданий и сооружений научно-производственного назначения (см. рис. 2). Эти работы были начаты в марте 2021 г. для дальнейшего строительства на этой площадке ЖК «Лаврушинский». Несомненно, правила проведения подобных работ предусматривают защитные меры по предотвращению широкого распространения пыли вокруг демонтируемых объектов. Однако в данном случае никаких адекватных мер принято не было.



Рис 2. Схема расположения пункта наблюдений ИФА РАН и территории, на которой осуществлялся демонтаж (снос) научно-производственных зданий (слева) и фотография «пыльной бури» в Пыжёвском переулке (справа).

Fig. 2. Scheme of the location of IAP RAS observation point and the territory where the dismantling (demolition) of scientific and industrial buildings was carried out (left) and a photo of the "dust storm" in Pyzhevsky Lane (right).

Как показали результаты комплексного аэрозольного эксперимента, проводившегося как раз в ИФА РАН в июле 2021 года, экстремально высокие значения массовой концентрации PM_{10} , превысившие ПДКс.с. в 2–5 раз, а концентрацию PM_{10} на ст. Спиридоновка в 3–9 раз, вызвали «пыльную бурю» в Пыжёвском переулке (рис. 2) и экстремальное загрязнение приземного слоя атмосферы близлежащих микрорайонов пылевым аэрозолем.

Величины предельной допустимой среднесуточной и максимальной разовой концентрации частиц PM_{10} (ПДКс.с.=60 мкг/м³ и ПДКм.р.=300 мкг/м³ соответственно) неоднократно превышались. Наибольшие разовые значения концентрации частиц PM_{10} в эти дни составили от 8.74 ПДКм.р. (15.07.2021 15:55) до 14.38 ПДКм.р. (17.07.2021. 09:55) (см. таблицу). При этом концентрация частиц $PM_{2.5}$ менялась незначительно, что хорошо вписывается в картину загрязнения атмосферы более крупными частицами, образующимися при разрушении построек.

Таблица. Метеорологические условия и массовая концентрация приземного аэрозоля в исследуемый период по данным наблюдений ИФА РАН и МЭМ
Table. Meteorological conditions and mass concentration of surface aerosol during the study period according to IAP RAS and MEM observations

Дата	Синоптические и метеорологические условия	Массовая концентрация, мкг/м ³			
		максимальная разовая	среднесуточная		
		PM ₁₀ , ИФА РАН	M*	PM ₁₀ , ИФА РАН	PM ₁₀ , Спиридоновка МЭМ
12.07	Тихий ветер (1 м/с), В-ВСВ-ВЮВ-ЮЮВ, антициклон, T _{max} **= 33 °С	237	67	36	26
13.07	Штиль или тихий ветер (1 м/с), СЗ-З, антициклон, T _{max} = 35 °С	107	76	43	35
14.07	Тихий ветер (1 м/с), СЗ-СВ-ЗСЗ, антициклон, T _{max} = 35 °С	2962	225	136	43
15.07	Тихий или легкий ветер (1-2 м/с), В-ССВ-ЗСЗ-ВСВ, циклон, после 15 ч – грозы, ливни, T _{max} = 34 °С	2621	175	131	44
16.07	Тихий или легкий ветер (1-2 м/с), ССВ-С-СВ-ССЗ, циклон, T _{max} = 33 °С	3761	250	162	27
17.07	Тихий или легкий ветер (1-2 м/с), СЗ-ЗСЗ-СЗ, наветренная сторона, антициклон, T _{max} = 33 °С	4314	630	302	34
18.07	Штиль или тихий ветер (1 м/с), ВЮВ-С-СЗ; циклон, небольшие дожди, T _{max} = 32 °С. Работы по демонтажу здания не велись (вск)	116	56	31	25
19.07	Штиль или тихий ветер (1 м/с), ЗЮЗ-ЗСЗ-З; наветренная сторона, циклон, T _{max} = 31 °С	2189	267	145	23
20.07	Тихий или легкий ветер (1-2 м/с), СЗ-ЗСЗ; наветренная сторона, циклон, T _{max} = 28 °С	3203	421	226	18
21.07	Тихий или легкий ветер (1-2 м/с), З-ССЗ-ЗСЗ-СЗ; наветренная сторона, циклон, T _{max} = 26 °С	490	132	56	21
22.07	Тихий или легкий ветер (1-2 м/с), С-ССЗ-ЗСЗ; наветренная сторона, антициклон, T _{max} = 23 °С	935	222	99	19
23.07	Штиль или тихий/легкий ветер (1-2 м/с), ЗСЗ-З-СЗ, наветренная сторона, антициклон, кратковременные ливни; T _{max} = 24 °С	2224	221	123	27

Примечание: *М – масса всех аэрозольных частиц (размером до 40 мкм) по привесу на фильтре, **T_{max} – максимальная приземная температура за сутки по данным метеостанции «Балчуг».

Следует отметить, что в первой декаде июля и до 15 числа столичный регион находился под влиянием высокого блокирующего антициклона и характеризовался неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ) I класса опасности, что обусловило достижение нескольких температурных рекордов в Москве (<https://meteoinfo.ru/novosti/18082-v-moskve-temperatura-prevysila-absolyutnyj-maksimum-13-iyunya>; <https://meteoinfo.ru/novosti/18088-14-iyulya-v-moskve-povtoren-absolyutnyj-maksimum-temperatury>) и способствовало формированию условий для накопления в приземном слое атмосферы аэрозольных частиц (см. таблицу). При этом значения ПДКс.с. и ПДКм.р. аэрозольных частиц PM_{10} на городских станциях МЭМ не были превышены. Однако в этот период в ИФА РАН были зарегистрированы аномально высокие значения массовой концентрации частиц PM_{10} , превысившие среднесуточную ПДК в 2–5 раз, а максимально разовую ПДК в 3–14 раз (см. таблицу). Смена синоптической обстановки и кратковременные ливни с грозами, прошедшие 15 июля и обусловившие снижение концентрации взвешенных частиц в атмосфере Московского мегаполиса (<https://mosecom.mos.ru/novosti-i-publikacii/2021/07/proshedshie-v-chetverg-dozhdi-sposobstvovali-snizheniyu-koncentracij-vzveshennykh-chastich-v-atmosfernem-vozduxe/>), не смогли значительно очистить атмосферу от аэрозольного загрязнения в окрестностях ИФА РАН. Рекордные значения среднесуточной концентрации приземного аэрозоля PM_{10} были зарегистрированы 17 июля (302 мкг/м^3) и 20 июля (226 мкг/м^3), в период постепенного снижения максимальных значений дневной температуры воздуха (см. таблицу) и при неустойчивой синоптической обстановке. Решающим фактором экстремального аэрозольного загрязнения приземного воздуха в данном случае явилась интенсивность локального антропогенного источника пылевого аэрозоля. При этом флуктуации концентрации более мелких, субмикронных частиц, входящих во фракцию аэрозоля $PM_{2.5}$, не были значительными, и по величине данные концентрации оказались гораздо ниже соответствующих ПДК (см. рис. 1). Это подтверждает суточный ход массовой и счетной концентраций, представленный на рис. 3 и иллюстрирующий вклад локального источника в уровень аэрозольного загрязнения атмосферы частицами мелкой и крупной фракций.

Оценка мощности выбросов и дальности влияния локального антропогенного источника аэрозольного загрязнения

Для оценки мощности локального антропогенного источника пылевого аэрозоля использовались следующие исходные данные: расстояние от источника до приемника 150 м, ветер в сторону приемника не меняет направление и скорость, которая составляет в указанные дни, по данным метеостанции Балчуг, около 1 м/с при ЗСЗ направлении ветра. Расчет выполнен для крупных частиц размером около 10 мкм, измеренная концентрация которых составила около 300 мкг/м^3 , в предположении только одного канала очищения атмосферы – при сухом осаждении частиц на поверхность со скоростью (по Стоксу) $K=3 \text{ см/с}$ [12].

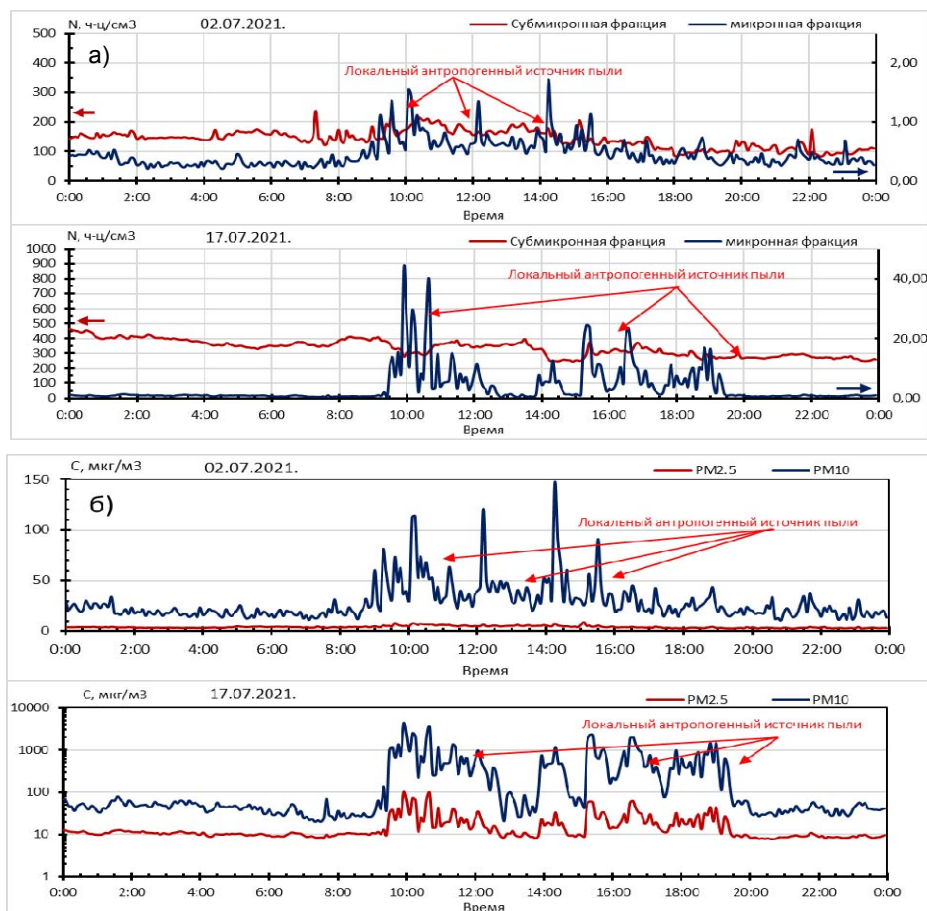


Рис 3. Суточный ход счетной концентрации субмикронной и микронной фракций аэрозольных частиц (а) и массовой концентрации аэрозоля $PM_{2.5}$ и PM_{10} (б) по данным наблюдений в ИФА РАН до и в период интенсивного функционирования локального источника (2 июля и 17 июля, соответственно).

Fig. 3. Diurnal variations of the numbers of submicron and micron particles (a) and mass concentration of aerosols $PM_{2.5}$ and PM_{10} (b) – before and during the period of intensive functioning of the local source (July 2 and July 17, respectively).

Предположим, что точечный источник площадью 1 м^2 поставляет в слой перемешивания (высотой $H=100 \text{ м}$) частицы аэрозоля с такой интенсивностью, что над источником в этом слое постоянно поддерживается их массовая концентрация C_0 . Аэрозоль будет перемещаться от источника в направлении ветра со скоростью 1 м/с , а концентрация примеси $C(t)$ в слое перемешивания по мере движения будет уменьшаться со временем t за счёт осаждения примеси на поверхность, примерно по формуле

$C(t) = C_0 \exp(-Kt/H)$ – без учета Гауссовского расплывания примеси по горизонтали и турбулентного перемешивания по вертикали (например, [1, 10]). Вблизи источника это выражение часто аппроксимируют линейной зависимостью $C(t) = C_0 (1 - Kt/H)$. По рис. 4 хорошо видно, что для пункта наблюдений (на расстоянии 150 м от источника, которое проходит примесью за 150 с) годится линейное приближение, и при средней измеренной концентрации аэрозоля во время эпизода 300 мкг/м^3 источник должен поставлять в слой перемешивания 314 мкг/м^3 . При прекращении работ (в конце рабочего дня, например) очищение атмосферы до уровня ПДК (60 мкг/м^3 для PM_{10}) должно происходить примерно через 3000–5000 с (от 0,75 до 1.4 часа).

