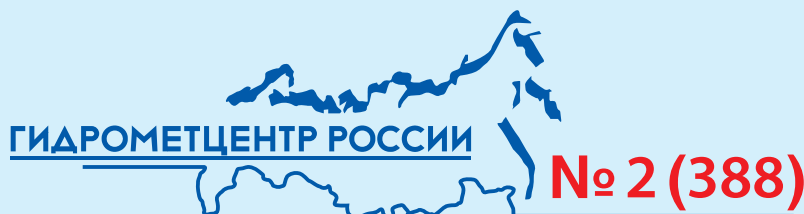


ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ



ISSN 2618-9631 (Print)
ISSN 2782-6716 (Online)

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»

№ 2 (388)

Под редакцией
д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 2 (388)

Москва
2023

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.

Приводится краткое описание конфигурации COSMO-Ru2By (шаг сетки 2,2 км) модели COSMO, обеспечивающей выпуск численных прогнозов погоды до 48 часов для регионов Европейской территории России и Республики Беларусь, а также результаты оценки точности этих прогнозов. Исследуется роль изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба в задаче долгосрочного прогноза аномалий погоды. Представлены статистические оценки параметров центров действия атмосферы (местоположения, интенсивности) Северного и Южного полушарий. Изложены результаты анализа синоптических процессов возникновения смерчей в Курской области и близлежащих районах. Приводятся результаты усовершенствования алгоритмов диагностики града на основе данных сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования. Приведены результаты синоптико-статистического анализа волн тепла и холода различной продолжительности и интенсивности на Средней Волге. Рассматривается система уравнений для прогноза штормового нагона в Финском заливе, которая позволяет прогнозировать максимальный уровень подъема воды в устье реки Нева с погрешностью, не превышающей 10 %. Выполнен анализ современных нейросетевых моделей в задачах гидрологических прогнозов. Анализируются изменения данных о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ в московском регионе.

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

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

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

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

Займских Г.А., канд. техн. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия (секретарь редколлегии)

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

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

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

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

Caio Augusto dos Santos Coelho, Senior Scientist, Center For Weather Forecasts And Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, Brazil

Simon O. Krichak, Research Professor, Porter School of the Environment and the Earth Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

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

A brief description of the COSMO-Ru2By configuration (the grid spacing is 2.2 km) of the COSMO model is given, which provides numerical weather forecasts for up to 48 hours for the regions in the European part of Russia and the Republic of Belarus, the results of estimating the accuracy of these forecasts are also presented. The wind gustiness parameterization is investigated in the problem of long-range forecasting of weather anomalies. Statistical estimates of the parameters of the atmospheric centers of action (location and intensity) in the Northern and Southern hemispheres are presented. The results of analyzing synoptic conditions of tornado occurrence in the Kursk region and nearby areas are provided. The results of improving algorithms for hail diagnosis based on DMRL-C radar network and numerical prediction data are presented. The results of the synoptic-statistical analysis of heat and cold waves of different duration and intensity in the Middle Volga region are discussed. A system of equations for forecasting storm surges in the Gulf of Finland is considered, which allows predicting the maximum level of water rise at the Neva River mouth with an error not exceeding 10%. The analysis of modern neural network models in the problems of hydrological forecasting is carried out. Changes in the data on pollutant emissions into the atmosphere over the Moscow region are analyzed.

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

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

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

Zaimskikh G.A., PhD in Engineering 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

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

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

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

Khrstoforov 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

Caio Augusto dos Santos Coelho, Senior Scientist, Center For Weather Forecasts And Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, Brazil

Simon O. Krichak, Research Professor, Porter School of the Environment and the Earth Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

СОДЕРЖАНИЕ

Гидродинамический прогноз погоды

Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β - и γ -мезомасштабных атмосферных процессов	6
<i>Розинкина И.А., Ривин Г.С., Багров А.Н., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Васькова Д.В., Захарченко Д.И., Бундель А.Ю., Воробьева Е.В., Кирсанов А.А., Полюхов А.А., Шатунова М.В., Шувалова Ю.О., Елисеев Г.В.</i>	

Долгосрочный метеорологический прогноз

Роль изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба в задаче долгосрочного прогноза аномалий погоды	35
<i>Фадеев Р.Ю.</i>	

Общая циркуляция и характеристики атмосферы

Статистические оценки параметров центров действия атмосферы в зимнем и летнем сезонах по данным реанализа за период 1992–2021 годов	55
<i>Балакин В.С., Шипко Ю.В., Колычев О.В., Кузнецов И.Е., Закусилов В.П., Шувакин Е.В.</i>	
Синоптические условия формирования сухих и влажных волн тепла и холода на Средней Волге	77
<i>Морозова С.В., Латина С.Н., Полянская Е.А., Алимтиева М.А.</i>	
Анализ синоптических процессов возникновения смерчей в Курской области и близлежащих районах	93
<i>Санникова Г.В.</i>	
Диагностика града на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования	114
<i>Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М.</i>	

Расчеты и прогнозы элементов режима морей и океанов

Решение задачи гашения свободных колебаний уровенной поверхности воды в Финском заливе	128
<i>Клёмин В.В., Королёва О.А.</i>	

Гидрологические прогнозы

Глубокие нейронные сети архитектуры трансформер в задачах гидрологических прогнозов	138
<i>Романов А.В., Акмаев Э.Р., Червоненкис М.А.</i>	

Атмосферные процессы и загрязнение атмосферы

Изменения кадастровых данных о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ в московском регионе	156
<i>Борисов Д.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И.</i>	

CONTENTS

Hydrodynamic weather forecast

The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of β - and γ -mesoscale processes	6
<i>Rozinkina I. A., Rivin G. S., Bagrov A.N., Blinov D.V., Bykov F.L., Vaskova D.V., Zakharchenko D.I., Bundel A.Yu., Vorobyeva E.V., Kirsanov A.A., Polyukhov A.A., Shatunova M.V., Shuvalova Yu.O., Eliseev G.V.</i>	

Long-range meteorological forecasts

Wind gustiness parameterization and long-range weather prediction	35
<i>Fadeev R.Yu.</i>	

General circulation and characteristics of the atmosphere

Statistical estimates of the parameters of winter and summer atmospheric centers of action based on 1992–2021 reanalysis	55
<i>Balakin V.S., Shipko Yu.V., Kolychev O.V., Kyznetsov I.E., Zakusilov V.P., Shuvakin E.V.</i>	
Synoptic conditions for the formation of dry and wet heat and cold waves in the Middle Volga Region	77
<i>Morozova S.V., Lapina S.N., Polyanskaya E.A., Alimpieva M.A.</i>	
Analysis of the synoptic processes leading to the occurrence of tornadoes in the Kursk region and nearby areas	93
<i>Sannikova G.V.</i>	
Diagnosis of hail based on DMRL-C and numerical modeling data	114
<i>Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M.</i>	

Computing and forecasting of the marine environment parameters

Solving the problem of damping free oscillations of the water level surface in the Gulf of Finland	128
<i>Klemin V.V., Korolyova O.A.</i>	

Hydrological forecasts

Deep neural networks of transformer architecture in problems of hydrological forecasts	138
<i>Romanov A.V., Akmaev E.R., Chervonenkis M.A.</i>	

Atmospheric processes and air pollution

Changes in inventory data on pollutant emissions into the atmosphere over the Moscow region	156
<i>Borisov D.V., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I.</i>	

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>

УДК 551.578.9

Конфигурация COSMO-Ru2Bu модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β - и γ -мезомасштабных атмосферных процессов

***И.А. Розинкина, Г.С. Ривин, А.Н. Багров, Д.В. Блинов,
Ф.Л. Быков, Д.В. Васькова, Д.И. Захарченко, А.Ю. Бундель,
Е.В. Воробьева, А.А. Кирсанов, А.А. Полюхов,
М.В. Шатунова, Ю.О. Шувалова, Г.В. Елисеев***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
inna.rozinkina@mail.ru*

Приведено краткое описание конфигурации COSMO-Ru2Bu (шаг сетки 2,2 км) модели COSMO, обеспечивающей выпуск численных прогнозов погоды до 48 часов для регионов Европейской территории России и Республики Беларусь, методология и результаты оценки точности этих прогнозов. COSMO-Ru2Bu реализована в Гидрометцентре России, функционирует в системе оперативного регионального численного прогноза погоды COSMO-Ru на суперкомпьютере CRAY XC40-LC.

Особенностями COSMO-Ru2Bu являются: 1) обширный домен с шагом сетки, позволяющим явно описывать крупные (высотой свыше 5–6 км) конвективные движения, а также учитывать особенности рельефа; 2) «встроенная» технология усвоения данных доплеровских метеорологических радиолокаторов, позволяющая получать более точные прогнозы быстроразвивающихся опасных явлений на ближайшие часы; 3) «встроенная» система визуализации большого количества карт по различным регионам с каскадным повышением детализации изображений.

Оперативные испытания 2020–2021 гг. выявили высокий уровень успешности прогнозов базовых метеопараметров у земной поверхности. Для сравнения с прогнозами по мезомасштабным моделям более грубого разрешения (например, конфигурации COSMO-Ru6ENA, шаг сетки 6,6 км) процессов с высокой пространственно-временной изменчивостью (порывов ветра, часовых сумм осадков, погодных характеристик в горных областях и т. д.) понадобилось расширение стандартных для оперативных испытаний подходов и критериев: оценивание по географически однородным областям, использование специальных оценок редких событий, сравнение с радарной информацией.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, мезомасштабное атмосферное моделирование, усвоение радарных данных, оценка прогнозов погоды, негидростатическая модель атмосферы

The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of β - and γ -mesoscale processes

***I.A. Rozinkina, G.S. Rivin, A.N. Bagrov, D.V. Blinov,
F.L. Bykov, D.V. Vaskova, D.I. Zakharchenko, A.Yu. Bundel,
E.V. Vorobyeva, A.A. Kirsanov, A.A. Polyukhov,
M.V. Shatunova, Yu.O. Shuvalova, G.V. Eliseev***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
inna.rozinkina@mail.ru*

The paper gives a brief description of the COSMO-Ru2By configuration (the grid spacing is 2.2 km) of the COSMO model, which provides numerical weather forecasts for up to 48 hours for the European part of Russia and for the Republic of Belarus, as well the methodology and results of skill of these forecasts. The COSMO-Ru2By was realized in the Hydrometcentre of Russia and operates as an element of the COSMO-Ru operational limited-area numerical weather prediction system on the CRAY XC40-LC supercomputer.

The features of the COSMO-Ru2By are: 1) a vast calculation domain with a grid spacing that allows an explicit description of large (over 5-6 km high) convective motions and considering in detail the features of terrain; 2) the “embedded” technology for assimilation of DMRL-C Doppler weather radar data providing more accurate forecasts of rapidly developing weather processes for the next few hours; 3) coupled visualization system providing a great number of maps for different regions with a cascade image detailing. Operational trials in 2020-2021 showed a high skill of forecasts of the basic weather parameters with the COSMO-Ru2By. For comparison with forecasts of highly variable weather parameters (wind gusts, hourly precipitation, parameters in mountain areas, etc.) based on mesoscale models with lower resolution (e.g., COSMO-Ru6ENA, the grid size is 6.6 km), it was proposed to apply expanded trial approaches and criteria: e.g., the estimation over geographically homogeneous areas, the use of special criteria for predicting rare events, the comparison with radar data.

Keywords: numerical weather prediction, mesoscale atmospheric modeling, radar data assimilation, weather forecast skill estimation, non-hydrostatic atmosphere models

Введение

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение 2018–2021 гг. в рамках НИР «Повышение качества гидрометеорологических прогнозов и обнаружения опасных гидрометеорологических явлений» (шифр ПП-10-2017/02/22-1, государственный контракт от 05.09.2017 года № 169-ОК-Б/091701 Программы по Гидрометеорологии Союзного государства) была разработана, испытана и апробирована новая конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO [17, 23] с шагом вычислительной сетки 2,2 км и областью вычислений, включающей Республику Беларусь, Европейскую территорию России (ЕТР) и прилегающие регионы [15, 16]. COSMO-Ru2By предназначена для выпуска краткосрочных численных прогнозов на сетке 2,2 км, разрешающей крупную, так называемую проникающую конвекцию высотой свыше 5–6 км. Максимальная заблаговременность

прогнозов такой детализации, по опыту зарубежных стран, целесообразно до 48 часов. Вычислительная область COSMO-Ru2By является одной из наиболее крупных областей вычислений в мире среди конфигураций региональных моделей с шагами первых километров (разрешение β - и γ -мезомасштабных атмосферных процессов). В вычисления по COSMO-Ru2By впервые в отечественной практике мезомасштабного численного прогноза были включены такие технологические и информационные элементы, как усвоение радарной информации методом «Nudging», использование новых данных аэрозольной климатологии, применение диагностических индексов конвективных процессов.