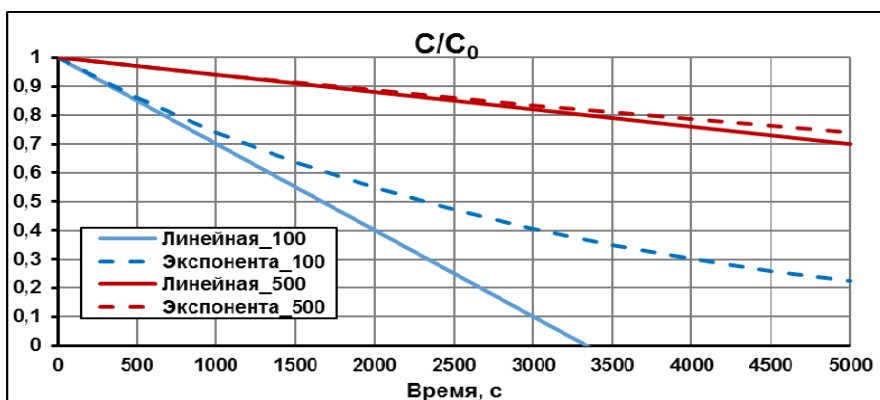


Рис. 4. Уменьшение со временем концентрации аэрозоля (величина, отнесенная к концентрации над источником) при его перемещении в потоке воздуха от источника или при «выключении» источника. Расчеты для $H=100$ м и 500 м.

Fig. 4. Decrease in aerosol concentration over time (the value referred to the concentration above the source) when it is transported in air flow from the source or after the source is “turned off”. Calculations for $H = 100$ m and 500 m.

Грубая оценка мощности выбросов аэрозоля PM_{10} рассматриваемым локальным источником (исходя из того, что за 1 с ветром уносится вся масса аэрозоля, находящаяся в воздухе ($H=100$ м) над источником, а это $31,4 \text{ мг}$) дает значение от 0,56 до $0,80 \text{ кг/сут/м}^2$ при 5–7-часовой работе. Это вещество рассеивается вокруг источника, в зависимости от изменчивости направления и скорости ветра, на расстояния до 3–5 км.

Конечно, в городе последние оценки могут быть несколько завышены из-за сложности рельефа городской застройки. Хотя возможны и обратные эффекты – благодаря образованию каньонов городских улиц с усилением скорости ветра. Кроме того, высота слоя перемешивания летом в дневное время в Москве обычно больше (500 м и более) [7]. При этом примеси будут распространяться на большие расстояния (рис. 4), и время

очищения в районе источника при его «выключении» также будет больше. Однако неравномерное распределение примеси по высоте в приземном слое атмосферы, сложные процессы перемешивания примеси на высотах, больших высоты соседних зданий и другие процессы сильно усложняют расчеты.

Элементный состав аэрозоля от локального антропогенного источника

Период загрязнения атмосферы пылевым аэрозолем в середине июля 2021 года совпал с временем проведения летнего интенсивного мониторинга характеристик приземного аэрозоля в ИФА РАН, что позволило зарегистрировать (посуточно) элементный состав аэрозоля, поступавшего от антропогенного источника, связанного с обрушением старых построек. В разные дни работ элементный состав аэрозольных проб был различным, что демонстрирует рис. 5, на котором представлены вариации состава аэрозольных проб за неделю (с пропуском воскресенья, когда концентрации были очень низки).

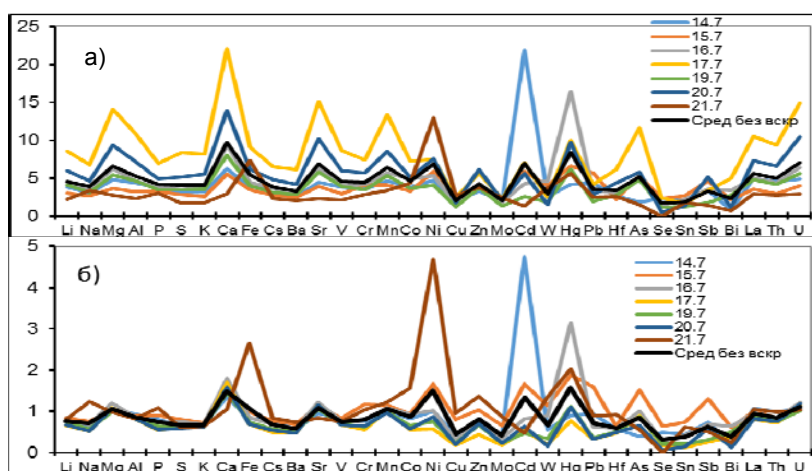


Рис. 5. Отношение содержания элемента в составе аэрозоля в конкретный день к уровню воскресенья: по массовой концентрации (а); по процентному содержанию (б).

Fig. 5. The ratio of an element concentration for a specific day to its concentration for Sunday: by mass (a) and percentage (b) concentrations.

Анализ данных показал, что среднесуточные концентрации кальция и общей пыли в приземном воздухе превышали ПДКс.с. во все дни, кроме воскресенья 18 июля, когда работы на объекте не проводились. Видно, что даже среднесуточные концентрации терригенных элементов

и элементов глобального распространения (например, Mg, P, Al, Fe, Mn, Cr) во время работ были в несколько раз выше, чем в воскресенье, хотя длительность рабочего времени не превышала 8 часов. В эти же дни, наоборот, концентрации типичных антропогенных городских элементов, связанных в основном с эмиссиями от транспорта (например, Pb, Sn, Sb, W, Bi), были близки к уровню выходного дня. В субботу 17 июля наблюдались максимальные значения концентрации всех измеряемых элементов (кроме Ni, Cd, Hg), при этом концентрации Fe и Al были чуть ниже уровня ПДК для этих элементов. По процентному соотношению концентраций элементов в конкретные дни особенно выделяются Cd (14.07), Hg (16.07), Fe, Ni (21.07) – рис. 5б.

Заключение

Локальный городской источник, создавший «антропогенную пыльную бурю» в окрестностях ИФА РАН в дневное время в период с 14 по 23 июля 2021 г., по длительности и амплитуде воздействия оказался сопоставим с эффектом от пыльных бурь в засушливых и опустыненных районах Юга России, аэрозоль от которых иногда регистрируется в Москве.

В этот период зарегистрированы экстремальные среднесуточные значения массовой концентрации частиц PM_{10} и общей массы аэрозоля, превышающие соответствующие уровни ПДК для жилых территорий, а также высокие концентрации ряда отдельных химических элементов терригенного и техногенного генезиса, в частности Ca, Fe, Al, Ni, Cd, Hg.

Выполненные оценки дальности воздействия рассмотренного локального антропогенного источника и времени убывания загрязнения до уровня ПДК показали, что после прекращения работ концентрация загрязнений в приземном аэрозоле должна упасть до уровня ПДК примерно через 1–1.5 часа, при тихом ветре примеси от источника могут быть перенесены на расстояние до 3–5 км, загрязняя ближайшие районы.

Хотя длительность работ по разрушению зданий в Пыжёвском переулке была невелика, таких эпизодов в Москве в разных районах в течение месяца или года может быть множество, что требует их учета с точки зрения экологии города. Уже сейчас вблизи ИФА РАН (в 300–500 м) существует аналогичная застраиваемая площадка, появление и расчистку которой не регистрировали приборы. Возможно, источник был слабее или ветер был не с той стороны, и пострадали другие районы.

Однако вопрос принятия своевременных мер при обнаружении подобных явлений (в т. ч. нарушения правил проведения подобных работ) требует решения, поскольку их последствия представляют опасность для здоровья людей и оказывают негативное воздействие на состояние городских экосистем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант №19-05-50088 (Микромир), а также в рамках Госзадания № АААА-А18-118021290154-4.

Список литературы

1. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
2. Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033-1042.
3. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 3. С. 334-348. DOI: 10.31857/S0002351521030056.
4. Губанова Д.П., Иорданский М.А., Кудерина Т.М., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Минашкин В.М. Элементный состав аэрозолей в приземном воздухе Москвы: сезонные изменения в 2019 и 2020 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, № 6, С. 441-450. DOI: 10.15372/AOO202106.
5. Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лежнев А.Е., Носенко С.В., Золотарева Н.И., Москвина И.Р. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Завод. лаб. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 1. С. 12-22.
6. Кудряшов В.И. Анализ элементного состава атмосферных аэрозолей физическими методами // Проблемы физики атмосферы: Межвуз. сб. Вып. 20. Физика и химия атмосферных аэрозолей. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. С. 97-130.
7. Локощенко М.А. Температурная стратификация нижней атмосферы в Москве // Метеорология и гидрология. 2007. № 1. С. 53-64.
8. Огородников Б.И. Характеристики аэрозолей пограничного слоя атмосферы над Москвой // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32, № 2. С. 163-171.
9. Рентгенофлуоресцентный анализ. Применение в заводских лабораториях: Сборник научных трудов, под. ред. Х. Эрхардта. Перевод с немецкого. М.: Металлургия, 1985. 254 с.
10. Ровинский Ф.Я., Громов С.А., Бурцева Л.В., Парамонов С.Г. Тяжелые металлы: дальний перенос в атмосфере и выпадение с осадками // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. С. 5- 14.
11. Трефилова А.В., Артамонова М.С., Кудерина Т.М., Губанова Д.П., Давыдов К.А., Иорданский М.А., Гречко Е.И., Минашкин В.М. Химический состав и микрофизические характеристики аэрозоля г. Москвы и Подмоскovie в июне 2009 г. и на пике пожаров 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11, № 4. С. 65-82.
12. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 350 с. Fuchs N.A. The mechanics of aerosols. Translated by R.E. Daisley and M. Fuchs. London.: Pergamon Press Publ., 1964. 408 p.
13. Chubarova N.Ye., Androsova Ye.Ye., Lezina Ye.A. The dynamics of the atmospheric pollutants during the Covid-19 pandemic 2020 and their relationship with meteorological conditions in Moscow // Geography, Environment, Sustainability. 2021. <https://doi.org/10.24057/20711-9388-2021-012>.
14. Gubanova D.P., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Kuderina T.M., Iordansky M.A., Sadvovskaya N.V., Anikin P.P. Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 606. P. 012019. DOI:10.1088/1755-1315/606/1/012019.

15. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow // *Urban Climate*. 2020. Vol. 32. P. 100638. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100638>

16. Sokhi R.S. et al. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions // *Environ. Intern.* 2021. Vol. 157, no. 12. P. 106818. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>.

References

1. Byzova N.L., Garger E.K., Ivanov V.N. Jeksperimental'nye issledovanija atmosfernoj diffuzii i raschety rassejanija primesi. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 278 p. [in Russ.].

2. Gubanova D.P., I.B. Belikov, N.Ph. Elansky, A.I. Skorokhod, N.E. Chubarova. Variations in PM_{2.5} surface concentration in Moscow according to observations at MSU meteorological observatory. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018, vol. 31, no 3, pp. 290-299. DOI: 10.1134/S1024856018030065.

3. Gubanova, D.P., Vinogradova, A.A., Iordanskii, M.A., Skorokhod A.I. Time Variations in the Composition of Atmospheric Aerosol in Moscow in Spring 2020. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 297-309. DOI: 10.1134/S0001433821030051.

4. Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Kuderina T.M., Skorokhod A.I., Elanskii N.F., Minashkin V.M. Elemental Composition of Aerosols in the Ground Air of Moscow: Seasonal Changes in 2019 and 2020. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2021, vol. 34, no. 5, pp. 475-482. DOI: 10.1134/S1024856021050122.

5. Karandashev V.K., Turanov A.N., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvina I.R. Use of mass spectrometry with inductively coupled plasma method for element analysis of surrounding medium objects. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]*, 2007, vol. 73, no. 1, pp. 12-22 [in Russ.].

6. Kudryashov V.I. Analysis of the elemental composition atmospheric aerosols by physical methods. In *Problemy fiziki atmosfery: Mezhevuzovskii sbornik (Problems of Atmospheric Physics: Interuniversity Transactions)*, vol. 20: *Fizika i khimiya atmosferykh aerolei (Physics and Chemistry of Atmospheric Aerosols)*. Saint-Petersburg: SPbGU Publ., 1997, pp. 97-130 [in Russ.].

7. Lokoshchenko M.A. Temperature stratification of the lower atmosphere over Moscow: *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no 1, pp. 35-42 [in Russ.].

8. Ogorodnikov B.I. Parameters of aerosols in the atmospheric boundary layer over Moscow. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 163-171 [in Russ.].

9. Rentgenofluorescentnyj analiz. Primenenie v zavodskih laboratorijah. Sbornik nauchnykh trudov, pod. red. H. Jerhardta. Perevod s nemeckogo. M.: Metallurgija Publ., 1985, 254 p. [in Russ.].

10. Rovinskij F.Ja., Gromov S.A., Burceva L.V., Paramonov S.G. Tjazhelye metally: dal'nij perenos v atmosfere i vypadenie s osadkami. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1994, no. 10. pp. 5-14 [in Russ.].

11. Trefilova A.V., Gubanova D.P., Davydov K.A., Iordanskii M.A., Minashkin V.M., Artamonova M.S., Grechko E.I., Kuderina T.M. Chemical Composition and Microphysical Characteristics of Atmospheric Aerosol over Moscow and its Vicinity in June 2009 and During the Fire Peak of 2010. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013, vol. 49, no 7, pp. 765-778. DOI: 10.1134/S0001433813070062.

12. *Fuchs N.A.* The mechanics of aerosols. Translated by R.E. Daisley and M. Fuchs; Edited by C. N. Davies. London. Pergamon Press, 1964, 408 p.
13. *Chubarova N.Ye., Androsova Ye.Ye., Lezina Ye.A.* The dynamics of the atmospheric pollutants during the Covid-19 pandemic 2020 and their relationship with meteorological conditions in Moscow. *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-012.
14. *Gubanova D.P., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Kuderina T.M., Iordansky M.A., Sadovskaya N.V., Anikin P.P.* Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020, 606 012019. DOI:10.1088/1755-1315/606/1/012019.
15. *Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E.* Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow. *Urban Climate*, 2020, vol. 32, pp. 100638. DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100638.
16. *Sokhi R.S. et al.* A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions // *Environ. Intern.* 2021, vol. 157, no. 12, pp. 106818. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106818.

*Поступила 21.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.*

*Submitted 21.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-149-162>

УДК 504.3.054

Анализ загрязнения атмосферы в Приморском крае в 2019–2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA

***Д.Н. Василевский¹, Л.Н. Василевская²,
И.А. Лисина², Б.Б. Мушта²***

*¹Российский НИИ комплексного использования и охраны водных ресурсов,
Дальневосточный филиал, г. Владивосток, Россия;*

*²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия
dwassil@mail.ru*

Обсуждаются результаты моделирования вариаций загрязняющих атмосферу веществ в Приморском крае в 2019 и 2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA. Показано, что среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в 2020 г. по сравнению с 2019 г. уменьшились: двуокиси серы – на 20–35 %; сульфатов – на 5–20 %; угарного газа – на 8–20 %, концентрации твердых частиц РМ (1, 2,5 и 10 мкм) – на 25–40 %. Одной из причин снижения загрязнения воздуха в Приморском крае в 2020 г. является уменьшение антропогенной нагрузки в условиях снижения промышленной активности, уменьшения потоков транспорта как в Приморье, так и на сопредельных территориях КНР. Эпизоды высокого загрязнения в 2019 г. формировались под влиянием трансграничного переноса загрязненных воздушных масс.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, аэрозоли и химические элементы, трансграничный перенос, спутниковый мониторинг, Приморский край

Analysis of air pollution in Primorsky Krai in 2019–2020 according to GMAO/NASA satellite monitoring

***D.N. Vasilevsky¹, L.N. Vasilevskaya²,
I.A. Lisina², B.B. Mushta²***

*¹Far Eastern Branch of Russian Research Institute for the Integrated Use
and Protection of Water Resources, Vladivostok, Russia;*

*²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
dwassil@mail.ru*

The results of modeling variations in atmospheric pollutants over Primorsky Krai in 2019 and 2020 based on GMAO/NASA satellite monitoring data are analyzed. It is shown that average annual concentrations of pollutants in 2020 decreased as compared to 2019: by 20–35% for sulfur dioxide; by 5–20% for sulfates; by 8–20% for carbon monoxide; by 25–40 % for particulate matter PM (1, 2.5, and 10 μm). One of the reasons for the air pollution decline in Primorsky Krai in 2020 is the reduction of anthropogenic load in the context of a decrease in industrial activity and traffic flows both in Primorye

and in the adjacent areas of China. Episodes of high pollution in 2019 were formed under influence of the transboundary transport of polluted air masses.

Keywords: air pollution, aerosol and chemical elements, transboundary transport, satellite monitoring, Primorsky Krai

Введение

Целью данной работы является анализ вариаций загрязняющих атмосферу веществ в отдельных районах Приморского края за 2019 г. и 2020 г. (год локдауна) по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA.

В условиях постоянного роста промышленного производства, а соответственно, и увеличения количества выбросов загрязняющих веществ, мониторинг качества воздуха является одной из главных задач современной метеорологии и экологии. Изменение состава воздуха отражается не только на здоровье людей, но и на всех без исключения природных объектах. Основными антропогенными источниками загрязнения атмосферы являются промышленные предприятия, топливно-энергетический комплекс и транспорт. Немаловажное влияние на пространственное распространение загрязняющих веществ в условиях глобального изменения климата, оказывают региональные циркуляционные процессы.

В России наблюдения за атмосферным загрязнением ведутся на стационарных постах системы экологического мониторинга Росгидромета. Приморский край входит в число регионов со сложной экологической обстановкой, постов регулярного контроля загрязнений мониторинга в сложных орографических условиях недостаточно [8]. Поэтому использование возможностей дистанционного зондирования Земли приобретает особую актуальность для данной территории.

По исследованиям [7], к непрерывно растущему загрязнению атмосферы в городах добавляется загрязнение, приносимое воздушными потоками с сопредельных территорий. При условии относительно небольшого уровня локального загрязнения трансграничный перенос может являться определяющим, что было подтверждено изучением более семисот циклонов, вышедших на территорию края с 1997 по 2009 г. [10]. Результаты оценки эмиссии в Восточной Азии, рассчитанные на основе данных Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), наглядно демонстрируют распространение загрязнений с северо-восточных провинций Китая (с начала стремительного экономического роста промышленного производства) на Корейский полуостров и Приморский край [14].

Материалы и методы

В качестве исходного материала использованы результаты глобального моделирования и усвоения данных (GMAO) при центре космических полетов НАСА [15]. Данные представлены системой наблюдений за Землей GEOS-5, состоящей из группы компонентов модели, включающей

модель общей циркуляции атмосферы (AGCM), модель общей циркуляции океана (OGCM), модель общей циркуляции океан – атмосфера (AOGCM), модель химия – климат (CCM) и модель химического переноса (CTM) [11].

По координатам пяти населенных пунктов сформирована база данных о концентрации загрязняющих веществ на 10 ч местного времени.

Для оценки загрязнения атмосферы были выбраны пункты: Владивосток, Находка, Уссурийск и Посыет. Здесь сосредоточены основные источники эмиссии загрязняющих веществ, поскольку большая часть населения края проживает в южной части и на побережье. Пункт Терней, расположенный на северо-восточном побережье, рассматривался в качестве фоновой зоны, поскольку он относительно мало населен и защищен с юга и запада от источников эмиссии загрязняющих веществ горной системой Сихотэ-Алинь (рис. 1).



Пункт	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.	Численность населения, человек
1.Посыет	42°40′	130°48′	1 757
2.Владивосток	43°07′	131°54′	600 871
3.Уссурийск	43°48′	131°57′	172 942
4.Находка	42°49′	132°53′	142 673
5.Терней	45°02′	136°36′	3 876

Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов.

Fig. 1. Map-scheme of the location of points.

Анализировались две категории загрязняющих веществ: химические соединения – CO (приземная концентрация угарного газа в относительных единицах объема ppbv), SO₂ (приземная концентрация двуокиси серы, мкг/м³); аэрозоли – SO₄с (экстинкция сульфатами, оптическая толщина аэрозолей в т), экстинкция света пылью (плотность оптических частиц на длине волны 550 нм в т); приземная концентрация PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀ (мелкодисперсные частицы диаметром менее 1, 2,5 и 10 мкм, мкг/м³).

По ежедневным данным (на 10 ч местного времени) производился расчет среднемесячных и среднегодовых концентраций загрязняющих веществ в атмосфере над территорией Азиатско-Тихоокеанского региона. Проводился пространственно-временной анализ внутригодового изменения химических соединений и твердых частиц за 2019 и 2020 гг.; исследовались метеорологические условия эпизодов экстремального загрязнения частицами PM_{2,5}.

Результаты и их обсуждение

По результатам глобального моделирования [15] установлены следующие особенности загрязнения воздуха в регионе отдельными газовыми и аэрозольными веществами в 2019 и 2020 годах.

Двуокись серы. Анализ сезонного хода приземной концентрации SO₂ во Владивостоке показал, что максимально высокой в 2019 г. она была в январе–марте (до 13,6 мкг/м³), затем к лету резко уменьшилась до 3,6 мкг/м³, а увеличение началось с конца осени (рис. 2). В 2020 г., в отличие от 2019 г., максимум отмечался в конце года – в декабре (10,7 мкг/м³); в остальном ход был похож на 2019 г., однако концентрации SO₂ были меньшими.

В Посьете в 2019 г. основные черты сезонного хода совпадают с Владивостоком, однако пик концентрации двуокиси серы зафиксирован в январе (19,4 мкг/м³, это абсолютный среднемесячный экстремум на исследуемой территории), а минимум – в весенне-летний период (от 1,4 до 4,9 мкг/м³). В 2020 г. максимум пришелся на декабрь и составил 15,9 мкг/м³.

В Находке и Уссурийске изменения среднемесячных концентраций в течение 2019 и 2020 гг. схожи с владивостокскими, однако в холодное время года в Находке они почти в 1,5 раза ниже, а в Уссурийске практически равны владивостокским.

По сравнению с другими пунктами, атмосфера в районе Тернея характеризуется низкими концентрациями двуокиси серы, составляющими в холодный период года 4,9–6,4, а в теплый – всего 0,3–0,5 мкг/м³.

В целом, уровень концентраций двуокиси серы в течение холодного периода в 3–6 раз превышает таковую в теплый период года; юго-западные районы территории (Посьет) наиболее загрязнены по сравнению с северо-восточными (Терней). Выявленная картина загрязнения

двуокисью серы на территории Приморского края следует сезонному характеру изменения муссонных потоков: в холодный период континентальные ветры направлены из центров эмиссии SO_2 в Северо-Восточном Китае, а в теплый – с прилегающей, относительно чистой морской акватории.

В 2020 г. по сравнению с 2019 г. среднегодовые концентрации двуокиси серы были меньше: в Уссурийске – на 39 %, Тернее – на 26 %, Находке – на 23 %, Владивостоке – на 21 %, Посъете – на 19 %. Это может быть обусловлено снижением промышленного производства на территории КНР из-за вспышки эпидемии коронавируса [6].

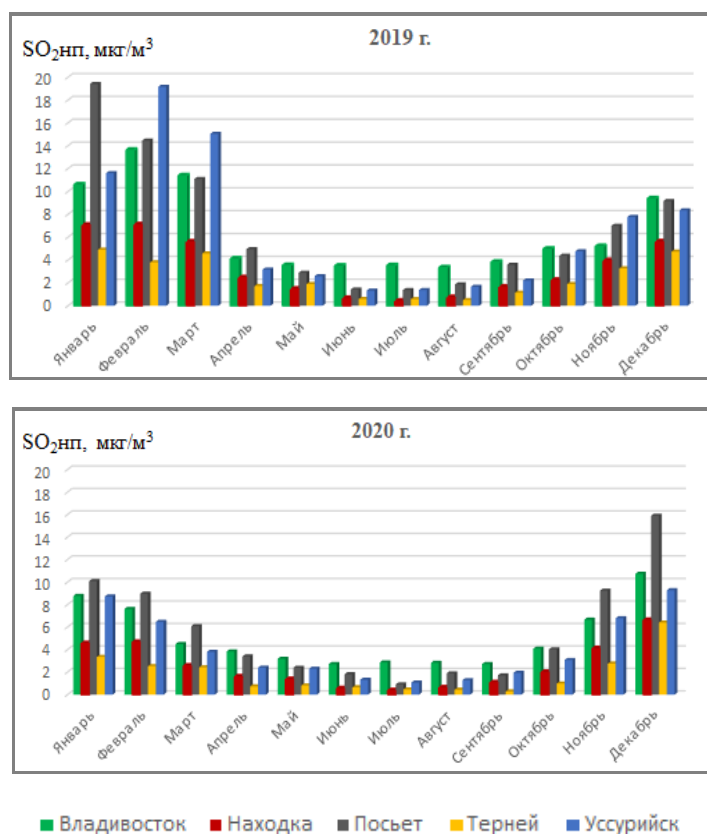


Рис. 2. Внутригодовой ход двуокиси серы в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 2. Intra-annual course of sulfur dioxide in the points of the Primorsky Krai in 2019–2020.

$\text{SO}_{4\text{ЭС}}$ – экстинкция сульфатами. В 2019 г. на исследуемой территории основной максимум среднемесячной концентрации аэрозолей – от 0,18 до 0,22 т – пришелся на летние месяцы (рис. 3), минимальные

концентрации получены для января–февраля и сентября–ноября (0,06–0,08 т). В атмосфере Тернея среднемесячные значения концентрации сульфатов самые незначительные (0,05–0,17 т) по сравнению с другими пунктами.

В 2020 г. среднемесячные концентрации $\text{SO}_4\text{эс}$ характеризуются значительной изменчивостью: максимальные величины наблюдались в июне (0,22 т), а вторичные максимумы – в марте (0,19 т) и августе–сентябре (0,15 т). Среднегодовые концентрации в 2020 г. в сравнении с 2019 г. были ниже: в Посьете, Находке и Владивостоке на 4–8 %, Уссурийске – на 10 %, Тернее – на 20 %.