Настоящая статья посвящена описанию и анализу работы COSMO-Ru2By, главным образом по расчетам совокупности параметров успешности для периодов времени, для которых проводились оперативные испытания данной конфигурации с сентября 2020 г. по сентябрь 2021 года и последующего мониторинга успешности.

Использование в негидростатической модели шагов сетки, разрешающих крупные конвективные движения, позволяет прогнозировать вертикальные профили метеопараметров точнее, чем у более «грубых» моделей без параметризации глубокой конвекции, и, следовательно, угрозы опасных конвективных явлений, в частности с применением так называемых конвективных индексов. Для выявления реальной потребительской ценности численных прогнозов погоды (ЧПП) были применены расширенные подходы: оценивание по географически однородным областям и типам преобладающих погодных процессов, использование специальных оценок редких событий, привлечение радарной информации, с учетом воспроизведения моделью проявлений конвективной неустойчивости в виде локальных сильных ливней, порывов ветра и т. п., априори носящих стохастический характер, при сравнении с другими моделями более грубого разрешения (например, конфигурацией COSMO-Ru6ENA, шаг сетки 6,6 км).

1. Особенности технологической системы COSMO-Ru2Ru и ее продукции

1.1. Версия системы COSMO-Ru, реализованная на суперкомпьютере CRAY XC40-LC

В настоящее время на суперкомпьютере CRAY XC40-LC функционирует система оперативного регионального численного прогноза погоды COSMO-Ru, в которую включена конфигурация COSMO-Ru2By. Предшественником этой системы была одноименная технологическая линия [2, 10] с конфигурациями модели COSMO с шагами сеток от 13,2 до 1,1 км:

COSMO-Ru13ENA $\rightarrow$ COSMO-Ru7 $\rightarrow$
 $\rightarrow$ COSMO-Ru2(CFO/VFO/SFO) $\rightarrow$ COSMO-Ru1(Sochi/Krasnoyarsk).

Данная система до 2022 г. выпускала прогнозы для различных территорий и сеток с шагом 13,2 км (COSMO-Ru13ENA для всей территории России и прилегающих регионов), 7 км (COSMO-Ru7 для ЕТР, Урала и прилегающих регионов), три конфигурации с шагом 2,2 км (COSMO-Ru2CFO для Центрального федерального округа (ЦФО), COSMO-Ru2YFO для региона Северного Кавказа и COSMO-Ru2VFO для Центрального Поволжья) и в экспериментальном режиме для горных районов проведения крупных спортивных мероприятий в районе Сочи и Красноярска (Ru1, с шагом сетки 1,1 км).

Перечисленные конфигурации (за исключением экспериментальных 1-километровых версий) в 2009–2016 гг. прошли ряд оперативных испытаний и впоследствии активно использовались в прогностических центрах Росгидромета как важный информационный ресурс для составления сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов погоды [8–10].

С вводом в эксплуатацию суперкомпьютера CRAY XC40-LC с 2017 г. в Гидрометцентре России начала развиваться обновленная система COSMO-Ru, включившая в себя конфигурацию COSMO-Ru6ENA (шаг сетки 6,6 км) для всей территории России и прилегающих регионов, с территорией, совпадающей с ранее внедренной COSMO-Ru13ENA (шаг сетки 13,2 км) и заменившей ее в 2022 г., а также конфигурацию COSMO-Ru2By (шаг сетки 2,2 км), в которую впоследствии были включены экспериментальные конфигурации с шагом 1 км для Московского региона [11, 12] и региона Сочи. Домен COSMO-Ru2By был выбран весьма обширный, объединивший области вычислений всех ранее внедренных конфигураций с шагом сетки 2,2 км и расширенный на запад – в свете заинтересованности прогностической деятельности Республики Беларусь.

Информация на границах и начальные поля для конфигураций COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru6ENA ранее поступали в Росгидромет из системы глобального моделирования ICON Немецкой службы погоды в соответствии с уставом Консорциума COSMO, а с марта 2022 года – из доступных открытых источников результатов моделирования ICON [14, 22].

В рамках этих работ на суперкомпьютере Cray XC40-LC большое внимание было уделено повышению эффективности распараллеливания вычислительных процессов [2, 13, 14]. Кроме того, в период сравнительного анализа 2020–2021 гг. обе конфигурации имели в своей основе последнюю версию модели COSMO v.6 одноименного консорциума [23] с использованием обновленных модулей физических параметризаций, настроек, внешних параметров и новых международных архивов свойств подстилающей поверхности высокой детализации.

Поскольку минимальный масштаб атмосферных процессов, прогнозируемый моделью атмосферы (так называемое разрешение модели), равен примерно 7–10 шагам сетки, то переход для самого крупного домена

от шага сетки 13,2 км (COSMO-Ru13ENA) к шагу 6,6 км (COSMO-Ru6ENA) позволил повысить разрешение модельных атмосферных процессов для всей России формально с 92–132 км до 46–66 км (ориентировочно от 100 до 50 км). В то же время по COSMO-Ru2By (шаг 2,2 км) масштаб явно воспроизводимых атмосферных движений для Республики Беларусь и всей Европейской территории России составил приблизительно 15–20 км. Отметим, что, следуя ряду признанных классификаций мезомасштабных процессов, рассмотренных, например, в [3, 21], наименьшие циркуляции, которые могут быть воспроизведены COSMO-Ru6ENA, относятся к категории β -масштаба (20–200 км, период жизни 1 час – 1 сутки), соответственно, по COSMO-Ru2By – к верхней части категории γ -масштаба (2–20 км, период жизни порядка первых часов). То есть именно COSMO-Ru2By может воспроизвести атмосферные процессы высокой пространственно-временной изменчивости, способные вызвать опасные явления конвективной природы.

Согласно решению ЦМКП от 11.03.2021 [<http://method.meteorf.ru/>], на основе результатов оперативных испытаний, проведенных в 2020–2021 гг., система COSMO-Ru2By рекомендована в качестве основного метода численного краткосрочного прогноза погоды для прогностических организаций Росгидромета (наряду с COSMO-Ru6ENA как дополняющая и уточняющая ее), а оперативный счет по ряду конфигураций, функционирующих в рамках предшествующей системы COSMO-Ru, приостановлен. При проведении данных испытаний и при последующем мониторинге качества для выявления уровня успешности конфигурации COSMO-Ru2By были использованы расширенные приемы верификации, в частности, с привлечением информации в окрестностях точек наблюдений, радарных данных и использование специальных критериев успешности дихтомных прогнозов редких событий (например, [4, 5]).

1.2. Технологический комплекс COSMO-Ru2By

COSMO-Ru2By включает в себя блоки усвоения данных, моделирования, подготовки визуализированной продукции. Параллельно работает блок статистической коррекции прогнозов для пунктов, результаты которого, наряду с результатами первоначального моделирования [1], отображаются на метеограммах. По результатам вычислений COSMO-Ru2By формируется цифровая продукция в кодировке GRIB1, передаваемая для дальнейшего использования в Белгидромет; большинство пользователей Росгидромета использует совокупность прогностических карт и метеограмм в графических форматах, формируемых в самом технологическом процессе по мере счета модели и доступных через специализированные веб-сайты.

Для своей работы COSMO-Ru2By использует информацию на границах и начальные поля из COSMO-Ru6ENA. Вычисления производятся параллельно, с небольшим сдвигом времени старта COSMO-Ru2By относительно COSMO-Ru6ENA.

Прогнозы вычисляются по начальным данным от 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ. Все прогнозы системы COSMO-Ru до своих максимальных заблаговременностей готовы через 1,5–2 ч после начала счета от соответствующего срока наблюдений (менее чем через 5 ч после срока наблюдений), что свидетельствует об информационно-вычислительной эффективности технологии и выполнении требований лимитов времени вычисления оперативных численных прогнозов (например, все прогнозы COSMO-Ru по начальному сроку 00 ч ВСВ готовы для использования в визуализированном виде до 05 ч ВСВ, или 08 ч МСК).

В COSMO-Ru2By были выполнены модификации в сравнении с другими компонентами COSMO-Ru:

1) внедрены новые базы климатического содержания аэрозолей, содержащие существенно более подробные современные данные о пространственном распределении аэрозолей [7];

2) подобраны параметры оптимального использования вычислительных мощностей суперкомпьютерной техники для получения результатов с наименьшими временными затратами [13];

3) включены алгоритмы усвоения данных синоптических и аэрологических метеорологических наблюдений по методу «Nudging» («Подталкивание»);

4) включены алгоритмы усвоения данных доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ-С), размещенных на территории Республики Беларусь и ЕТР, по методу LHN – «Latent heat Nudging» («Подталкивания скрытой теплоты») [19, 20];

5) включен расчет диагностических индексов – индексов угроз подсеточных опасных и неблагоприятных явлений конвективной природы [15];

6) выполнена унификация выходной продукции в кодовой форме GRIB с продукцией численного прогноза, выпускаемой в Белгидромете на базе модели WRF с шагом 3 км для обмена результатами негидростатического моделирования, реализована первая в России система краткосрочного регионального ансамблевого ЧПП на конвективно-разрешающих сетках [16];

7) реализован метод коррекции выходных данных моделирования с использованием машинного обучения [1] продукции COSMO-Ru2By и WRF Белгидромета с включением в технологию визуализации метеограмм.

Включение новых, перечисленных выше модулей, сопровождалось детальным анализом эффектов от произведенных модификаций.

Основные характеристики системы приведены в табл. 1. В связи с различными режимам работы элементов технологии COSMO-Ru2By, связанными с усвоением данных, которые будут рассмотрены в следующем подразделе, ее функционирование может быть организовано в двух временных режимах (более поздний вариант в таблице помечен звездочкой).

Таблица 1. Параметры компонент системы COSMO-Ru на ЭВМ CRAY XC40-LC: COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By

Table 1. The parameters of components COSMO-Ru6ENA and COSMO-Ru2By of COSMO-Ru system on the CRAY XC40-LC

Основные параметры системы	COSMO-Ru6ENA	COSMO-Ru2By
Регион	Северная Евразия	ЕТР, Республика Беларусь, прилегающие регионы
Шаг расчетной сетки, км	6,6	2,2
Источник начальных данных	Глобальная модель ICON	COSMO-Ru6ENA, наблюдения
Граничные условия	Глобальная модель ICON	COSMO-Ru6ENA
Шаг по времени, с	50	20
Количество узлов сетки (X×Y)	2000×1000	1200×1400
Размер области счета, км	11542×6632	1751×2033
Количество уровней	40	50
Сроки начальных данных, ВСВ	00, 06, 12, 18	
Максимальная заблаговременность прогнозов, ч	120 (00,12) / 78 (06,18)	48
Количество используемых вычислительных ядер	1944	2880
Время счета, мин	80 (00,12) / 50 (06,18)	65
Время начала счета, ч.мин ВСВ	2.55	3.15*/1.20
Время готовности результатов счета последней заблаговременности (до визуализации), ч.мин ВСВ	4.15 (00,12) / 3.45 (06,18)	2.25

1.3. Усвоение данных по методам Nudging и Latent heat Nudging в COSMO-Ru2By

Важным отличительным элементом разработанной конфигурации COSMO-Ru2By является включение в систему блоков усвоения данных по типу «Nudging» («Подталкивание») [13], основанных на различных алгоритмах для усвоения данных контактных измерений (синоптических станций и аэрологических наблюдений) и наблюдений ДМРЛ-С. Суть методики Nudging заключается в коррекции процесса моделирования на ранних стадиях прогноза, когда, стартовав по данным трехмерного анализа данных, полученного в рамках глобальной системы усвоения, модель, «догоняя» реальное время, может «доусваивать» новые результаты измерений, внося поправки в правые части дифференциальных уравнений гидротермодинамики в соответствии с выявляемыми отклонениями прогностических модельных данных и измеренных величин.

Важным свойством конфигурации COSMO-Ru2By является усвоение данных ДМРЛ-С с обширной территории, в том числе размещенных на территории Республики Беларусь (в Витебске, Гомеле и Минске). Результаты радарного композита (с шагом 1 км) для всей территории формируются в Центральной аэрологической обсерватории и Гидрометцентре России [4, 6]. Области вычислений COSMO-Ru2By и доступных данных ДМРЛ-С показана на рис. 1.

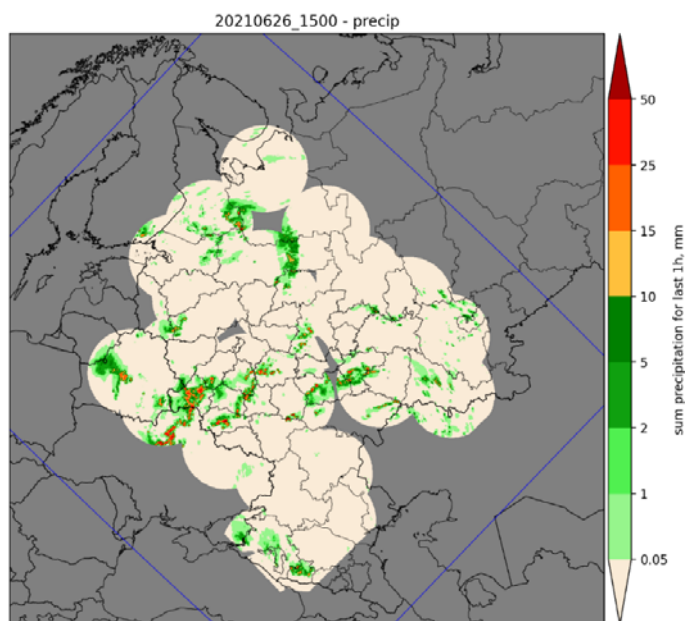


Рис. 1. Области вычислений COSMO-Ru2By (синий контур) и композита радарных данных (круги светлого фона). Цветовой шкалой выделены области осадков. (Пример для 26 июня 2021 года).

Fig. 1. Domains of COSMO-Ru2By (blue outline) and of radar data (light circles). The color scale highlights areas of precipitation. (Example for June 26, 2021).

Включение блоков усвоения, настроенных на поступление данных на основе информационно-технологической инфраструктуры Гидрометцентра России, потребовало модификации целого ряда модулей и компонент информационного сопровождения COSMO-Ru2By (рис. 2).

Продукция COSMO-Ru2By в цифровом (формат GRIB1), текстовом (таблицы метеограмм) и графическом виде (карты, метеограммы) в оперативном режиме готова к срокам выпуска прогнозов погоды в прогностических центрах Росгидромета на ЕТР и в Белгидромете (во время испытаний готовность продукции на сайте по сроку 00 ч ВСВ к 05 ч ВСВ была в 94 % случаев прогноза). Помимо этого, в экспериментальном режиме по промежуточным синоптическим срокам (03, 09, 15 и 21 ч ВСВ)

рассчитываются прогнозы на основе усвоения методом Nudging заблаговременностью до 18 часов (на основе полей первого приближения 3-х и 6-часовых прогнозов COSMO-Ru6ENA, без использования начальных данных глобальной системы усвоения ICON за указанные сроки).

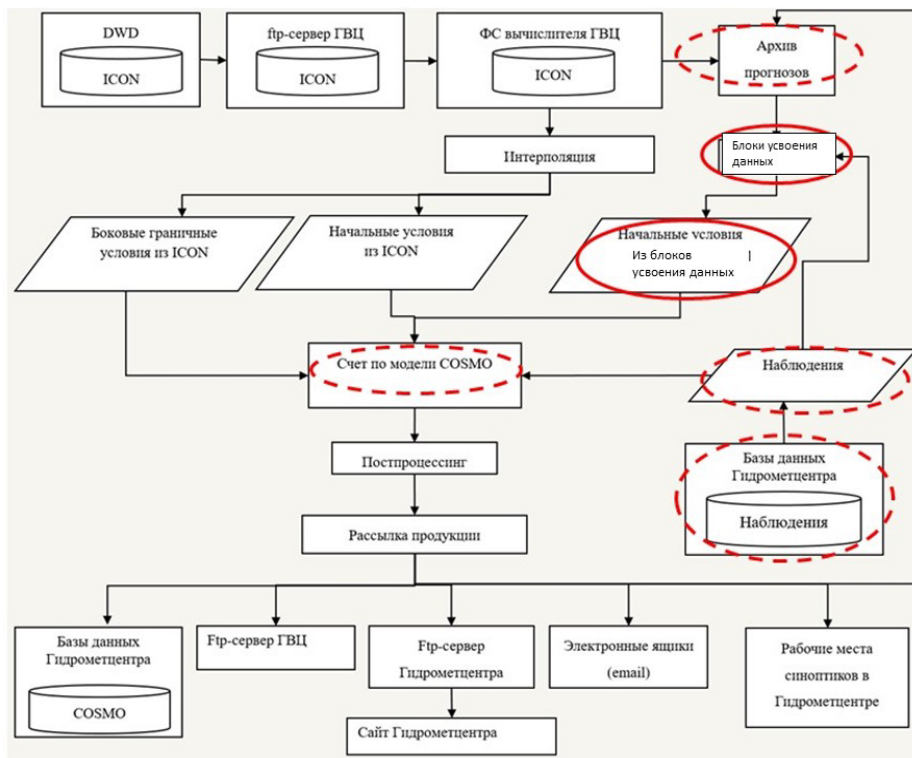


Рис. 2. Технологическая схема функционирования COSMO-Ru2By. Красными овалами показаны процессы, модифицированные при введении блоков усвоения данных.

Fig. 2. Technological scheme of the COSMO-Ru2By. Red ovals shows the processes modified with the introduction of data assimilation modules.

Таким образом, система может работать в двух режимах – стандартном (в табл. 1 временные характеристики помечены звездочкой), т. е. при каскадном получении данных за начальный срок (результаты глобальной системы усвоения ICON → интерполяция на сетку COSMO-Ru6ENA → интерполяция на сетку COSMO-Ru2By → использование результатов на границах области счета по COSMO-Ru6ENA «синхронной» заблаговременности), либо в экспериментальном, когда старт COSMO-Ru2By производится от прогностических (на 3 или 6 ч) полей COSMO-Ru6ENA (стартовавшей по данным глобальной системы усвоения (СУД) ICON за предшествующий срок) с последующим Nudging усвоением всех

поступающих данных вплоть до стартового срока прогноза. В этом случае COSMO-Ru2By стартует от более близких к ее сетке трансформированных полей, полученных на сетке 6,6 км, а не 13,2 км, усваивает данные контактных наблюдений (в основном за начальный срок), а также данные ДМРЛ-С, и, следовательно, может начать счет и сформировать продукцию существенно раньше, чем вариант по «стандартной» схеме, «дождающийся» поступления продукции СУД ICON. В результате в таком режиме прогнозы по COSMO-Ru2By оказываются готовы раньше прогнозов по COSMO-Ru6ENA, относящихся к тому же начальному сроку. Такая схема вычислений целесообразна для решения задач наукастинга (работающего каждые 3 часа). В то же время одной из задач выполненного анализа оценок в рамках испытаний было понять, существенно ли снижение качества прогнозов за счет неучета данных СУД ICON за самый последний срок наблюдений. Поэтому оценивались прогнозы по COSMO-Ru2By, работавшей в режиме, названном нами экспериментальным.

1.4. Формирование продукции в COSMO-Ru2By

Приоритетным направлением предоставления продукции пользователям является формирование графической продукции. Электронные карты, метеограммы и аэрологические диаграммы доступны по локальной сети прогнозистам Гидрометцентра России и через специализированный веб-сайт, по сути, представляющий рабочее место синоптика [16, <https://special.meteoinfo.ru>]. Все графические продукты подготавливаются на основе пакетов визуализации (GRADS, NCL, Python).

Разработка дизайна карт и представления их на сайте основывалось на следующих принципах (см. рис. 3):

- 3-уровневая телескопизация – от более крупного охвата территории к отдельным регионам, с более детальным представлением информации (в том числе – по территории Республики Беларусь);
- комплексирование на одной карте различных видов информации;
- подбор фиксированных цветовых палитр для карт одинакового наполнения, но разных заблаговременностей для оптимального выявления угроз опасных явлений при последовательном просмотре карт;
- ежедневная обратная связь с прогнозистами.

Продукция COSMO-Ru2By, предоставляемая синоптикам, главным образом состоит из карт элементов приземной погоды: температуры воздуха на высоте 2 м и на уровне 850 гПа, фонового ветра на высоте 10 м и его порывов, осадков, давления на уровне моря. Отличительной особенностью COSMO-Ru2By является способность в силу своего пространственного разрешения явно описывать крупные (свыше высот 5–6 км) конвективные движения (более мелкие конвективные движения по-прежнему параметризованы), а также циркуляции наименьшего масштаба 10–20 км, в том числе связанные с неоднородностью свойств подстилающей поверхности. В результате, описание в модели многих

метеорологических процессов, обуславливающих характеристики ожидаемых погодных явлений, оказывается более физически обоснованным, чем у конфигураций с более грубым шагом (например, COSMO-Ru6EN), использующих параметризацию (построенных на базе статистических соотношений) всех конвективных движений (т. е. описывающие не сам процесс, а результат конвективного приспособления). При этом в COSMO-Ru2By более реалистично, чем в случае применения параметризаций, формируются вертикальные профили метеорологических параметров, что позволяет более обоснованно использовать индексы, откалиброванные по данным измерений, для прогнозирования порывов ветра, гроз, града, формирования суперъячеек и т. д. Наиболее востребованными видами продукции по COSMO-Ru2By являются карты прогнозов индексов грозовой активности, порывов ветра, а также карты прогнозов радиолокационной отражаемости, формируемые при обработке информации микрофизического блока модели атмосферы.

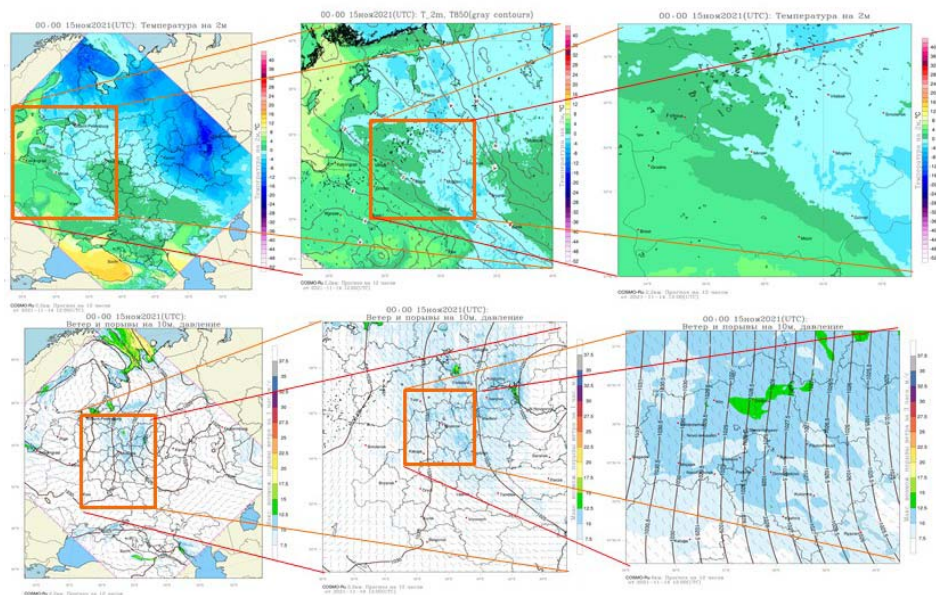


Рис. 3. Пример каскадного телескопирующего подхода визуализации продукции COSMO-Ru2By.

Fig. 3. An example of cascade visualization of COSMO-Ru2By results.