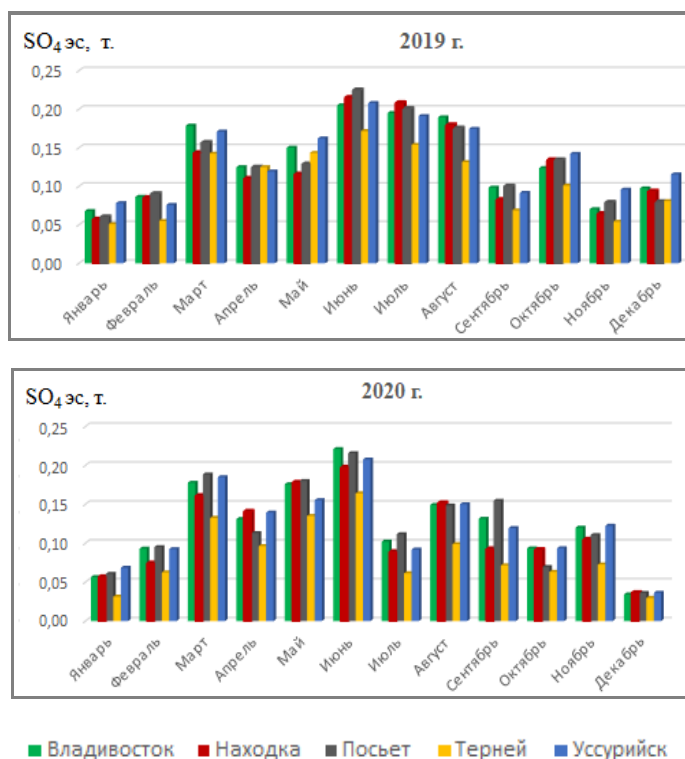


Рис. 3. Внутригодовой ход среднемесячной концентрации сульфатов в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 3. Intra-annual variation of the average monthly concentration of sulfates in the points of Primorsky Krai in 2019–2020.

Рассчитанное максимальное содержание сульфатов в период летнего дальневосточного муссона обусловлено повышенной влажностью воздуха [9], при которой химические реакции образования сульфатов происходят наиболее интенсивно. Подтверждением тому является работа ряда авторов [4], в которой показано, что пероксид водорода во влажной атмосфере

на порядок увеличивает образование сульфатов по сравнению с сухой атмосферой.

В силу особенностей исследуемой территории, в летний период наблюдается значительное поступление сульфатов от природных источников (морской аэрозоль), обусловленное господствующими ветрами морских направлений. Сезонная и межгодовая изменчивость концентраций сульфатов зависит как от влажности воздуха, так и от ветрового режима на побережье (сильный ветер и волнение моря увеличивают поступление сульфатов в атмосферу).

Угарный газ CO. В 2020 г. приземные концентрации угарного газа оказались меньше по сравнению с 2019 г. во всех рассматриваемых пунктах: в Посьете – на 6 %, Находке – на 8 %, Владивостоке – на 12 %, Уссурийске – на 21 %. Для среднемесячных концентраций угарного газа характерен максимум в зимний период, минимум – в летний сезон (рис. 4).

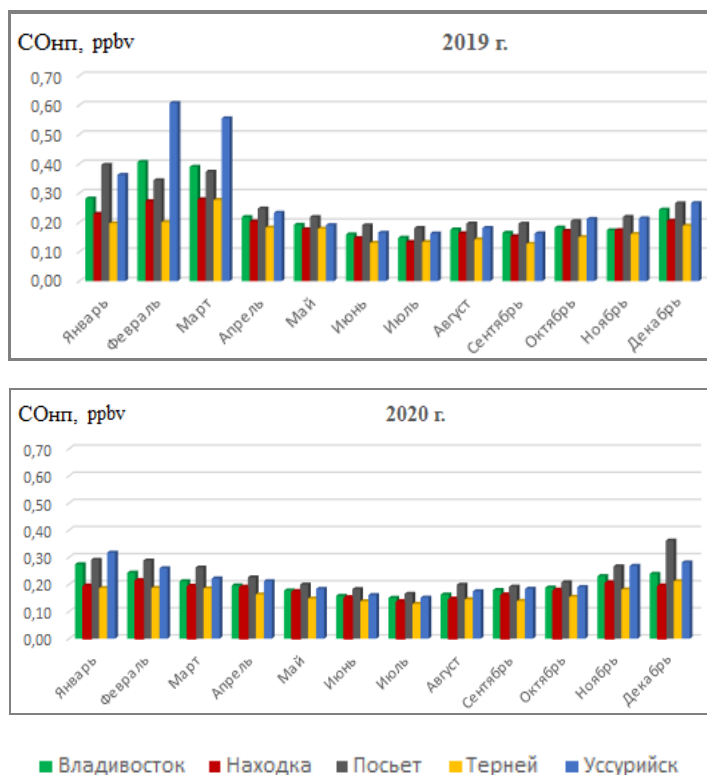


Рис. 4. Внутригодовой ход среднемесячной концентрации угарного газа в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 4. Intra-annual variation of the average monthly concentration of carbon monoxide in the points of Primorsky Krai in 2019–2020.

Плотность оптических частиц (550 нм). Внутригодовое распределение среднемесячной плотности оптических частиц в 2019 и 2020 гг. в атмосфере исследуемой территории различается (рис. 5). Так, в 2019 г. с января по май наблюдалось значительное увеличение плотности оптических частиц от 0,03 до 0,08 т. В 2020 г. увеличение АОТ происходило с января по апрель, достигнув максимального значения около 0,08 т. Постепенно концентрация уменьшалась до июля, составляя 0,02 т, и сохранялась до декабря в пределах от 0,02 до 0,03 т. В целом, в весенние месяцы среднемесячная плотность оптических частиц является наибольшей. Поскольку значительный вклад в этот показатель загрязнения, помимо антропогенных выбросов, вносят пожары и пыльные бури, то внутригодовое распределение оптической толщины аэрозолей определяется особенностями повторяемости этих явлений [8]. Пыльные бури над Приморьем наблюдаются при ветрах континентальных направлений и отсутствии снежного и растительного покрова, т. е. в весенний период.

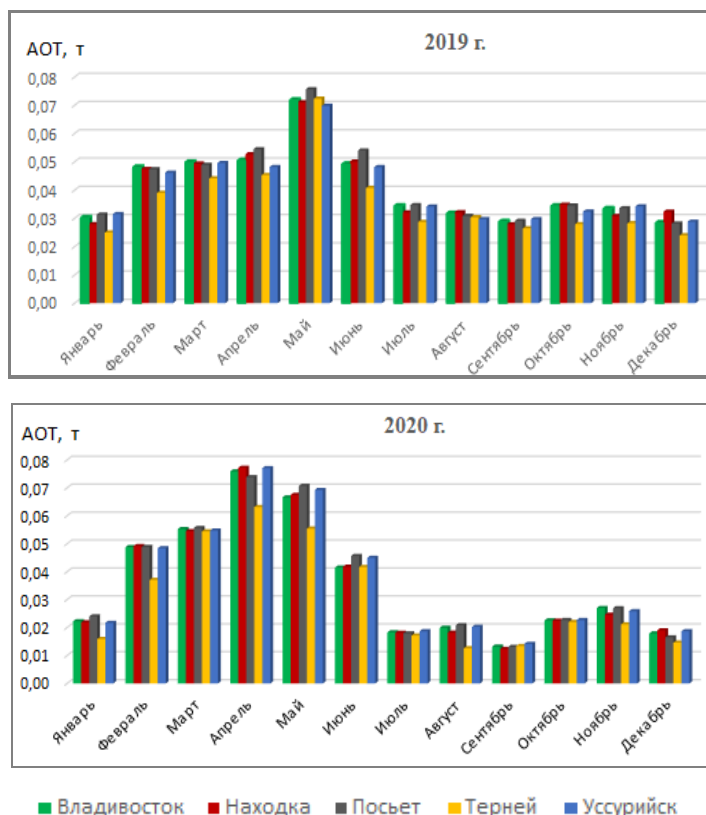


Рис. 5. Внутригодовой ход среднемесячной концентрации плотности оптических частиц в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 5. Intra-annual variation of the average monthly density of optical particles in the points of the Primorsky Krai in 2019–2020.

Взвешенные частицы РМ. Мелкодисперсные взвешенные частицы (РМ) размера 1, 2,5 и 10 мкм рекомендованы ВОЗ для оценки качества воздуха [5]. Они могут находиться в атмосферном воздухе длительное время и переноситься по воздуху на большие расстояния [2]. По модельным данным 2019–2020 гг., крупные частицы РМ₁₀ имеют наибольший вклад в аэрозольное загрязнение атмосферы Приморья – от 45 до 49 %, частицы РМ_{2,5} – от 28 до 30 %, РМ₁ – от 22 до 24 %.

РМ₁. В 2019 г. наибольшие концентрации РМ₁ на всех станциях наблюдались в январе–марте (от 34,5 до 74,5 мкг/м³), а с мая по декабрь составляли от 4,4 до 12,0 мкг/м³ (рис. 6). В 2020 г. внутригодовое распределение разительно отличалось от предыдущего года: в январе–марте концентрации были от 14,5 до 15,6 мкг/м³, в мае–октябре снизились до 5,5–8,7 мкг/м³, а в ноябре–декабре – до 15,8–23,4 мкг/м³. В целом, в 2020 г. среднегодовые концентрации частиц РМ₁ были ниже во Владивостоке и Уссурийске на 40–44 %, Находке и Посьете – на 31 %, Тернее – на 25 %. А относительный вклад в общее количество твердых частиц практически не изменился.

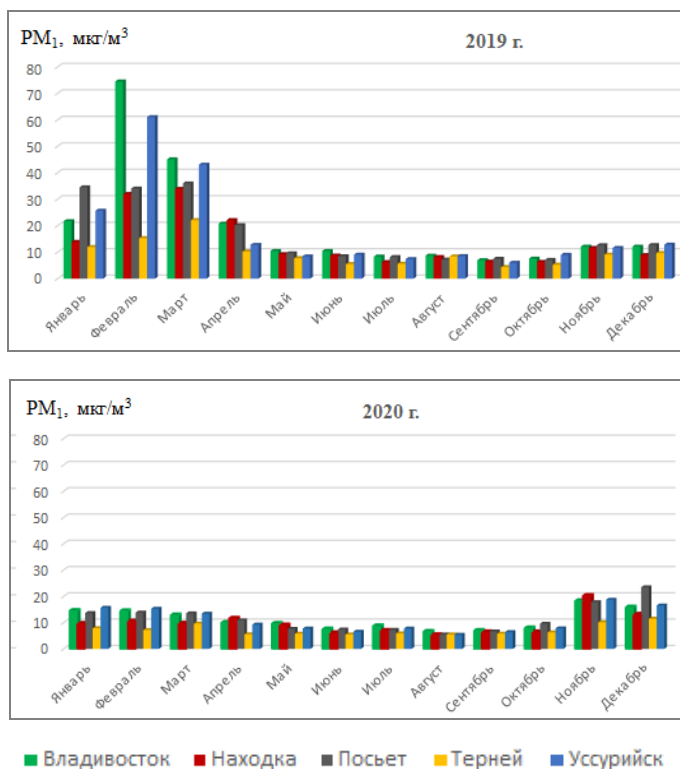


Рис. 6. Внутригодовой ход среднемесячной концентрации РМ₁ в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 6. Intra-annual variation of the average monthly concentration of РМ₁ in the points of Primorsky Krai in 2019–2020.

PM_{2.5}. Внутригодовое распределение среднemesячных концентраций этих частиц за 2019 и 2020 гг. схоже с распределением частиц PM₁. В 2019 г. концентрация PM_{2.5} менялась от 16,5 до 71,0 мкг/м³ (максимум рассчитан для Владивостока– 87,7 мкг/м³ в феврале), а в 2020 г. – от 10,7 до 25,0 мкг/м³ (максимальное значение 28,2 мкг/м³ в Посьете в декабре). По аналогии с более мелкими частицами (PM₁) в 2020 г. концентрация PM_{2.5} была ниже на 26–43 % (рис. 7).

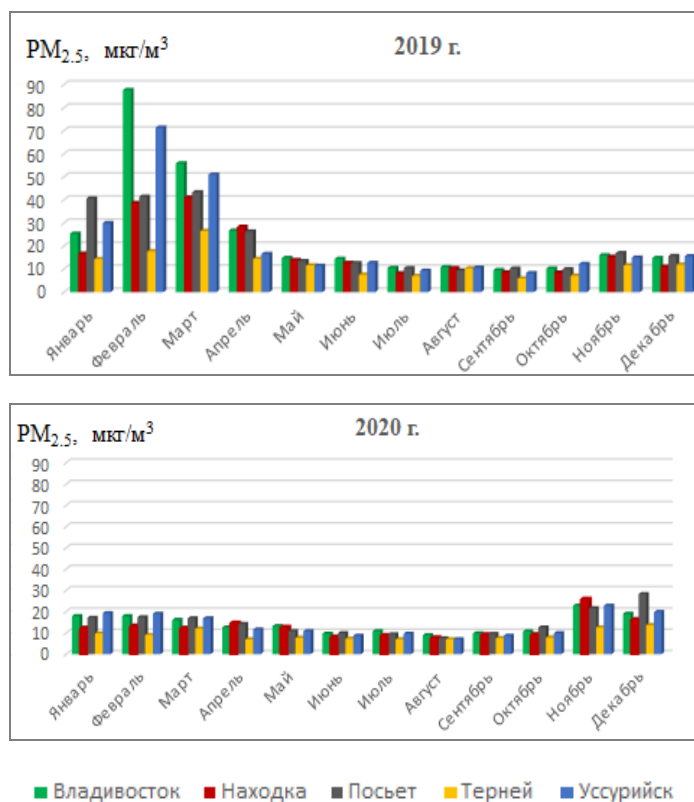


Рис. 7. Внутригодовой ход среднemesячной концентрации PM_{2.5} в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 7. Intra-annual variation of the average monthly concentration of PM_{2.5} in the points of Primorsky Krai in 2019–2020.