Карты прогностической радарной отражаемости являются важным видом информации об ожидаемой водности облачности при прогнозировании потенциальных угроз сильных локальных осадков/усиления ветра, которые могут не воспроизводиться более «грубыми» системами численного прогноза.

На рис. 4 приведен пример карт прогнозов радиолокационной отражаемости (являющейся в модели атмосферы диагностической величиной)

по COSMO-Ru6ENA (6,6 км) и COSMO-Ru2By (2,2 км) для 6 апреля 2022 г., когда в ряде районов ЦФО, в том числе в Московской области, наблюдались кратковременные, но интенсивные осадки из кучево-дождевой облачности в виде дождя и мокрого снега (до 3–10 мм/12ч), а также порывы ветра до 17–20 м/с. Угрозы таких явлений хорошо видны на карте по COSMO-Ru2By (отметим сравнительно большую для такого рода прогнозов заблаговременность – 37 часов!) и практически не проявлены на аналогичной карте по COSMO-Ru6ENA.

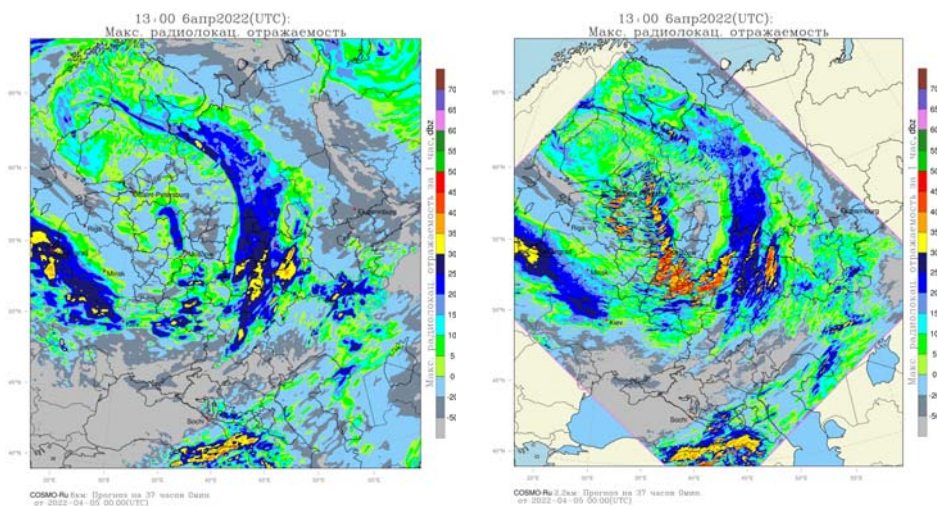


Рис. 4. Прогнозы максимальной радиолокационной отражаемости по COSMO-Ru6ENA (слева) и COSMO-Ru2By (справа) на 13.00 ч ВCB 6 апреля 2022 г. Заблаговременность 37 ч. Старт от данных 05.04.2022, 00 ч ВCB
Fig. 4. Forecasts of maximum radar reflectivity by COSMO-Ru6ENA (left), and COSMO-Ru2By (right) at 13:00 UTC April 6, 2022. Lead time 37 hours. Initial data 05.04.2022, 00 UTC.

Экспертные оценки результатов прогнозов угроз конвективных процессов, проводимые прогнозистами в теплый период ежедневно при составлении прогнозов на ближайшие сутки, свидетельствуют о весьма высоком уровне качества информации, предоставляемой по COSMO-Ru2By. В то же время прогнозы сильных локальных осадков, грозových очагов, радиолокационной отражаемости, угроз формирования суперъячеек и смерчей сложно объективно проверить по имеющимся данным сети метеостанций. Сравнение (часто визуальное) с доступными картами ДМРЛ-С и грозопеленгаторов позволило говорить о высокой степени надежности этих прогнозов, что видно, например, из рис. 5, демонстрирующего расположение прогностических и наблюдаемых очагов грозовой активности 13 апреля 2021 г. (Отметим, что этот период года не является типичным для грозовой деятельности в данном регионе.)

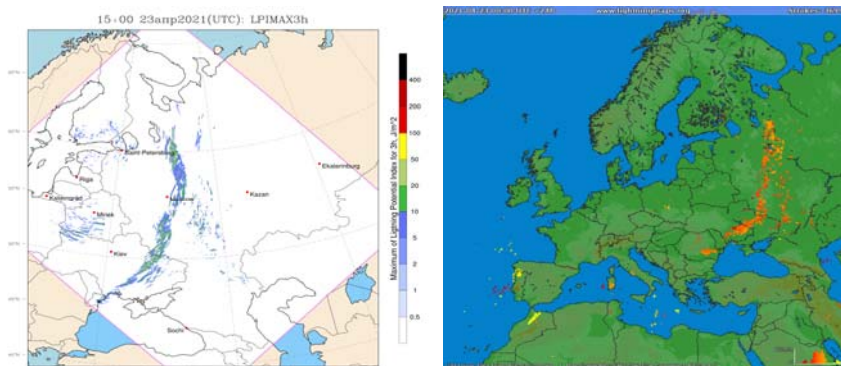


Рис. 5. Прогноз грозовой активности по COSMO-Ru2By по индексу LPI (Lightning Potential Index, [23]) (слева); композит по данным грозопеленгаторов (данные lightningmaps.org) (справа) за 13.04.2021

Fig. 5. COSMO-Ru2By forecast of lightning activity based on the LPI (Lightning Potential Index, [23]) (left); composite map based on lightning direction finder data (lightningmaps.org) (right) for 13.04.2021.

2. Результаты исследования успешности COSMO-Ru2By

2.1. Особенности оперативных испытаний 2020–2021 гг.

Испытания COSMO-Ru2By проводились с сентября 2020 г. по октябрь 2021 года. К испытаниям были представлены прогнозы давления на уровне моря, температуры и точки росы на высоте 2 м, фоновой скорости ветра и его порывов на высоте 10 м, осадков заблаговременностью до 48 часов, рассчитанные по начальным данным за 00 ч ВСВ с шагом по времени 1, 3 и 12 часов для различных метеопараметров. Прогнозы были интерполированы в пункты наблюдений и сравнивались с данными сетевых синоптических метеостанций с осреднением по территории ЕТР (вне горных и прибрежных районов, ~175 станций), Республики Беларусь (37 станций), региона Северного Кавказа (около 100 станций) и по всей области интегрирования. При оценке осадков и порывов ветра часть станций (~4 %) была исключена из-за некорректной информации (в течение всего периода сообщалось значение «без осадков» или «отсутствие порывов ветра») [15].

Сравнение показателей успешности проводилось с показателями глобальных и региональных моделей. Среди глобальных моделей рассматривалась успешность функционирующих в Гидрометцентре России версий отечественной модели ПЛАВ, а также доступной в Росгидромете продукции центров UKMO (Великобритания), NCEP (США), DWD (Германия) и JMA (Япония), ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды). Важным методическим аспектом является факт, что используемые прогнозы модели ICON имели шаг $0,25^\circ$, не циркулирующие в рамках ГСТ и не доступные в оперативных системах визуализации синоптиков Гидрометцентра России и других прогностических центров

Росгидромета. Продукция других зарубежных моделей была представлена на более грубых сетках от $1,5^\circ$ до $0,5^\circ$. Поэтому оценки по модели ICON, полученные в ходе испытаний, следует рассматривать в качестве ориентировочного уровня успешности глобальных моделей ведущих мировых центров с минимальным «заглублением», неизбежным вследствие технологических особенностей передач по каналам связи ВМО. Среди региональных моделей рассматривались функционирующая на CRAY XC40-LC «материнская» по отношению к COSMO-Ru2By конфигурация COSMO-Ru6ENA, а также функционирующие на менее мощной компьютерной технике COSMO-Ru7, и две конфигурации COSMO-Ru2 [8] для региона Северного Кавказа и для ЦФО, с целью выяснения целесообразности отмены их функционирования, а также WRF-ARW, работающей в Белгидромете.

Исследование успешности COSMO-Ru2By в период оперативных испытаний состояло из двух частей: основной и расширенной. Для основной части исследований было выполнено осреднение «традиционного» набора показателей успешности за период январь–октябрь 2021 г. В расширенной части для понимания реальной потребительской стоимости прогнозов высокой детализации, при оценке которых характерны проявления «двойных штрафов», были предприняты дополнительные расчеты оценок, не входящих в руководящие документы, но рассмотренные в Методических рекомендациях [5] и активно применяемые в настоящий момент в мировой практике.

Для анализа расширенного набора показателей успешности для осреднения были выбраны летний конвективный (май–август 2021 г.), переходный осенний (сентябрь–ноябрь 2020 г.) и зимний периоды (декабрь 2020 г. – февраль 2021 г.) Введение более подробного деления на периоды осреднения связано с необходимостью выявления эффектов, связанных со способностью работы модели с разрешающими конвективные движения шагами сетки в различных условиях преобладающей атмосферной стратификации. При этом было проведено дополнительное осреднение показателей в пределах меньших регионов (по Республике Беларусь, а также для региона Крым, Северный Кавказ, северных районов ЕТР). Помимо этого, анализ успешности продукции численных моделей с высоким разрешением требует своей специфики оценивания, поскольку основной целью развития таких моделей является прогноз опасных явлений таких пространственных масштабов, которые либо могут не «уловиться» существующей сетью наземных наблюдений, либо оказаться в ситуации «двойных штрафов».

В рамках указанной расширенной части дополнительно для летнего периода 2021 г. были рассчитаны и проанализированы оценки прогнозов 1-часовых сумм осадков для региона ЦФО по результатам радиолокационных данных, выполненные с привлечением данных в радиусе 30 км от узлов, а также ежедневный мониторинг продукции, включающей, помимо метеорологических полей, карты прогностической радарной отражаемости, индексы конвекции, индексы угроз формирования суперъячеек

и смерчей на основе экспертной оценки прогнозистами Гидрометцентра России и УГМС ЦФО. Получение оценок, осредненных по длительным рядам случаев, в контексте на имеющемся технологическом уровне было невозможно в силу редкой для фиксации таких явлений наблюдательной сети. В дальнейшем требуется развитие технологий привлечения данных сетей гронопеленгаторов для выполнения оценок прогнозов гроз высокой детализации.

2.2. Выявленный уровень успешности прогнозов COSMO-Ru2By

Анализ базовых показателей качества в рамках стандартной части испытаний показал [14], что успешность прогнозов по COSMO-Ru2By:

– *приземной температуры воздуха*: на ЕТР и в Республике Беларусь была на уровне всех моделей, но лучше, чем PLAV20, однако несколько хуже модели ICON; на Кавказе – одинаково с моделью COSMO-Ru6ENA и лучше других моделей (рис. 6) [15];

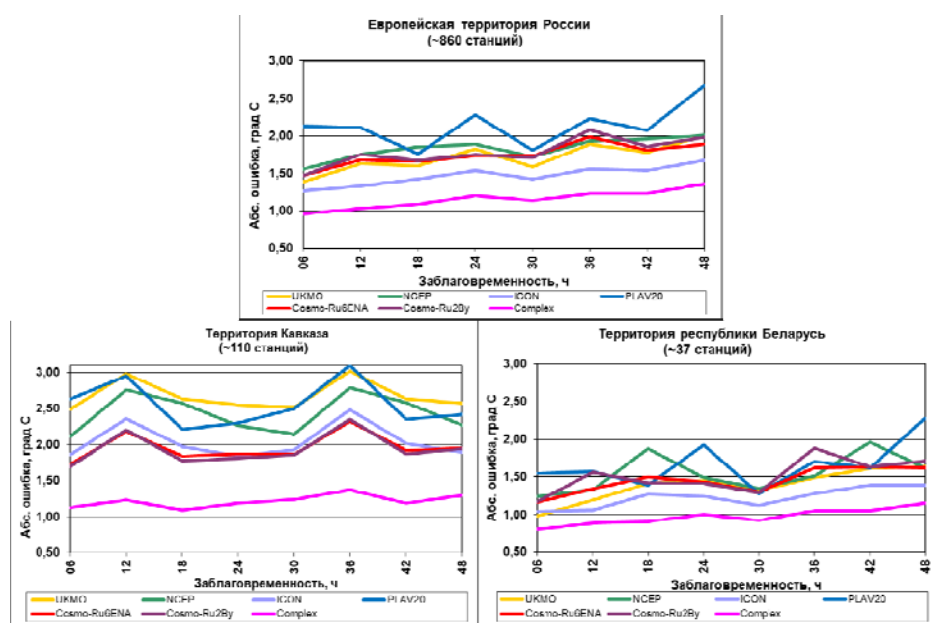


Рис. 6. Осредненная по всему периоду испытаний абсолютная ошибка прогнозов приземной температуры воздуха (T2m). Малиновой линией показан уровень качества по комплексному прогнозу, выполняющему статистическую коррекцию модельных прогнозов по нескольким моделям (method.hydromet.ru).