В городах Приморья в загрязнение атмосферы PM_{2.5} весомый вклад вносят частицы дорожно-транспортного происхождения, поскольку большое количество автотранспорта не соответствует современным экологическим стандартам [3]. По исследованиям [12] установлено, что PM_{2.5} дорожно-транспортного происхождения оказывает более негативное влияние на здоровье человека, чем аналогичная промышленная пыль. Кроме того, Китай является одной из стран, страдающих от высокого

загрязнения $PM_{2,5}$ [13]. В силу географического расположения и муссонной циркуляции Приморский край находится на пути смещения загрязненных воздушных масс из КНР.

При адвекции воздушных масс примеси выводятся из воздуха атмосферными осадками. На территории Приморья бесснежной зимой 2018–2019 гг. с декабря по март атмосферные осадки отсутствовали [1]. Среднемесячные концентрации $PM_{2,5}$ в январе–марте 2019 г. в 2–7 раз превышали нормы ВОЗ [1] во всех пяти пунктах Приморья.

Анализ метеорологических условий рассчитанного экстремального загрязнения в феврале 2019 г. показал, что 18 февраля на территорию Приморского края осуществлялся интенсивный перенос воздушных масс с соседней территории КНР; 19 февраля территория была под воздействием малоградиентного поля повышенного давления. По данным радиозондирования в северном пригороде Владивостока ночью 18 февраля наблюдалась приземная инверсия в слое 0–150 м интенсивностью 0,8 °С, днем сохранялась термическая устойчивость. Ночью 19 февраля при скорости ветра в пограничном слое 1–3 м/с приземная инверсия (0–170 м) усилилась почти до 3 °С. Ослабевая, приземная инверсия в слое 0–120 м сохранялась и днем. Такие метеорологические условия способствовали накоплению загрязняющих веществ, концентрации $PM_{2,5}$ увеличились по расчетам до 412 мкг/м³.

В другом эпизоде загрязнения (28 февраля 2019 г.) синоптические условия были похожи на условия 19 февраля: на фоне малоградиентного поля повышенного давления происходило накопление частиц при сохранении слабой приземной инверсии в слое 0–100 м. По модельным расчетам концентрация $PM_{2,5}$ увеличилась до 462 мкг/м³.

PM₁₀. Модельные расчеты показали, что изменчивость концентраций PM_{10} в исследуемые годы имеет общие черты с колебаниями более мелких частиц (PM_1 и $PM_{2,5}$ мкм) (рис. 8). В 2020 г. по сравнению с 2019 г. среднегодовые концентрации PM_{10} оказались меньше во Владивостоке на 37 %, Уссурийске – на 29 %, Находке, Посъете и Тернее – на 20 %.

По-видимому, увеличение концентраций взвешенных частиц в холодный период 2019 г. обусловлено как локальными метеорологическими условиями, в т. ч. бесснежной зимой, так и трансграничным переносом из промышленных районов Северо-Восточного Китая.

Заключение

Данные моделирования концентраций аэрозолей и химических веществ в 10 ч местного времени в Приморском крае показали, что среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в 2020 г. по сравнению с 2019 г. уменьшились: двуокиси серы – на 20–35 %; сульфатов – на 5–20 %; угарного газа – на 8–20 %; концентрации твердых частиц PM (1, 2,5 и 10 мкм) – на 25–40 %.

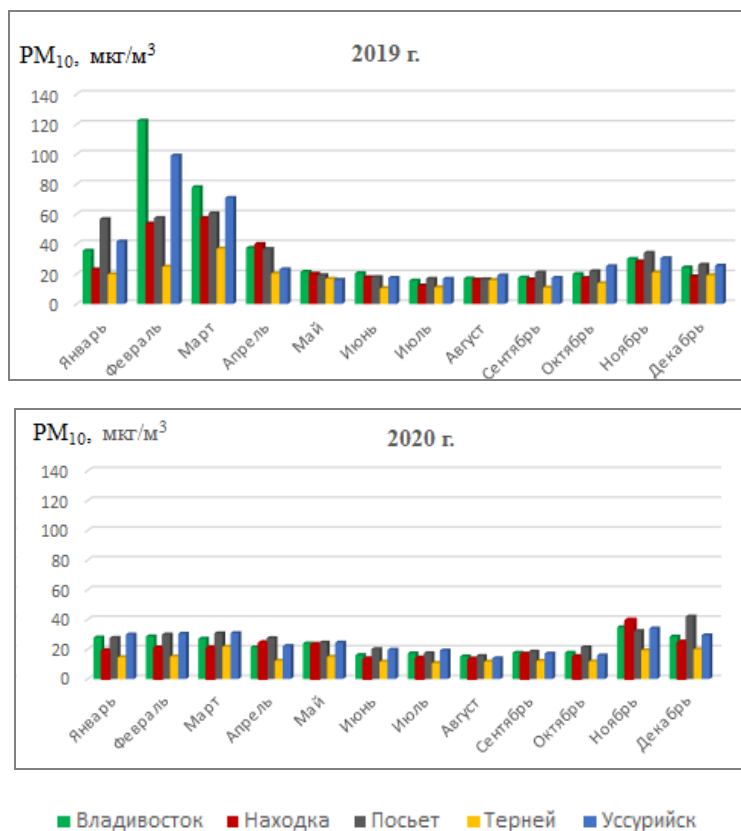


Рис. 8. Внутригодовой ход среднемесячной концентрации PM_{10} в пунктах Приморского края в 2019–2020 гг.

Fig. 8. Intra-annual variation of the average monthly concentration of PM_{10} in the points of Primorsky Krai in 2019–2020.

Одной из причин снижения загрязнения воздуха в Приморском крае в 2020 г. является уменьшение антропогенной нагрузки в условиях пандемии коронавируса COVID-19 и снижения промышленной активности, уменьшения потоков автомобильного и авиационного транспорта как в Приморье, так и на сопредельных территориях КНР. Эпизоды высокого загрязнения в 2019 г. формировались под влиянием трансграничного переноса загрязненных воздушных масс.

Список литературы

1. Василевская Л.Н., Василевский Д.Н. Особенности формирования бесснежной зимы 2018-2019 гг. на юге Приморского края // Материалы III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 2019. С. 143-145.

2. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Значение для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. Всемирная организация здравоохранения, Европейское региональное бюро. 2013. https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf/

3. Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2020 году. Владивосток. 2021. <https://www.primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/environment/protivodeystvie-korrupsii>

4. Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. Источники сульфатов в карбоновых частицах аэрозоля в городской атмосфере (на примере Иркутска) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 3. С. 52-61.

5. Загрязнение атмосферного воздуха. Всемирная организация здравоохранения. [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

6. Китай из-за вспышки эпидемии коронавируса снизил вредные выбросы в атмосферу на четверть. <https://foxtime.ru/kitaj-iz-za-vspyshki-epidemii-koronavirusa-snizil-vrednye-vybrosy-v-atmosferu-na-chetvert/>

7. Кондратьев И.И. Атмосферный трансграничный перенос загрязняющих веществ из центров эмиссии восточной Азии на юг Дальневосточного региона России // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 107-112.

8. Кондратьев И.И. Трансграничный атмосферный перенос аэрозоля и кислотных осадков на Дальний Восток России. Владивосток: Дальнаука, 2014. 300 с.

9. Кубай Б.В., Мендельсон Э.А., Цурикова Т.В. Изменяется ли климат Приморского края. Владивосток: Приморское УГМС, 2012. 130 с.

10. Муха Д.Э., Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И. Трансграничный перенос кислотных осадков циклонами Восточной Азии на юг Дальнего Востока // Вестник РАН. 2011. Т. 81. № 2. С. 111-119.

11. Global Modeling and Assimilation Office. https://gmao.gsfc.nasa.gov/GEOS_systems

12. Henning F., Fuks K., Moebus S. et al. Associations between source-specific particulate matter air pollution and hs-CRP: local traffic and industrial emissions // Environ. Health Perspect. 2014. Vol. 122, no. 7. P. 703-710.

13. Maji K.J. Substantial changes in PM_{2.5} pollution and corresponding premature deaths across China during 2015–2019: A model prospective (Article) // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 729. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138838.

14. Park S.U., Lee E.H. Long-range transport contribution to dry deposition of acid pollutants in South Korea // Atmos. Environ. 2003. Vol. 37. P. 3967-3980.

15. US National Weather Service. <https://earth.nullschool.net/ru/>

References

1. Vasilevskaya L.N., Vasilevskiy D.N. Osobennosti formirovaniya bessnezhnoy zimy 2018-2019 gg. na yuge Primorskogo kraya. Materialy III Vserossiyskoy konferentsii «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya», 2019, pp. 143-145 [in Russ.].

2. Vozdeystviye vzveshennykh chastits na zdorov'ye. Znachenije dlya razrabotki politiki v stranakh Vostochnoy Yevropy, Kavkaza i Tsentral'noy Azii. Vsemirnaya organizatsiya zdavookhraneniya, Yevropeyskoye regional'noye byuro. Available at: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf/ [in Russ.].

3. Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Primorskom kraye v 2020 godu. Vladivostok. 2021. Available at: <https://www.primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/environment/protivodeystvie-korrupsii> [in Russ.].
4. Yermakov A.N., Aloyan A.E., Arutyunyan V.O. Sulfate sources in carbonaceous aerosol particles in the urban atmosphere: the case of Irkutsk. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 271-280.
5. Zagryazneniye atmosfernogo vozdukha. Vsemirnaya organizatsiya zdra-vookhraneniya. Available at: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [in Russ.].
6. Kitay iz-za vspyshki epidemii koronavirusa snizil vrednyye vybrosy v atmosfere na chetvert'. Available at: <https://foxtime.ru/kitaj-iz-za-vspyshki-epidemii-koronavirusa-snizil-vrednye-vybrosy-v-atmosferu-na-chetvert> [in Russ.].
7. Kondrat'yev I.I. Atmosfernyy transgranichnyy perenos zagryaznyayushchikh veshchestv iz tsentrov emissii vostochnoy Azii na yug Dal'nevostochnogo regiona Rossii. *Vestnik DVO RAN [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2008, no. 1, pp.107-112 [in Russ.].
8. Kondrat'yev I.I. Transgranichnyy atmosfernyy perenos aerolya i kislotnykh osadkov na Dal'niy Vostok Rossii. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2014, 300 p. [in Russ.].
9. Kubay B.V., Mendel'son E.A., Tsurikova T.V. Izmenyayetsya li klimat Primorskogo kraya. FBGU Primorskoye upravleniye po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy, Vladivostok, 2012, 130 p. [in Russ.].
10. Mukha D.E., Kondrat'yev I.I., Mezentseva L.I. Transgranichnyy perenos kislotnykh osadkov tsiklonami Vostochnoy Azii na yug Dal'nego Vostoka // *Vestnik RAN [Vestnik of Russian Academy of Sciences]*, 2011, vol. 81, no 2, pp. 111-119 [in Russ.].
11. Global Modeling and Assimilation Office. Available at: https://gmao.gsfc.nasa.gov/GEOS_systems.
12. Henning F., Fuks K., Moebus S. et al. Associations between sourespecific particulate matter air pollution and hs-CRP: local traffic and industrial emissions. *Environ. Health Perspect.* 2014, vol. 122, no. 7, pp. 703-710.
13. Maji K.J. Substantial changes in PM_{2.5} pollution and corresponding premature deaths across China during 2015–2019: A model prospective (Article). *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 729. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138838.
14. Park S.U., Lee E.H. Long-range transport contribution to dry deposition of acid pollutants in South Korea. *Atmos. Environ.*, 2003, vol. 37, pp. 3967-3980.
15. US National Weather Service. Available at: <https://earth.nullschool.net/ru/>

Поступила 20.06.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 20.06.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-163-176>

УДК 551.5

**Обзор текущих и ожидаемых
сезонных климатических аномалий на зиму 2021/2022 гг.
с оценками возможных последствий в сферах экономики
по заключению метеослужб стран СНГ**

***В.М. Хан^{1,2}, Р.М. Вильфанд¹, С.В. Емелина^{1,2}, Е.С. Каверина¹,
И.А. Куликова¹, К.А. Сумерова¹, В.А. Тищенко¹, М.А. Толстых^{1,3}***

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия;

³ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука, г. Москва, Россия
khan@mecon.ru

По результатам анализа метеослужб стран СНГ представлены оценки успешности консенсусного прогноза по территории Северной Евразии на лето 2021 года; обсуждаются результаты мониторинга циркуляционных условий в стратосфере и тропосфере за прошедший летний сезон; приводятся данные климатического мониторинга и сезонного прогнозирования по текущей ситуации; представлен консенсусный прогноз в вероятностной форме для температуры воздуха и осадков на предстоящий зимний сезон 2021/2022 гг. по территории Северной Евразии и обсуждаются возможные последствия воздействий ожидаемых аномалий метеорологических параметров на сферы экономики и социальной жизни.