Fig. 6. Absolute error of near-surface air temperature (T2m) forecasts averaged over the entire trial period (at the level of 2 m). The purple line shows the level of quality according to the “complex” forecast, which performs statistical correction of the model forecasts for several models (method.hydromet.ru).

– *фонового приземного ветра*: оказалась примерно на уровне всех участвующих моделей, но несколько хуже, чем по продукции моделей ICON (Германия) и JMA (Япония);

– *давления на уровне моря*: оказалась несколько хуже всех других моделей, за исключением оценок для региона Кавказа, где успешность была примерно на уровне других моделей;

– *порывов ветра* (их предоставляют только модели NCEP, ICON, COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By): с заблаговременностью 12 ч для случаев ≥ 12 м/с – хорошей (см. табл. 2), со значениями предупрежденности свыше 50 % (эту «планку преодолели только COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By) и в 1,5 раза более низкими значениями коэффициента ложных тревог в сравнении с COSMO-Ru6ENA; ≥ 18 м/с – удовлетворительной, ≥ 24 м/с – мало удовлетворительной (как и у других моделей);

– *12-часовых сумм осадков до 24 часов*: по всем критериям оказалась выше других моделей и наравне с лучшей моделью ICON, а также COSMO-Ru6ENA.

В табл. 2 приведен пример оценок порывов ветра при сравнении «точка в точку» по продукции моделей NCEP (США), ICON (Германия), COSMO-Ru6ENA и COSMO-Ru2By по следующим показателям: U – общая оправдываемость; POD – предупрежденность явления; kLT – коэффициент «ложных тревог», БХ – критерий Багрова – Хейдке (HSS – по международной терминологии); ETS (Equitable Threat Score) – «справедливый уровень угрозы» (например, [5]). Использовались данные наблюдений примерно 800 станций на ETP.

Значения от N00 до N22 составляют таблицу сопряженности:

N00	N01	N02
N10	N11	N12
N20	N21	N22,

в которой

N00 – общее число случаев,

N01 = N11+N21 – число случаев с явлением,

N02 = N12+N22 – число случаев с отсутствием явления,

N10 = N11+N12 – число случаев с прогнозом явления,

N11 – явление прогнозировалось и наблюдалось,

N12 – явление прогнозировалось, но не наблюдалось («ложные тревоги»),

N20 = N21+N22 – число случаев с прогнозом отсутствия явления,

N21 – прогнозировалось отсутствие явления, но оно наблюдалось («пропуск цели»),

N22 – прогнозировалось отсутствие явления и его не наблюдалось.

Следуя приведенным данным, по большинству показателей у конфигурации COSMO-Ru2By была выявлена высокая успешность и превосходство аналогичных показателей доступных синоптикам Росгидромета видов продукции глобальных моделей (исключение составляет модель

ICON с предоставляемой продукцией на сетке высокого разрешения, что обсуждалось выше).

Таблица 2. Оценка прогнозов порывов ветра (≥ 12 м/с) на 12 ч по ЕТР для периода 16 мая – 15 сентября 2021 г.

Table 2. Estimation of wind gust (≥ 12 m/s) forecasts for 12 hours according to ETP for the period May 16 – September 15, 2021

Модель прогноза	Численные значения коэффициентов таблицы сопряженности			U	POD	kLT	БХ	ETS
NCEP	N00=98736	N01=11589	N02=87147	22	26	0,18	0,31	0,18
	N10=5020	N11=2981	N12=2039					
	N20=93716	N21=8608	N22=85108					
COSMO-Ru2By	N00=94302	N01=11078	N02=83224	28	58	1,08	0,34	0,20
	N10=18465	N11=6455	N12=12010					
	N20=75837	N21=4623	N22=71214					
COSMO-Ru6ENA	N00=96288	N01=11406	N02=84882	29	69	1,41	0,34	0,20
	N10=23849	N11=7821	N12=160228					
	N20=72439	N21=3585	N22=68854					
ICON	N00=100368	N01=11707	N02=88661	34	48	0,42	0,45	0,29
	N10=10609	N11=5667	N12=4942					
	N20=89758	N21=6040	N22=83719					

2.3. Анализ результатов расширенной части исследования

Результаты базовой части были подтверждены результатами более подробных исследований в рамках расширенной части. Например, при осреднении показателей прогнозов различных полей по всей области расчетов (рис. 7) скорость фонового ветра по COSMO-Ru2By (показано зеленым пунктиром) оказалась наименьшей при осреднении показателей для зимнего периода (декабрь 2020 г. – март 2021 г.) среди всех моделей, включая лидирующую в других ситуациях модель ICON (верхний левый

рисунок). В исследования были также включены прогнозы по конфигурации модели ICON, реализованной в Гидрометцентре России (по исходным данным системы усвоения Немецкой службы погоды) и в период испытаний производившей вычисления для апробации (коричневый пунктир).

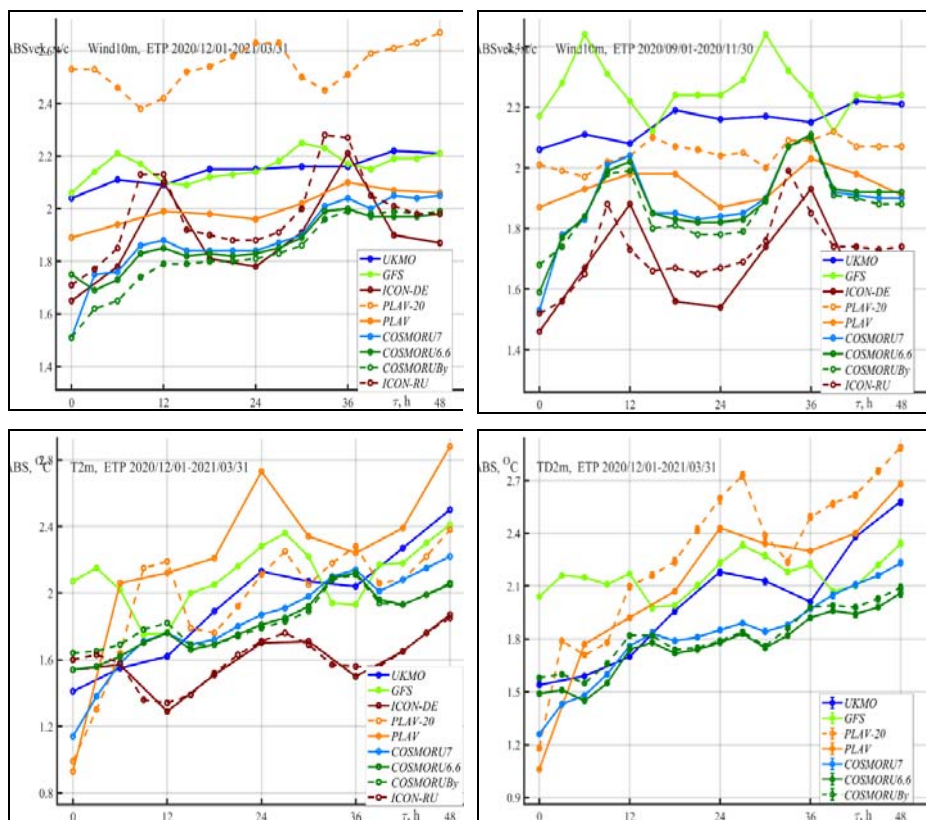


Рис. 7. Примеры показателей успешности осреднении по всей области вычислений прогнозов различных метеопараметров по COSMO-Ru2By (зеленый пунктир) в сравнении с другими моделями: региональными COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru7 и глобальными: ПЛАВ, GFS, UKMO, ICON. Вычисления ICON, выполненные в DWD показаны сплошными линиями, а в Гидрометцентре России – пунктиром. Названия метеопараметров, виды оценок и периоды осреднения указаны в верхней части областей построения графиков.

Fig. 7. Examples of success indicators of absolute errors when averaging over the entire calculation domain of forecasts of various meteorological parameters by COSMO-Ru2By (green dotted line) in comparison with other models: limited-area COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru7 and global: PLAV, GFS, UKMO, ICON. ICON run results performed in DWD are showed by solid lines and performed in Hydrometcenter of Russia – by dotted ones. The names of meteorological parameters, types of estimates and averaging periods are indicated in the upper part of the plotting areas.

Таким образом, при осреднении по всей области расчетов было выявлено небольшое преимущество COSMO-Ru2By перед «материнской» по отношению к ней COSMO-Ru6ENA в прогнозировании фонового ветра в осенне-зимний период и близкие значения показателей для температуры, точки росы и давления. Однако при осреднении по регионам со сложными географическими условиями (Северный Кавказ, Крым) было выявлено очевидное преимущество продукции COSMO-Ru2By перед всеми другими участвовавшими в сравнениях более пространственно-грубыми вариантами прогнозов других моделей и конфигураций, в том числе COSMO-Ru6ENA. Примеры соотношения успешности в этом случае приводятся на рис. 8. Однако в сравнении с результатами ранее внедренной конфигурации COSMO-Ru2 для Северного Кавказа (на рис. 8 – левые панели графиков, обозначение COSMO-Ru2,2YFO) результаты COSMO-Ru2By не показали преимущества, а в ряде случаев – некоторое ухудшение прогнозов.

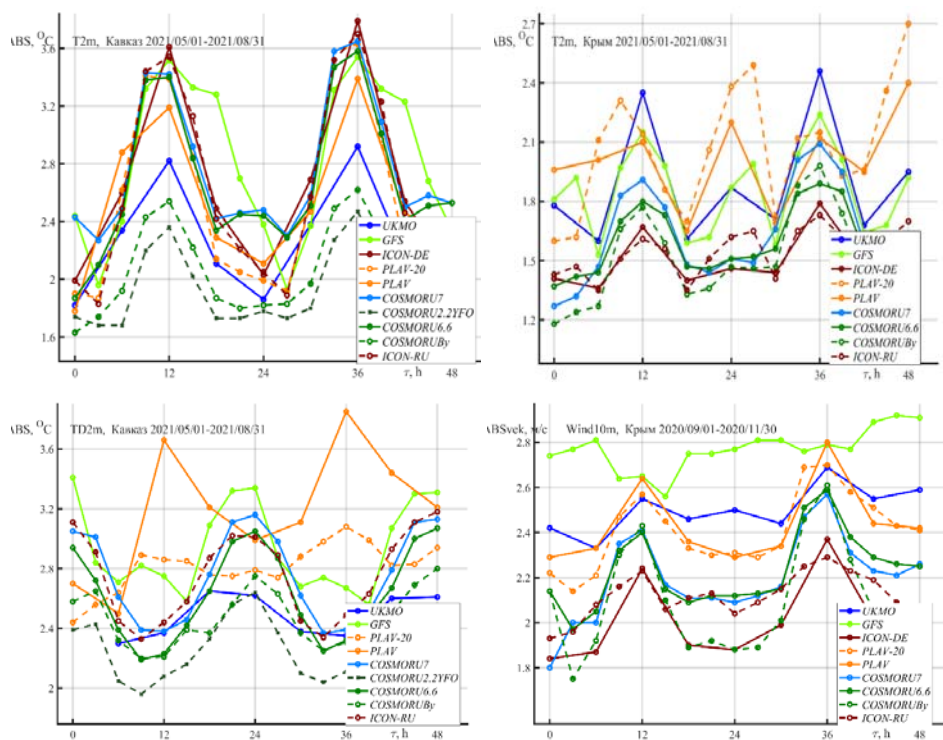


Рис. 8. Примеры показателей успешности, осредненных по регионам Крым и Северный Кавказ прогнозов различных метеопараметров по COSMO-Ru2By (зеленый пунктир) в сравнении с другими моделями.

Fig. 8. Examples of success indicators when averaging over the regions of Crimea and the North Caucasus for the forecasts of various meteorological parameters using COSMO-Ru2By (green dotted line) in comparison with other models.

Важным аспектом сравнения был анализ успешности прогнозов осадков. Несомненно, для летних осадков с высокой пространственно-временной изменчивостью, порой имеющих локальный характер, используемые данные сети метеостанций явно недостаточны для выявления особенностей продукции модели высокого разрешения. Кроме того, большое значение имеет подбор адекватных критериев успешности, учитывающих как «попадания в цель», так и штрафы за «ложные тревоги» с учетом редких событий. Для данного вида оценивания использовались значения прогностических полей, попавшие в зону радиуса 50 км вокруг пунктов наблюдений. В результате было выявлено убедительное преимущество прогнозов факта осадков в летний период по COSMO-Ru2By (на рис. 9 – самые правые столбики) по отношению к COSMO-Ru6ENA (как и по отношению к другим участвующим в сравнении моделям) для ЕТР по показателям ETS (0.25 по COSMO-Ru2By и значениям из интервала (-0.03; 0.15) по другим моделям) и критерию Пирса PSS (0.42 по COSMO-Ru2By и значениям из интервала (-15; 0.25) по другим моделям).

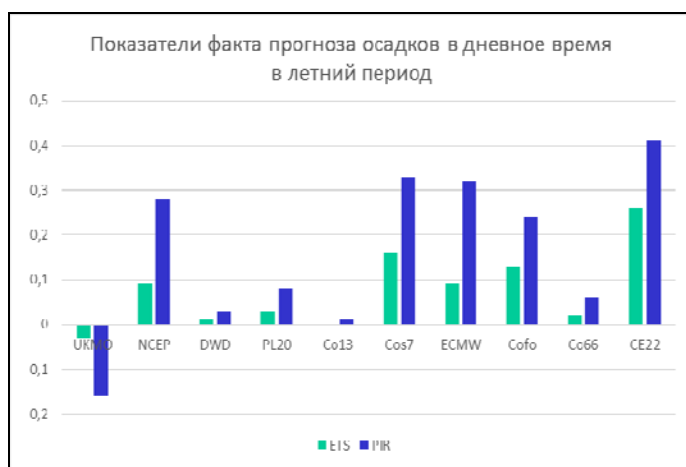


Рис. 9. Показатели успешности ETS (зеленый) и критерия Пирса (синий) для прогнозов по различным моделям, осредненные по ЕТР для прогнозов 12 ч сумм осадков на 36 часов для летнего периода. Сравнение наблюдений с результатами прогнозов в узлах на расстоянии до 50 км от станции наблюдений для летнего периода. По оси X – обозначения моделей – глобальных: UKMO, NCEP, ECMWF, PL20; и конфигураций модели COSMO в системах COSMO-Ru: Co13 – COSMO-Ru13ENA, Cos7 – COSMO-Ru7; Cofo – COSMO-Ru2CFO; Co66 – COSMO-Ru6ENA; CE22 – COSMO-Ru2By.

Fig. 9. ETS (green) and the Peirce Skill Score PSS (blue) averaged over European Part of Russia for various models of 12 hour precipitation sums for 36 lead time, summer period. The comparison of measurements with forecast results at nodes at a distance of up to 50 km from the observing station. Axe X: Indices of global models UKMO, NCEP, ECMWF, PL20; and COSMO-Configurations in COSMO-Ru systems Co13 – COSMO-Ru13ENA, Cos7 – COSMO-Ru7; Cofo – COSMO-Ru2CFO; Co66 – COSMO-Ru6ENA; CE22 – COSMO-Ru2By.

Особенности использования данных критериев рассмотрены в [4, 5]. Отметим, что при сравнении «точка в точку» и применения метрик типа общей оправдываемости по градациям преимущества по COSMO-Ru2Bu не носили такого убедительного характера.

Дополнительные сравнения показали, что для ЦФО при сравнении COSMO-Ru2Bu с ранее внедренной конфигурацией COSMO-Ru2CFO, также имеющей шаг сетки 2,2 км, наблюдалась близкая успешность при меньших ошибках, характеризующих количество осадков (систематическая и средняя абсолютная ошибки). Для региона Северного Кавказа прогнозы осадков по COSMO-Ru2Bu оказались несколько менее успешными, чем у внедренной конфигурации COSMO-Ru2YFO для Северного Кавказа (с 2016 г. основной метод численного прогноза по этому региону).

Следующим аспектом анализа успешности точности технологии на основе COSMO-Ru2Bu был анализ успешности сверхкраткосрочных прогнозов, включая наукастинг, по данным радарных измерений. Результаты такого сравнения рассматривались в период оперативных испытаний; в настоящей статье на рис. 10 также приводятся данные за летние месяцы 2022 г. (в связи с возможностью более полного анализа). Так, верификация 1-часовых сумм осадков по данным ДМРЛ-С в оба проанализированных летних периода 2021 и 2022 гг. выявила существенное превосходство COSMO-Ru2Bu, усваивающей радарную информацию, перед всеми другими моделями и конфигурациями COSMO-Ru для порога интенсивностей осадков 5 мм/ч на интервалах сверхкраткосрочного прогноза (от 0 до 12 часов от момента выпуска).

На рис. 10 показаны результаты сравнительной оценки прогнозов 1-часовых сумм осадков на интервалах сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов, выполненные в рамках технологических возможностей развивающейся системы наукастинга Гидрометцентра России [6]. Оценки были рассчитаны путем сопоставления в квадратах 1-градусной сетки результатов прогнозов по узлам модели, расположенных в пределах 30 км от квадрата сравнения. На рисунке голубыми линиями показаны оценки COSMO-Ru2Bu (обозначение на рисунке COSMO2ETR). Из рисунка видно, что в указанной градации COSMO-Ru2Bu имеет наименьшие значения показателя ложных тревог (FAR), а также самые высокие значения предупрежденности (POD) и пространственной оценки доли попаданий FSS (Fractions Skill Score) [5]. Наиболее высокие значения FSS наблюдались в первые часы выпуска прогнозов и на интервалах сверхкраткосрочного прогноза.

Наиболее очевидное превосходство COSMO-Ru2Bu перед прогнозами других модельных источников было выявлено для градации осадков с интенсивностью более 5 мм/1ч. Важным методическим результатом данной работы является получение одного из немногочисленных опытов в нашей стране оценок успешности гидродинамических прогнозов локальных явлений на основе радарной информации наряду с [4, 6].

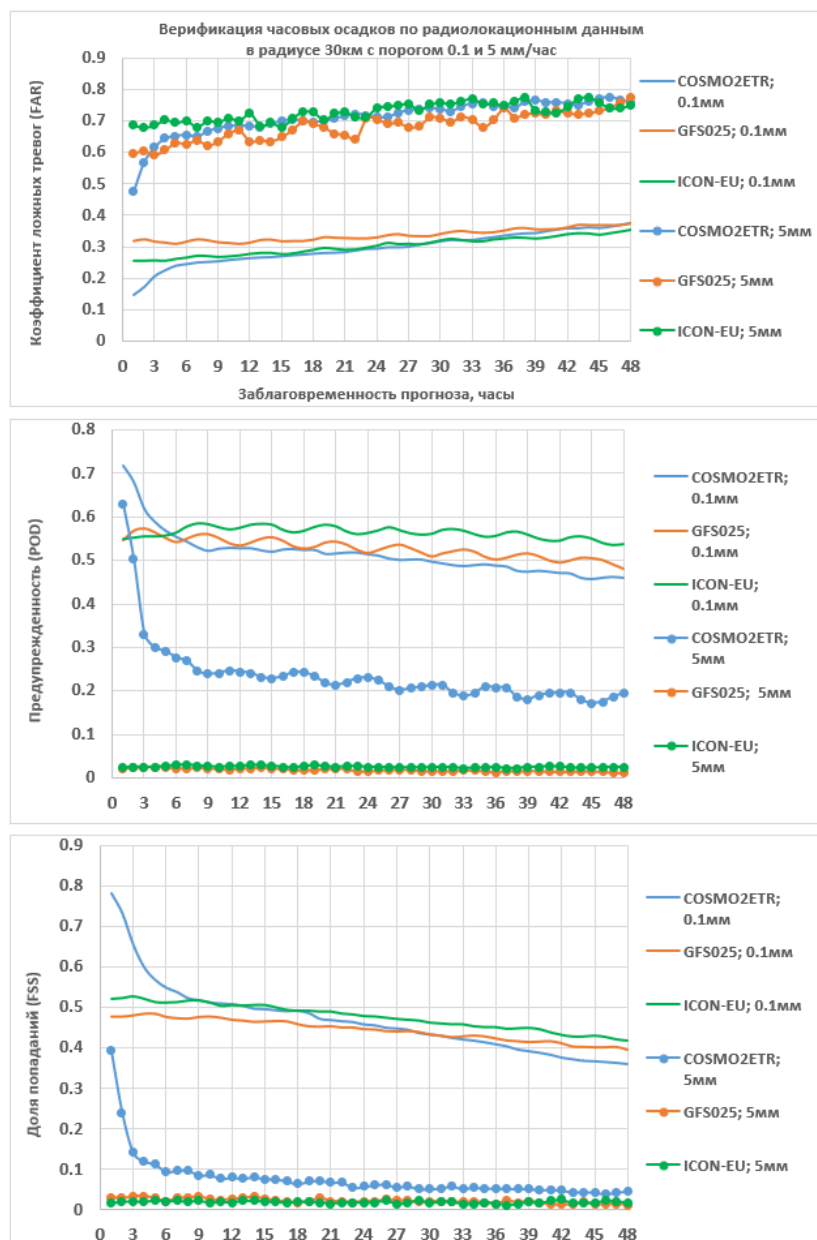


Рис. 10. Результаты сравнения прогнозов 1-часовых сумм осадков с данными ДМРЛ-С (использованы данные в радиусе 30 км в окрестности модельных узлов) для порогов 0,1 и 5 мм/ч, период 1 июня – 1 августа 2022 г. (Расчет оценок выполнен на основе системы special.meteoinfo.ru).

Fig. 10. Results of comparison of 1-hour precipitation sums forecasts with DMRL-S data (data in a 30-km radius over model nodes are used) for a threshold of 0.1 and 5 mm/h, for June 1 – August 1, 2022 (Estimates were calculated based on the special.meteoinfo.ru system).

При оценках порывов ветра, имеющих в летний период локальный характер, особенно важен подбор соответствующих метрик для получения информативных оценок свойств прогнозов. Также в этом случае очевидно проявление проблемы «двойных штрафов». В этой связи разумно применение окрестных методов верификации. В рамках проведенных испытаний, по данным не очень густой наблюдательной сети, реально было ограничиться привлечением данных прогнозов в окрестности 50 км от пунктов наблюдений. В результате для прогнозов порывов ветра свыше 18 м/с для летнего и зимнего периодов было выявлено превосходство успешности прогнозов COSMO-Ru2By над материнской моделью COSMO-Ru6ENA для ЕТР и Республики Беларусь при применении критерия HSS, причем по окрестности 50 км (что приблизительно соответствует 0,5 град) это преимущество оказалось весьма убедительным (рис. 11).

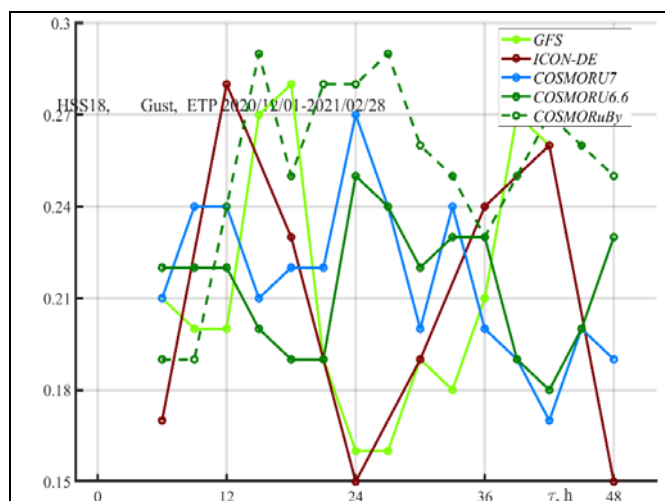


Рис. 11. Пример значений HSS для порывов ветра для окрестности 50 км вокруг пунктов.