Ключевые слова: Северо-Евразийский климатический форум, Северо-Евразийский климатический центр, консенсусный прогноз, температура воздуха, осадки, крупномасштабная атмосферная циркуляция, гидродинамические модели, температура поверхности океана, воздействия

**Overview of current and expected
seasonal climatic anomalies for the winter 2021/2022
with their possible impact on the economy,
as estimated by the meteorological services
of the CIS countries**

***V.M. Khan^{1,2}, R.M. Vil'fand¹, S.V. Emelina^{1,2}, E.S. Kaverina¹,
I.A. Kulikova¹, K.A. Sumerova¹, V.A. Tishchenko¹, M.A. Tolstykh^{1,3}***

¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia
khan@mecon.ru

Based on assessments of the meteorological services of the CIS countries, the skill scores of the consensus forecast for the territory of Northern Eurasia for the summer of 2021 are presented. The results of monitoring circulation patterns in the stratosphere and troposphere over the past summer season are discussed. Climate monitoring and seasonal forecasting results for the current situation are presented. A probabilistic consensus forecast for air temperature and precipitation is presented for the upcoming winter season 2021/2022 in Northern Eurasia. Possible consequences of the impact of the expected anomalies of meteorological parameters on the economy sectors and social life are discussed.

Keywords: North Eurasian Climate Forum, North Eurasian Climate Center, consensus forecast, air temperature, precipitation, large-scale atmospheric circulation, hydrodynamic models, sea surface temperature, impacts

Введение

Северо-Евразийский климатический центр [1, 4, 8] провел 21-ю сессию Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-21) в форме параллельной секции в рамках международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2021 в период с 22 по 26 ноября 2021 г., посвященных памяти члена-корреспондента РАН Василия Николаевича Лыковского. Конференция, школа и СЕАКОФ-21 прошли в смешанном формате, очно и в онлайн режиме. В СЕАКОФ-21 приняли участие эксперты из метеослужб и исследовательских центров стран СНГ и дальнего зарубежья, а также ученые, преподаватели, аспиранты и студенты высших учебных заведений со специализацией в области метеорологии и климатологии и другие заинтересованные лица. Всего на форуме были зарегистрированы 70 участников.

В ходе работы был представлен обзор научно-оперативной деятельности СЕАКЦ в 2021 г.; анализ успешности консенсусного прогноза на лето 2021 г.; обсуждались результаты мониторинга циркуляционных условий в стратосфере и тропосфере за летний сезон 2021 г.; приводились данные климатического мониторинга и сезонного прогнозирования по результатам оценок метеослужб стран СНГ; обсуждались возможные последствия воздействий ожидаемых аномалий метеопараметров на сферы экономики и социальной жизни. В ходе СЕАКОФ-21 при участии экспертов метеослужб стран СНГ составлен консенсусный прогноз в вероятностной форме для температуры воздуха и осадков на предстоящий зимний сезон 2021/2022 гг. по территории Северной Евразии.

Для справки: консенсусный прогноз носит консультативный характер и может применяться к конкретным регионам с учетом предсказуемости атмосферных процессов, региональных климатических особенностей и качества современных гидродинамических моделей.

В рамках развития методов составления консенсусных прогнозов на сессиях СЕАКОФ [6, 9] впервые экспериментальные прогнозы по модели

INM-CM05 использовались при оценках состояния климатических условий на предстоящий сезон. Комплексование прогностической информации осуществлялось по шести моделям, а именно с участием:

- Атмосферная модель ПЛАВ [7]
- Атмосферная модель ГГО [5]
- Климатическая модель INM-CM05 [2]
- Совместная модель океана и атмосферы Токийского климатического центра (Tokyo Climate Centre, TCC)
- Совместная модель океана и атмосферы CFS2 Климатического центра прогнозов США (Climate Prediction Centre, CPC)
- Совместная модель океана и атмосферы Метеослужбы Канады (ECCC/MSM, модель CanSIPSv2)

Весы моделей при комплексовании в каждой точке сетки определялись исходя из успешности ретроспективных прогнозов.

Результаты мониторинга атмосферной циркуляции летнего сезона 2021года

По данным мониторинга климатической системы, в стратосфере (на уровне АТ10) в осредненном поле за летний период сохранялся летний режим циркуляции, во второй половине июля полярный антициклон стал ослабевать. Над полюсом интенсивность антициклона была в норме, положительные аномалии до +4 дам сформировались в канадском секторе Арктики, а на большей части Северной Евразии аномалии геопотенциала были отрицательными, наиболее значительными на побережье Охотского моря. Перестройка на зимний режим циркуляции произошла в начале сентября, зональный ветер на уровне АТ10 поменял направление на западное (с запада на восток).

В средней тропосфере летом на уровне АТ500 гПа (рис. 1а) околполярный циклон был глубоким, центр его располагался над полюсом. Интенсивная антициклональная деятельность (аномалии +7 дам восточнее Исландии, +8 дам в центральной части Европейской территории России (ЕТР) и +6 дам в центре Восточной Сибири) деформировала ложбины, связанные с циклоном. Положение их было близким к климатическому, а интенсивность нормальной и повышенной только в северных частях ложбин (-3 дам в канадском секторе Арктики, -4 дам западнее Новой Земли и -5 дам над полюсом).

Североатлантическое колебание (NAO) в июне имело положительную фазу – преобладали зональные процессы над севером Атлантического океана. Арктическая осцилляция (АО) имела положительные значения в июне, что говорит об усилении зональных процессов, и отрицательные – в июле и в августе, когда частые процессы блокирования нарушали смещение циклонов с запада на восток и преобладали меридиональные процессы. Полярное колебание (POL) имело положительную фазу

в июле, а в августе его значения были отрицательными. Индекс **WP** был отрицательным в июне и слабо отрицательным в августе, что говорит об усилении Субтропического максимума и дефиците осадков на Камчатке и небольших отрицательных аномалиях температуры на Чукотке. Тихоокеанское-Североамериканское колебание (**PNA**) имело положительную фазу в июне и июле, самые высокие значения индекса наблюдались в июне, когда наиболее четко были выражены оба центра действия атмосферы на уровне AT500. По данным Климатического и прогностического центра CPC NOAA, летом 2021 г. наблюдалась нейтральная фаза Эль-Ниньо.

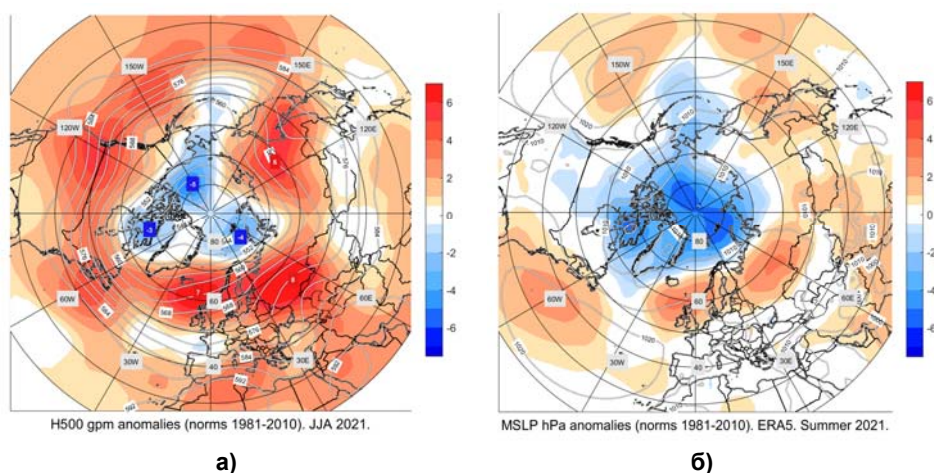


Рис. 1. Карта аномалий относительно периода 1981–2010 гг. и значений, осредненных за летний сезон 2021 г.: геопотенциала на поверхности AT500 (а); приземного давления, приведенного к уровню моря (б). По данным реанализа ERA5.

Fig. 1. Anomalies of the averaged over the summer season 2021: geopotential at H500 hPa (a); sea level pressure (б) based on to ERA5 reanalysis data (reference period 1981–2010).

У земной поверхности (рис. 1б) в атлантической паре центров действия атмосферы Азорский максимум был обширным, центр его располагался западнее Азорских островов, более интенсивными были его западные гребни. Положение Исландского минимума в течение сезона было нестабильным. В результате частых процессов блокирования в высоких широтах Северного полушария и нарушения траекторий смещения циклонов, над полюсом происходила активная циклоническая деятельность, захватывающая северные районы Сибири. Над ЕТР, Уралом и южными районами Сибири преобладали антициклоны. В Тихом океане ведущая роль в циркуляционной деятельности принадлежала Субтропическому антициклону, обширный и интенсивный, он занимал умеренные и субтропические широты океана. Алеутский минимум занимал близкое к климатическому положение и был глубоким.

Успешность прогнозов температуры воздуха и осадков за лето 2021 года

В летний сезон обширная зона положительных аномалий температуры воздуха занимала практически всю ЕТР, только на востоке Коми температурный фон был в норме (рис. 26). Над ЕТР в средней тропосфере преобладали меридиональные процессы, связанные с частыми процессами блокирования, которые обусловили волны тепла. Согласно консенсусному прогнозу (рис. 2а) температура выше нормы ожидалась на северо-востоке ЕТР и в южной половине региона, на северо-западе ЕТР и центре – около нормы, а в Ленинградской области прогнозировались отрицательные аномалии температуры. В республиках Беларусь, Украина и Молдова среднесезонная температура воздуха превысила климатическую норму или была близка к ней, что было отражено в прогнозе.

Консенсусный прогноз по температуре воздуха для территории Средней Азии оправдался хорошо. На большей части Республики Казахстан температурный фон оказался выше нормы, особенно в западных областях. Около нормы температура сохранялась на северо-востоке республики. На остальной территории Среднеазиатских республик средняя за сезон температура воздуха была выше климатической нормы, и только в центральных районах Киргизии и востоке Таджикистана близка к ней.

По фактическим данным в российском секторе Арктики аномалии были положительными. В указанных выше северных регионах прогноз полностью оправдался.

В средней тропосфере большую часть летнего сезона был нарушен зональный характер циркуляции над Восточной Сибирью. Рекордно высокие температуры воздуха в Якутии отмечались во второй половине июня, начале июля и отдельные дни августа. Значительно теплее нормы прошедший летний сезон оказался на востоке Красноярского края, западной и южной половинах Якутии, на юге и в центре Дальнего Востока Российской Федерации (ДВР). В этих регионах прогноз оказался успешным только на северо-западе и центре Якутии и юге ДВР. Холоднее обычного было на Чукотке, прогнозировался температурный фон, близкий к норме.

На юге Западной и Центральной Сибири температурный фон был близок к нормальному, лишь на юге Бурятии наблюдались небольшие отрицательные аномалии, прогноз в этих районах был успешен.

Количество осадков выше нормы в летний сезон 2021 года отмечалось на юго-востоке Украины, в Крыму и на западе ЮФО (рис. 36), прогноз в этом регионе оказался неверным (рис. 3а).

Хорошо воспроизведен избыток осадков в восточной части Ненецкого АО и севере Ямало-Ненецкого АО. Много осадков выпало на Чукотке, прогнозировалась норма и выше ее.

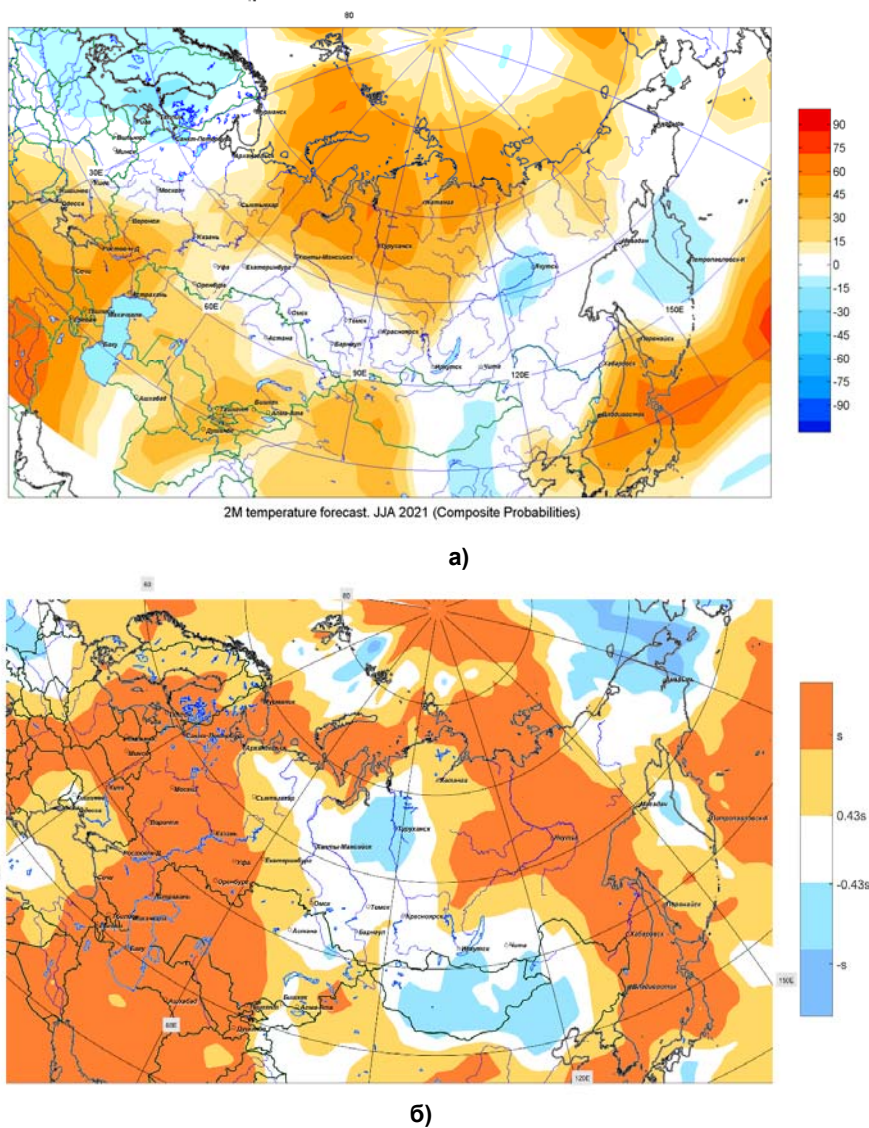


Рис. 2. Консенсусный прогноз среднесезонной аномалии температуры воздуха на за летний сезон 2021 г. в вероятностной форме, рассчитанный на основе интерпретации данных п моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2) (а); распределение аномалий приземной температуры по данным ERA5 реанализа за летний сезон 2021 г. (б).

Fig. 2. Consensus forecast of the average seasonal air temperature anomaly in summer 2021 in probabilistic form based on the interpretation of 5 forecast models (PLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2) (a); distribution of normalized surface temperature anomalies based on the ERA5 reanalysis data for the summer season 2021 (b).

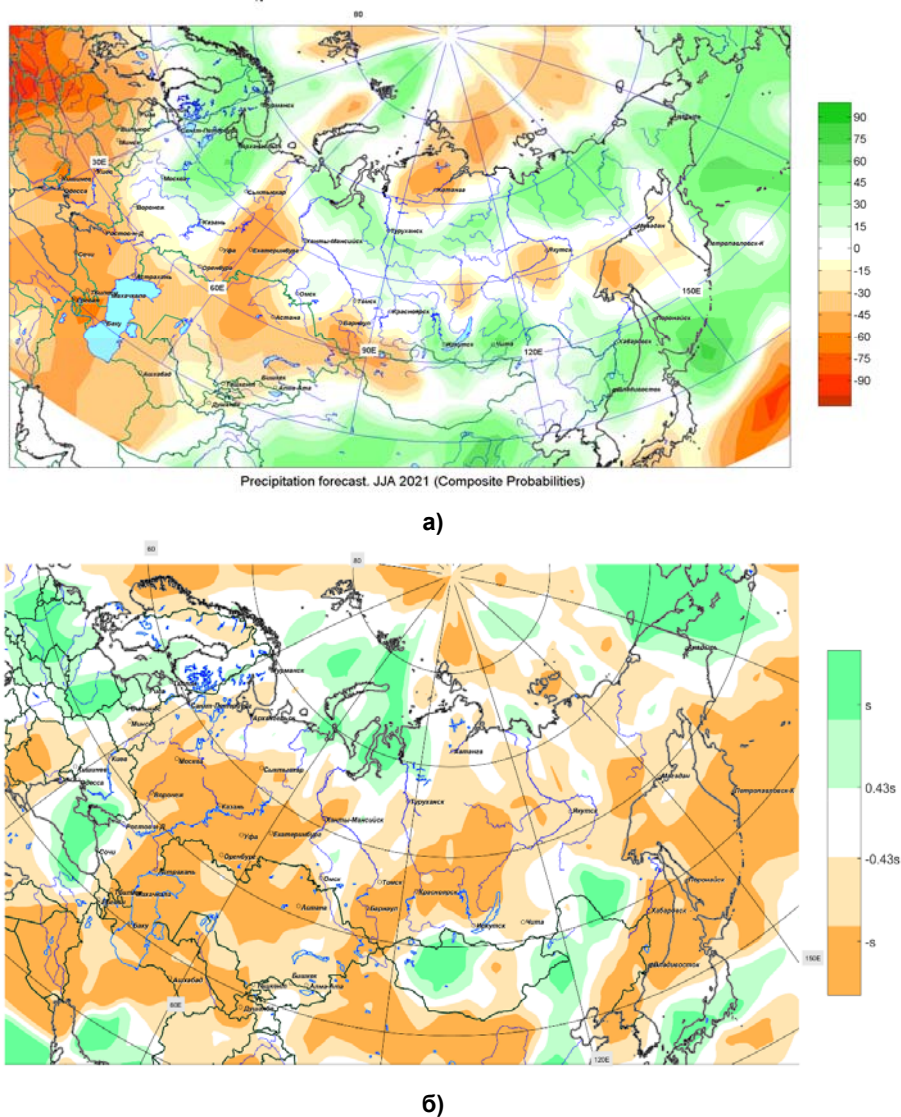


Рис. 3. Консенсусный прогноз среднесезонных аномалий осадков за летний сезон 2021 г. в вероятностной форме, рассчитанный на основе интерпретации данных 5 моделей (ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2) (а); распределение нормированных аномалий осадков по данным ERA5 реанализа за летний сезон 2021 г. (б).

Fig. 3. Consensus forecast of the average seasonal precipitation anomaly in summer 2021 in probabilistic form based on the interpretation of 5 forecast models (PLAV, GGO, TCC, CanSIP, CFS2) (a); distribution of normalized precipitation anomalies based on the ERA5 reanalysis data for the summer season 2021 (b).

Не оправдалось превышение нормы осадков в северной половине Якутии, здесь по фактическим данным наблюдался дефицит, и только чуть севернее Тикси осадков выпало выше нормы. Хорошо спрогнозирован дефицит осадков на юго-западе Якутии.

Осадки ниже нормы отмечались на большей части ЕТР, исключая южные районы, избыток прогнозировался на северо-западе и центре этого региона.

Дефицит осадков на востоке Приволжского и юге Уральского федеральных округов был воспроизведен верно. В Алтайском крае, Республике Алтай, на юге Томской области, юге Красноярского края, Хакасии осадки были ниже средних многолетних значений, как и прогнозировалось.

Дефицит осадков отмечался на большей части Казахстана, на территории Узбекистана и Туркменистана, востока Таджикистана, запада Киргизии. Прогноз воспроизвел основные особенности распределения осадков в Средней Азии.

Неуспешным оказался прогноз в Забайкалье, где ожидалось превышение нормы осадков, по факту осадков выпало около и ниже нормы.

Избыток осадков наблюдался в Амурской области, ожидалось, что осадков будет в норме и выше ее. Неуспешным прогноз оказался на юге ДВР, где в летний сезон по фактическим данным отмечался дефицит осадков, а прогнозировался избыток. Засушливые условия отмечались на границе Хабаровского края и Магаданской области, по прогнозу ожидалась норма и ее превышение.

Успешность консенсусного прогноза на лето 2021 г. по всей территории Северной Евразии для приземной температуры воздуха составила 74%, для осадков – 63%. Наиболее высокие в Северной Евразии оценки оправдываемости прогнозов аномалии температуры воздуха (91%) и осадков (76%) отмечены для Азиатской территории (таблица).

Таблица. Оценки качества (% и АСС) сезонных прогнозов температуры и осадков на лето 2021 г.

Table. Skill scores in % of consensus forecasts of air temperature and precipitation for the summer season 2021.

Оценки качества сезонных прогнозов		Северная Евразия	Европейская часть	Азиатская часть	Центральная Азия и Казахстан
T2m	%	74	73	70	91
	АСС	0.65	0.66	0.62	0.79
Prec	%	63	65	57	76
	АСС	0.14	0.22	-0.03	0.66

Ожидаемые оценки термического состояния океана и крупномасштабной циркуляции атмосферы на зимний сезон 2021/2022 гг. по данным мировых прогностических центров

Большинство центров прогнозируют значительные положительные аномалии температуры поверхности океана (ТПО) в северной части Тихого океана, связанные с отрицательной фазой Тихоокеанского декадного колебания (PDO), что может привести к ослаблению Алеутского минимума и смещению центров циклонической активности на восток. Отрицательные аномалии ТПО сохраняются в экваториальных широтах Тихого океана. Согласно прогнозам, IRI/CPC вероятности событий La Nina, нейтральной фазы и El Nino (Nino3.4, пороговые значения: -0.5°C и 0.5°C) в предстоящем зимнем сезоне 84, 16 и 0 % соответственно.

На большей части Северной Атлантики сохраняются положительные аномалии ТПО. При этом распределение прогностических аномалий ТПО соответствует положительной фазе триполя, связанной с положительной фазой NAO. Значительные положительные аномалии ТПО ожидаются в районе Гольфстрима, Лабрадорского течения, а также на акваториях арктических морей.

Согласно прогнозам Гидрометцентра России по модели ПЛАВ, предстоящей зимой ожидается преобладание положительной фазы Североатлантического (NAO) колебания.

Зимний сезон 2021/2022 гг. ожидается теплее обычного на большей части территории Северной Евразии согласно прогнозам большинства моделей ведущего центра ВМО по мультимодельным прогнозам. Наиболее значительные положительные аномалии ожидаются на севере Западной Сибири, в Якутии и на Дальнем Востоке. Отрицательные аномалии вероятны на юге Сибири и на севере Казахстана.

В прогнозах осадков много неопределенностей. Избыточное увлажнение наиболее вероятно на севере Европы, в умеренных и полярных широтах Сибири, в Якутии и на Дальнем Востоке, дефицит осадков – на юге Европы, юге Восточной Сибири и в Центральной Азии.

Консенсусный прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на зиму 2021/22 гг.

По заключению участников СЕАКОФ-21, зимний сезон 2021/2022 гг. ожидается теплее нормы на большей части Северной Евразии. На севере ЕТР положительные аномалии температуры прогнозируются с вероятностью 45–75 %. На западе ЕТР, востоке Беларуси, севере Молдавии их вероятность 30–45 %, на большей части южной половины ЕТР присутствует неопределенность, на юге ЦФО возможен температурный фон ниже нуля (вероятность до 30 %). Теплее нормы зимой 2021/2022 гг. с вероятностью 45–60 % будет в западной половине Беларуси, на западе Украины и юге Молдавии. На всей территории

Сибири, Урала и Дальнего Востока Российской Федерации температура прогнозируется выше нормы с вероятностью 60–90 %. С невысокой вероятностью теплее нормы зимний сезон будет южнее Байкала. На крайнем востоке Чукотки в прогнозе присутствует неопределенность.

В Центральной Азии неопределенность в прогнозе отмечается на северо-западе и северо-востоке Казахстана, на остальной территории региона температурный фон прогнозируется выше нормы (с вероятностью 45–60 %).

Избыточное увлажнение с вероятностью до 75 % ожидается в Беларуси, западе Украины, Молдавии, северной половине ЕТР, на всей территории Урала, Западной Сибири и в северных районах Казахстана. Дефицит осадков возможен (вероятность 45–75 %) на востоке Украины, в Крыму, Краснодарском крае, а также Закавказье с вероятностью 45–60 %. Больше нормы осадков прогнозируется (вероятность до 75 %) в центральных и восточных районах Якутии и на ДВР. Сухой предстоящая зима ожидается на востоке Чукотки (вероятность 45–60 %). На территории Центральной Азии, за исключением северных областей Казахстана, в прогнозе присутствует неопределенность. В отдельных районах юга Центральной Азии спрогнозирована невысокая вероятность дефицита осадков.

Последствия крупных аномалий температуры воздуха и осадков летом 2021 года для различных секторов экономики

Одним из направлений, развиваемых в рамках работы СЕАКЦ, является оценка последствий крупных аномалий температуры и осадков на различные сектора экономики и социальной жизни и их прогноз [3].

Одним из самых масштабных явлений 2021 г. природного характера можно считать лесные пожары на территории республики Саха, причиной которых стали продолжительные периоды аномально жаркой и сухой погоды (рис. 2б, рис. 3б). По данным ФГУ «Авиалесохрана», в Якутии за летний сезон было зафиксировано 1695 пожаров на общей площади около 8 млн га. Помимо потерь лесного хозяйства, пожары оказали влияние на экологическую обстановку. 6–12 августа в Якутске концентрация загрязняющих веществ превышала ПДК в 20 раз. По данным Роспотребнадзора [www.14.rosпотребнадзор.ru], 727 человек обращались с жалобами на самочувствие из-за дыма, 40 были госпитализированы.

Засушливые условия на юге Урала и в Поволжье обусловили длительные периоды атмосферной и почвенной засух, что по предварительным данным привело к снижению урожайности озимой и яровой пшеницы.

Осадки выше нормы на юге Дальнего Востока и на юге Восточной Сибири привели к неблагоприятной паводковой обстановке и росту уровня воды на озере Байкал и на реке Амур, были затоплены поймы,

фиксировался ущерб в населенных пунктах, расположенных в пониженных местах. В Забайкальском национальном парке был усилен мониторинг околотовных птиц из-за затоплений мест их гнездования.

Прогноз возможных последствий крупных аномалий температуры воздуха и осадков различных секторов экономики зимой 2021/2022 гг.

Можно выделить несколько областей экономики и социальной жизни, подверженных потенциальному воздействию крупных аномалий температуры воздуха и осадков (рис. 4, 5) зимой 2021/2022 гг. по консенсусному прогнозу.

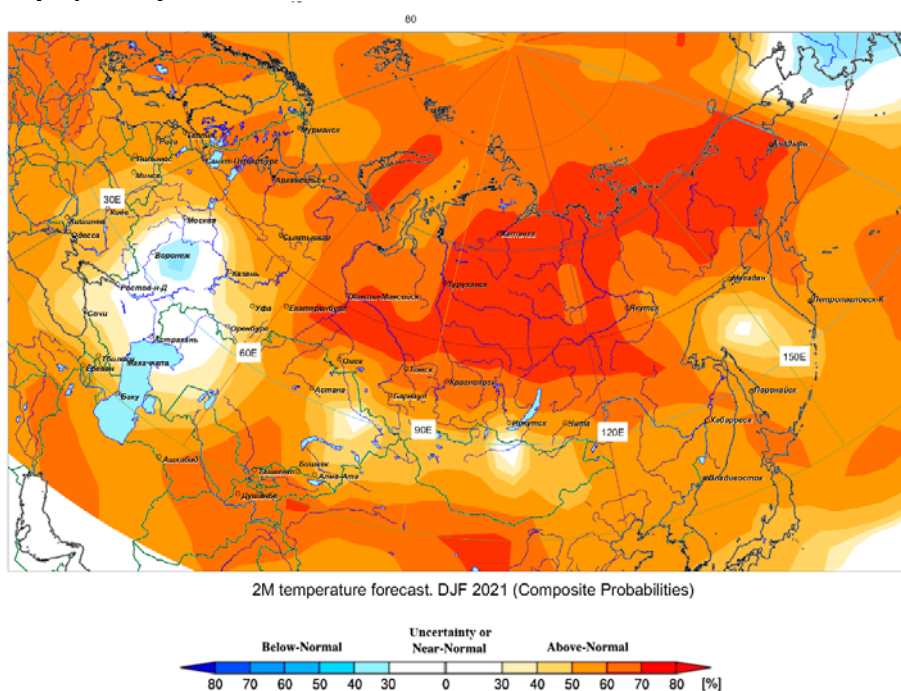


Рис. 4. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии температуры воздуха на зиму 2021/2022 гг. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных 6 моделей (INM, ПЛАВ, ГГО, TCC, CanSIP, CFS2). Положительные аномалии обозначены красным, а отрицательные – синим цветом, насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 4. Map of the consensus forecast of the mean seasonal air temperature anomaly for the winter of 2021/2022 in probabilistic form, based on the interpretation of data from 6 models (INM, PLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive anomalies are indicated in red, negative anomalies in blue, the color saturation corresponds to the probability of an anomaly.

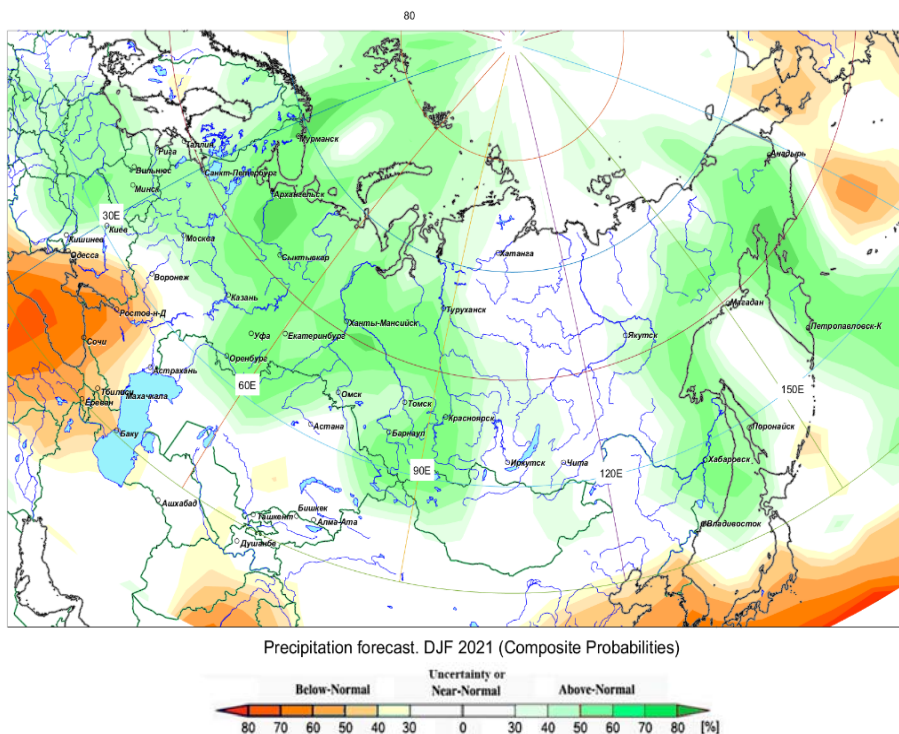


Рис. 5. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии осадков на зиму 2021/2022 гг. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных 6 моделей (INM, ПЛАВ, ГГО, ТСС, CanSIP, CFS2). Положительные аномалии обозначены зеленым, а отрицательные – красным цветом, насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 5. Map of the consensus forecast of the mean seasonal precipitation anomaly for the winter of 2021/2022 in probabilistic form, based on the interpretation of data from 6 models (INM, PLAV, MGO, TCC, CanSIP, CFS2). Positive anomalies are indicated in red, negative anomalies in blue, the color saturation corresponds to the probability of an anomaly.

Транспорт. Осадки выше нормы в центре и на севере ЕТР и в Западной Сибири могут привести к росту затрат на снегоуборочную технику и реагенты. А значительные положительные аномалии температуры воздуха в арктической зоне Восточной Сибири и Дальнего Востока могут стать причиной сокращения периода использования зимних дорог.

Энергетика. Теплая и влажная погода может стать причиной частой повторяемости ледяных дождей на юге Дальнего Востока, что может приводить к авариям на ЛЭП.

Сельское хозяйство. Осадки ниже и около нормы на юге ЕТР и на юге Поволжья могут вызвать ранний сход снежного покрова и раннее начало посевных работ.

Водные ресурсы. Осадки выше нормы могут привести к более активному течению весеннего половодья в центре и на севере ЕТР и в Западной Сибири.

Здоровье населения. Теплая погода в зимнее время является одним из ведущих факторов развития ОРВИ. Именно поэтому на севере ЕТР и на юге Сибири возможен рост заболеваемости.

Туризм/активный отдых. Осадки выше нормы могут способствовать росту частоты схода снежных лавин на Камчатке и при этом увеличить продолжительность горнолыжного сезона на Камчатке и на Алтае. Осадки ниже нормы на Кавказе могут стать потенциальной причиной сокращения сезона.

Работа по верификации прогнозов за лето 2021 г. выполнена в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>.

Работа по выпуску консенсусного прогноза с использованием новой схемы комплексирования моделей выполнена при финансовой поддержке МинОбрНауки РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Р.Б. Зарипов, Д.Б. Киктев, Е.Н. Круглова, В.Н. Крыжов, И.А. Куликова, В.А. Тищенко, М.А. Толстых, Хан. В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 12-36.
2. Воробьева В.В., Володин Е.М. Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН // Математическое моделирование. 2020. Т. 32, № 11. С. 47-58.
3. Емелина С.В., Хан В.М. Перспективы развития специализированного климатического прогнозирования в СЕАКЦ // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1 (379). С. 101-111.
4. Киктев Д.Б., Хан В.М., Крыжов В.Н., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А. Технология выпуска региональных долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 36-58.
5. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3-40.
6. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 24-39.
7. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25-35.

8. Хан В.М. Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 5-12.

9. Хан В.М. Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 5-13.

References

1. Vilfand R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tishchenko V.A., Tolstykh M.A., Khan V.M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, no. 4 (374), pp. 12-36 [in Russ.].

2. Vorob'eva V.V., Volodin E.V. Experimental studies of seasonal weather predictability based on the INM RAS Climate Model Mathematical. *Models and Computer Simulations*, 2021, vol. 13, pp. 571-578.

3. Emelina S.V., Khan V.M. Plan for the development of specialized climate forecasting in NEACC *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, no. 1 (379), pp. 101-111 [in Russ.].

4. Kiktev D.B., Khan V.M., Kryzhov V.N., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishchenko V.A. Technology of issue of long-range forecasts in the North-Eurasian Climate Centre (NEACC). *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 358, pp. 36-58 [in Russ.].

5. Mirvis V.M., Meleshko V.P. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya meteorologicheskikh prognozov na mesyats i sezon. *Trudy GGO*, 2008, vol. 558, pp. 3-40.

6. Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Monthly and Seasonal Prediction of Precipitation and Air Temperature in the Amur River Basin. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, no. 3, pp. 169-179.

7. Tolstykh M.A., Geleyn J.-F., Volodin E.M. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. vol. 40, no. 6, pp. 374-382.

8. Khan V.M. Activity of the North-Eurasian Climate Center (NEACC) and the North Eurasian Climate Outlook Forum aimed at climate services improvement within the international structure of WMO. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 358, pp. 5-12 [in Russ.].

9. Khan V.M. The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 5-13 [in Russ.].

Поступила 29.11.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 29.11.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»

1. В журнале публикуются статьи по проблемам современных исследований в области теории и практики гидрометеорологического прогнозирования. Статья должна быть оригинальным законченным научным исследованием, в ней рекомендуется особо подчеркнуть научный вклад автора.

Согласно этике научных публикаций, авторы не должны допускать дублирования публикаций, предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

2. В целях обеспечения качества публикуемых материалов и соблюдения авторских прав, все поступающие в редакцию журнала статьи проходят проверку на плагиат (наличие заимствований) через систему «*Antiplagiat*» и только после этого отправляются на рецензирование.

3 Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному одностороннему слепому *рецензированию*. Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии с изложенными ниже требованиями. Не соответствующие требованиям рукописи будут возвращены авторам.

5. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи с заглавием статьи на русском и английском языках;
- индекс УДК, соответствующий теме статьи;
- фамилии и инициалы всех авторов (полностью). Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;
- аффилиация (организация и ее местонахождение) для всех авторов. Автор может указать в аффилиации более одной (2–3) организации с условием, что такая множественная аффилиация при приведении описываемых результатов научных исследований полностью оправдана и достоверна;
- текст авторского резюме (далее – аннотация) на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
- названия таблиц и подрисуночные подписи на русском и английском языках;
- акт(ы) экспертизы (1 экз.).

6. *Структура статьи* обычно включает введение с постановкой проблемы и указанием актуальности, цели и задачи, методы, результаты, заключение. В конце статьи могут быть приведены благодарности лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, дана ссылка на номера грантов на выполнение работы. *Благодарности даются на русском, а затем на английском языках.*

Объем статьи – до 20 стр. текста (через 1,5 интервала), включая таблицы, рисунки и список литературы. Объем заказных статей определяется редколлегией.

Текст набирается в формате Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование абзацного отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

- заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);
- в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;
- в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;
- в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к *аннотации*:

- аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;
- аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

- расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;
- отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;
- выстраиваться от общего к частному;
- включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список *литературы* должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила русского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются

зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м², Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел, например 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подписи рисунка (11 кегль):

Рис. 1. Название рисунка.

15. *Формулы* набираются только с использованием редакторов формул Microsoft MathType или Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул.

16. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

17. Авторы должны ознакомиться и следовать этике научных публикаций, размещенной на сайте издания <https://meteoinfo.ru/ethics-scientific-publications>

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 4 (382)

Под редакцией
д-ра геогр. наук А.А. Васильева

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@metcom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 13.12.2021. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 300 экз. Заказ № 1423
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3