Fig. 11. Example of HSS values for wind gusts for a 50 km neighborhood around.

Важным аспектом испытательного периода были ежедневные экспертные оценки прогнозистов предлагаемой графической продукции по COSMO-Ru2By. Визуальное сопоставление карт прогнозов зон грозовой активности (по индексу LPI, [18, 24]) и радарной отражаемости с картами грозопеленгаторов и радарных композитов (например, [25]) подтвердили важную информативность этих прогнозов. В дальнейшем целесообразно создание в Гидрометцентре России технологии получения и использования информации грозопеленгаторов в цифровом виде для получения объективных оценок успешности численных прогнозов высокой детализации прогнозов опасных конвективных явлений локального характера.

Обсуждение и выводы

Анализ успешности прогнозов погоды на основе разработанной технологической линии COSMO-Ru2By за тестовые периоды сравнения во время оперативных испытаний 2020–2021 гг. и подтвержденным результатам мониторинга в 2022 г. выявил, что сверхкраткосрочные и краткосрочные до 48 часов прогнозы COSMO-Ru2By имеют высокую успешность в подавляющем большинстве случаев в сравнении с доступной прогнозистам Росгидромета продукцией глобальных моделей – отечественной ПЛАВ и зарубежных, полученных по каналам ГСТ, на сетках от $0,5^\circ$ до $1,25^\circ$ (исключение составляет модель ICON с продукцией на сетке разрешения $0,25^\circ$, не циркулирующей по каналам ГСТ); при этом отмечено некоторое отставание успешности прогнозов давления на уровне моря COSMO-Ru2By.

Исходя из проведенного в статье исследования успешности прогнозов конфигурации COSMO-Ru2By модели COSMO можно сделать следующие выводы.

- По сравнению с «материнской» моделью COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru2By в большинстве случаев показала близкую успешность; выявлено преимущество COSMO-Ru2By перед COSMO-Ru6ENA и всеми другими участвовавшими в сравнениях моделями в прогнозах факта осадков для летнего периода по показателям ETS и критерию Пирса (PSS), а также порывов ветра свыше 18 м/с для летнего периода при использовании данных метеостанций в окрестности 50 км по критерию Хайдке (HSS), используемого для оценок редких событий.

- Использование этих критериев целесообразно ввести в нормативы для оперативных испытаний, поскольку в текущий период все больше технологий будут иметь высокое разрешение, преимущество которого в сравнении с более сглаженными методиками не всегда возможно выявить при использовании стандартных подходов сравнения «точка в точку».

- Выявлено существенное превосходство прогнозов технологии COSMO-Ru2By по сравнению с COSMO-Ru6ENA по всем параметрам приземной погоды для регионов со сложной орографией (Северный Кавказ, Крым). Однако выявлено и некоторое снижение успешности по сравнению с результатами вычислений конфигурации с тем же шагом $2,2$ км для региона Северного Кавказа (COSMO-Ru2YFO, внедренная в 2016 году [24]), не учитывающей данные ДМРЛ-С.

- Проведено сравнение сверхкраткосрочных прогнозов 1-часовых сумм осадков с данными ДМРЛ-С и выявлено существенное превосходство успешности прогнозов осадков с интенсивностью свыше 5 мм/ч при сравнении с данными ДМРЛ-С по сравнению со всеми доступными данными других моделей, а также конфигурацией COSMO-Ru6ENA, не усваивающей радарную информацию.

- Использование усвоения данных об интенсивности осадков по радарным наблюдениям по методу LHN позволяет улучшить качество

начальных данных не только для прогнозов осадков, но и для сопутствующих характеристик: порывов ветра, грозовой активности, локальных возмущений в поле давления, температуры, точки росы. К сожалению, существующая сеть метеостанций, как правило, не улавливает таких быстрых изменений. В отдельных случаях они могут регистрироваться на АМС с 10-минутной периодичностью измерений, профиломерах или ДМРЛ-С, данные которых в будущем целесообразно привлекать для проведения оперативных испытаний.

• Выявленные преимущества COSMO-Ru2By при прогнозировании локальных явлений преимущественно конвективной природы (γ -мезомасштаба), по оценкам с применением радиусов 30 и 50 км относительно точек наблюдений свидетельствуют о целесообразности учета этих свойств прогнозистами при интерпретации результатов численных прогнозов высокой детализации.

Выполненный анализ указал на ряд позиций для дальнейшего усовершенствования технологии выпуска численных прогнозов на основе COSMO-Ru2By. Так, было отмечено два важных случая небольшого систематического «отставания» COSMO-Ru2By:

1. *Оценки давления на уровне моря.* Выявлено небольшое систематическое «отставание» (порядка 0,5 гПа в течение всего прогноза, в начале прогностического периода существенно меньше). Причиной этому, по всей видимости, является использование в качестве полей первого приближения, для последующего усвоения данных, сверхкраткосрочных прогнозов по COSMO-Ru6ENA, несколько теряющих точность к заблаговременности 6 часов, а не результатов системы усвоения из системы глобального прогноза ICON (в которых большое внимание, в частности, уделено информации МИСЗ). Причем в начале прогностического периода отклонения минимальны, поскольку COSMO-Ru2By усваивает текущие данные приземного давления. Старт от полей прогноза COSMO-Ru6ENA (не дожидаясь поступления результатов ICON) позволяет получить прогнозы по COSMO-Ru2By на 1 час раньше и снизить эффекты спин-апа, что важно для наукастинга. Однако в последующие 12 часов имеется существенно меньшее количество информации, используемое при усвоении данных, что приводит к снижению качества прогноза давления.

2. *Оценки ряда метеорологических параметров для региона Северного Кавказа в сравнении с конфигурацией COSMO-Ru2YFO, также имеющей шаг сетки 2,2 км.* Отметим, что в технологии COSMO-Ru конфигурация COSMO-Ru2YFO функционирует в «стандартном» режиме (см. раздел 1, табл. 1), т. е. с использованием результатов глобальной СУД технологии ICON за начальный срок прогнозов, а COSMO-Ru2By – за предыдущий с последующим Nudging усвоением. По-видимому, для данного региона процедуры Nudging и доступных ей данных наблюдений недостаточно для достижения уровня прогнозов, базирующихся на результатах СУД ICON. Интересно, что для района ЦФО такого ухудшения качества выявлено не было: по-видимому, ЦФО оказался существенно

лучше освещен данными наблюдений, доступными Nudging (аэрологические и синоптические метеостанции, ДМРЛ-С).

Таким образом, целесообразно оперативно считать COSMO-Ru2By в обоих режимах, о которых идет речь в разделе 1: экспериментальном (для которого был получен набор оценок при выполнении испытаний) для прогнозов на ближайшие часы с усвоением данных метеостанций и радарной информации по методам Nudging и LHN, очень ценным при прогнозировании опасных явлений на ближайший период и счетом до 18 часов каждые 3 часа; и стандартном, также с усвоением данных по методам Nudging и LHN, однако после получения результатов усвоения данных ICON, нацеленных на прогнозирование погоды на ближайшие 2 суток. Результаты прогнозов в этом режиме в итоге будут формироваться примерно на час позже.

Несмотря на указанные небольшие недостатки, анализ качества прогнозов по COSMO-Ru2By, проведенный во время испытаний в период 2020–2021 гг. и подтвержденный последующим мониторингом успешно, свидетельствует о его высоком уровне и целесообразности преимущественного использования прогнозов до 48 ч перед всеми другими технологиями с более грубым разрешением сеток, включая COSMO-Ru6ENA в летние месяцы и для горных регионов.

Отметим, что по результатам проведенных испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [<http://method.meteorf.ru/>] рекомендовала внедрить в оперативную практику Гидрометцентра России и прогностических центров Росгидромета сверхкраткосрочный и краткосрочный численный прогноз по конфигурации COSMO-Ru2By до заблаговременности 48 ч следующих характеристик:

- ✓ приземные температура, влажность и скорость ветра, наряду с основным методом COSMO-Ru6ENA как дополняющий и детализирующий;
- ✓ осадки в качестве основного метода численного прогноза;
- ✓ порывы ветра свыше 12 и 18 м/с в качестве вспомогательного метода численного прогноза.

Список литературы

1. Быков Ф.Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 5-20.
2. Блинов Д.В., Ривин Г.С. Система краткосрочного негидростатического прогноза погоды COSMO-Ru: технологическая линия // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 142-162.
3. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2006. 127 с.
4. 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.
5. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
6. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Накастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 92-111.

7. Полюхов А.А., Блинов Д.В. Оценка влияния учета аэрозолей на прогноз температуры по данным модели COSMO-Ru // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 29-39.
8. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. Информационный сборник № 39. С. 15-48.
9. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. Информационный сборник № 44. С. 25-55.
10. 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. 58-71.
11. Ривин Г.С., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Розинкина И.А., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Захарченко Д.И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 33-45.
12. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеоусловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского региона // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5-19.
13. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.И., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Татаринович Е.В., Чурилин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 37-53.
14. Ривин Г.С., Багров А.Н., Розинкина И.А., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Шатунова М.В., Воробьева Е.В. Краткосрочный численный прогноз высокого разрешения приземной погоды и метеорологических параметров свободной атмосферы на базе конфигурации COSMO-Ru6ENA (шаг сетки 6,6 км, заблаговременность до 84 часов) модели COSMO по Северной Евразии, включая СНГ // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2022. Информационный сборник № 49. С. 57-71.
15. Розинкина И.А., Елисеев Г.В., Ривин Г.С., Багров А.Н., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Шатунова М.В., Захарченко Д.И., Бундель А.Ю., Воробьева Е.В., Астахова Е.Д., Алферов Ю.В., Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Васькова Д.В. Краткосрочный численный прогноз погоды заблаговременностью до 48 часов на основе модели атмосферы высокого пространственного разрешения COSMO-Ru2Bu (шаг сетки 2,2 км) для Европейской территории России и для Республики Беларусь // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2022. Информационный сборник № 49. С. 72-91.
16. 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. Формирование продукции систем негидростатического моделирования атмосферы COSMO-RuBu (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного прогноза погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 6-30.
17. Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities // Mon. Wea. Rev. 2011. Vol. 139. P. 3887-3905.
18. Brisson E., Blahak U., Lucas-Picher Ph., Purr C., Ahrens B. Contrasting lightning projection using the lightning potential index adapted in a convection-permitting regional climate model // Climate Dynamics. 2021. Vol. 57, no. 12. P. 2037-2051.

19. Stephan K., Klink S., Schraff C. Assimilation of radar-derived rain rates into the convective model COSMO-DE at DWD // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2008. Vol. 134. P. 1315-1326.
20. Stephan K., Schraff C. Improvements of the operational latent heat nudging scheme used in COSMO-DE at DWD // COSMO Newsletter. 2008. Vol. 9. P. 7-11.
21. Steppeler J., Doms G., Schaettler U., Bitzer H.-W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM // Meteorol. Atmos. Phys. 2003. Vol. 82. P. 75-96.
22. Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOSahedral Nonhydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the nonhydrostatic dynamical core // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2015. Vol. 14. P. 563-579.
23. Сайт консорциума COSMO с документацией модели COSMO: <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>. 11.
24. Образовательный раздел сайта NOAA: https://www.weather.gov/gjt/LPI_Tutorial#
25. Сайт интегрированных оперативных сведений о грозовой активности: lightning-maps.org

References

1. Bykov F.L. Statistical Correction of the COSMO Model Weather Forecasts Based on Neural Networks. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2020, vol. 45, pp. 141-152. DOI: 10.3103/S1068373920030012.
2. Blinov D.V., Rivin G.S. The short-term non-hydrostatic mesoscale weather forecast system COSMO-Ru: The technological line. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 142-162 [in Russ.].
3. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. *Mezometeorologicheskie processy: Uchebnoe posobie*. Moscow, MSU publ., 127 p. [in Russ.].
4. 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.].
5. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Yu. *Metodicheskie rekomendatsii po verifikatsii meteorologicheskikh prognozov*. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].
6. Kiktev D.B., Muravev A.V., Smirnov A.V. Nowcasting of meteorological parameters and hazards: implementation experience and development prospects. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 92-111 [in Russ.].
7. Poliukhov A.A., Blinov D.V. Aerosol Effects on Temperature Forecast in the COSMO-Ru Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021, vol. 46, pp. 19-27. DOI: 10.3103/S1068373921010039.
8. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru7 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2012. Informatsionnyy sbornik № 39, pp. 15-48 [in Russ.].
9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Kuz'mina E.V., Shatunova M.V., Chumakov M.M., Alferov D.Yu., Bundel' A.Yu., Zaychenko M.Yu., Nikitin M.A. Mezomasshtabnaya model' COSMO-Ru2 i rezul'taty ee operativnykh ispytaniy. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2017. Informatsionnyy sbornik № 44, pp. 25-55 [in Russ.].
10. 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, pp. 400-410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.
11. Rivin G.S., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rozinkina I.A., Tudriy K.O., Blinov D.V., Var-entsov M.I., Samsonov T.E., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Zakharchenko D.I. The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 729-738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.

12. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Tudrii K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Samsonov T.E., Repina I.A., Artamonov A.Yu. Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 455-465. DOI: 10.3103/S1068373920070018.

13. 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., Kopeykin 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.].

14. Rivin G.S., Bagrov A.N., Rozinkina I.A., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Shatunova M.V., Vorob'eva E.V. Kratkosrochnyy chislennyy prognoz vysokogo razresheniya prizemnoy pogody i meteorologicheskikh parametrov svobodnoy atmosfery na baze konfiguratsii SOSMO-Ru6ENA (shag setki 6,6 km, zablagovremennost' do 84 chasov) modeli SOSMO po Severnoy Evrazii, vlyuchaya SNG. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2022. Informatsionnyy sbornik № 49, pp. 57-71 [in Russ.].

15. Rozinkina I.A., Eliseev G.V., Rivin G.S., Bagrov A.N., Blinov D.V., Bykov F.L., Shatunova M.V., Zakharchenko D.I., Bundel' A.Yu., Vorob'eva E.V., Astakhova E.D., Alferov YU.V., Kirsanov A.A., Kopeykin V.V., Polyuhov A.A., Revokatova A.P., Vas'kova D.V. Kratkosrochnyy chislennyy prognoz pogody zablagovremennost'yu do 48 chasov na osnove modeli atmosfery vysokogo prostranstvennogo razresheniya COSMO-Ru2By (shag setki 2,2 km) dlya Evropeyskoy territorii Rossii i dlya Respubliki Belarus'. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2022, Informatsionnyy sbornik № 49, pp. 72-91.

16. 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. Forming of the products of non-hydrostatic modelling systems for short-range weather prediction COSMO-RuBy (Hydrometcentre of Russia) и WRF-ARW (Belhydromet). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 382, no. 4, pp. 6-30 [in Russ.].

17. Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 139, pp. 3887-3905.

18. Brisson E., Blahak U., Lucas-Picher Ph., Purr C., Ahrens B. Contrasting lightning projection using the lightning potential index adapted in a convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, 2021, vol. 57, no. 12, pp. 2037-2051.

19. Stephan K., Klink S., Schraff C. Assimilation of radar-derived rain rates into the convective model COSMO-DE at DWD. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 1315-1326.

20. Stephan K., Schraff C. Improvements of the operational latent heat nudging scheme used in COSMO-DE at DWD. *COSMO Newsletter*, 2008, vol. 9, pp. 7-11.

21. Steppeler J., Doms G., Schaettler U., Bitzer H.-W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2003, vol. 82, pp. 75-96.

22. Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the nonhydrostatic dynamical core. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 14, pp. 563-579.

23. Sajt konsorciuma COSMO s dokumentacij modeli COSMO: <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>. 11.

24. Obrazovatel'nyj razdel sajta NOAA: https://www.weather.gov/gjt/LPI_Tutorial#

25. Sajt integrirovannyh operativnyh svedenij o grozovoj aktivnosti lightningmaps.org

Поступила 12.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 12.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-35-54>

УДК 551.509.39

Роль изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба в задаче долгосрочного прогноза аномалий погоды

Р.Ю. Фадеев

Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия;

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия;

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

rost.fadeev@gmail.com

Рассматриваются уточнения модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ, которые позволили заметно уменьшить систематические ошибки воспроизведения осредненных характеристик атмосферной циркуляции. Особое внимание уделяется алгоритму параметризованного описания изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба и его роли в методологии расчёта потоков турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы. Выводы о статистической значимости влияния рассматриваемых изменений на точность воспроизведения атмосферной циркуляции сделаны на основе анализа качества ретроспективных долгосрочных прогнозов с заблаговременностью до четырех месяцев для двух сезонов, а также на основе исследования осредненных характеристик модельной атмосферы в сравнении с реанализом ERA5.

Ключевые слова: модель общей циркуляции атмосферы, численный прогноз погоды, параметризации процессов подсеточного масштаба, подсеточная изменчивость ветра

Wind gustiness parameterization and long-range weather prediction

R. Yu. Fadeev

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia;

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Russia

rost.fadeev@gmail.com

The paper discusses a number of refinements to the SL-AV atmospheric model, which allowed substantially reducing systematic errors in reproducing the averaged characteristics of the atmospheric circulation. Particular attention is paid to the wind gustiness parameterization and the calculation procedure of turbulent fluxes in the planet boundary layer. The statistical significance of the influence of the considered changes on the accuracy of atmospheric circulation simulation is concluded based on analyzing the quality of retrospective long-range forecasts with a lead time up to four months (for two seasons) and on studying the averaged characteristics of the model atmosphere in comparison with the ERA5 reanalysis.

Keywords: Atmospheric general circulation model, numerical weather prediction, parameterization, wind gustiness

Введение

Контраст температуры и влажности между нижней тропосферой и поверхностью Земли является причиной возникновения потоков тепла и влаги между ними. В прогностических моделях погоды и климата применяются, как правило, основанные на пионерских работах Мони́на и Обухова [3] параметризованные способы описания этих потоков. Характер обмена некоторой величиной у поверхности в данном случае зависит от ее вертикального градиента и горизонтальной скорости ветра. Последнее характеризуется большой подсеточной изменчивостью, недооценка которой может вести к систематическим ошибкам в описании атмосферной циркуляции [10, 27].

Первые способы учета изменчивости скорости ветра на подсеточном масштабе в глобальной модели общей циркуляции атмосферы были предложены в работах [9, 18, 20, 29], где предлагались поправки к формуле для вычисления горизонтального компонента скорости ветра. В работе [30], обобщающей предшествующие исследования, указывается на два основных источника усиления скорости ветра на подсеточном масштабе: обусловленная неоднородностями характеристик поверхности мезомасштабная циркуляция в пограничном слое атмосферы и вторичные процессы, сопутствующие явлениям глубокой конвекции. Подход, предложенный в [30] с небольшими модификациями был применен во многих прогностических моделях: в Unified Model Метеорологического бюро Великобритании [32], в CanAM4 канадского климатического центра [25], в совместной модели JMA/MRI–CPS3 метеорологического центра Японии [24], в американской модели E3SM [27], в ALADIN французского метеобюро [13] и др. Альтернативные и обобщающие методы учета изменчивости скорости ветра на подсеточном масштабе обсуждаются в работах [11, 13].

В глобальной модели атмосферы ПЛАВ [5, 6] также применяется параметризация, основанная на идеях, изложенных в [13, 30] и адаптированная для применения с параметризацией пограничного слоя атмосферы, использующей третьи моменты [8]. Модель ПЛАВ в версии 072L96 для долгосрочного прогноза аномалий погоды была представлена к оперативным испытаниям в Гидрометцентре России в начале 2022 года. Аббревиатура 072L96 включает в себя информацию о разрешении расчетной сетки (применяется регулярная широтно-долготная сетка с шагом 0.72° по долготе и 0.9° по широте) и число уровней по вертикали, равное 96. Ожидается, что ПЛАВ 072L96 заменит собой предыдущую версию ПЛАВ 2008, которая вместе с моделью Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова [2] применяется сейчас в Гидрометцентре России в качестве одного из компонентов оперативной технологии долгосрочного прогнозирования аномалий погоды [1]. Предполагается, что ПЛАВ 072L96 станет также основным инструментом прогнозирования погодных аномалий на субсезонном масштабе времени в Гидрометцентре России.

Представленные в работе результаты настройки параметризации для учета влияния изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба на коэффициенты турбулентного перемешивания воздуха (на поверхности, в том числе), а также несколько других модификаций позволяют заметно повысить точность воспроизведения атмосферной циркуляции в верхней тропосфере на основе ПЛАВ.

В разделе 1 представлено описание методологии параметризованного описания изменчивости скорости ветра на подсеточном масштабе, которая используется в модели атмосферы ПЛАВ. Раздел 2 посвящен описанию т. н. уточненной версии ПЛАВ. В разделе 3 обсуждаются результаты численных экспериментов по воспроизведению осредненных характеристик атмосферы в рамках экспериментов с большой заблаговременностью. В разделе 4 приводятся результаты ретроспективных долгосрочных прогнозов с заблаговременностью до четырех месяцев. В заключении делаются выводы по работе.

1. Способы параметризованного описания изменчивости скорости ветра на подсеточном масштабе

Параметризованные способы описания потоков тепла, влаги и импульса между поверхностью и нижней тропосферой в прогностических моделях погоды и климата обычно основаны на объемных аэродинамических соотношениях, связывающих характеристики поверхности и нижнего модельного уровня. Интенсивность обмена в таком случае определяется градиентом рассматриваемой величины A по вертикали и горизонтальной скоростью ветра U на нижнем модельном уровне. Поток F_A величины A между нижним модельным уровнем (atm) и поверхностью ($surf$) в прогностических моделях обычно вычисляется по следующей формуле [3]:

$$F_A = -C_A (A_{atm} - A_{surf}) U_{atm}, \quad (1)$$

где C_A – коэффициент обмена.

Осредненная крупномасштабная скорость U_{atm} в глобальной модели почти всегда меньше скорости ветра $\bar{U}$ на подсеточном масштабе, что обусловлено наличием атмосферных процессов, явно не разрешаемых численной моделью. Неравномерный по горизонтали нагрев верхнего слоя океана может приводить к появлению в атмосфере мезомасштабных вихрей с характерным размером около одного километра [9, 18]. Сопровождающиеся подъемом и опусканием масс воздуха явления мелкой и глубокой конвекции также приводят к усилению горизонтального ветра [20]. Таким образом, недоучет изменчивости приземной скорости ветра подсеточного масштаба в численной модели должен приводить к систематическому занижению потоков, характеризующих обмен между

атмосферой и поверхностью. В [16], например, показано, что усиление потока испарения влаги с поверхности вследствие мезомасштабной циркуляции может достигать величины около 30 %.

В настоящее время существует несколько подходов для параметризованного описания изменчивости приземной скорости ветра подсеточного масштаба и ее влияния на потоки между нижним модельным уровнем и поверхностью. В случае сухой атмосферы в формулу Чарнока для предельной длины перемешивания вводится дополнительное слагаемое, не зависящее от скорости ветра:

$$z_0 = \frac{C_k}{g} u_*^2 + \frac{C_d}{C_{dn}} z_0^m. \quad (2)$$

В уравнении (2) C_d – коэффициент обрушения; C_{dn} – коэффициент обрушения при нейтральной стратификации; z_0^m – настраиваемый параметр, соответствующий предельной длине перемешивания импульса в случае слабых ветров.

В случае, когда воздух нельзя считать сухим, для описания изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба часто используется подход, предложенный в [20], где в формуле (1) предлагается использовать скорость $\bar{U}$, вычисляемую согласно следующему уравнению:

$$\bar{U}^2 = \sqrt{U_{atm}^2 + U_{gust}^2}, \quad (3)$$

где U_{gust} – поправка, обусловленная изменчивостью скорости ветра на подсеточном масштабе. В работе [30] рассматривается метод вычисления этой поправки в зависимости от интенсивности осадков P и характерной скорости потоков воздуха в конвективном термике.

В [22] обсуждаются результаты внедрения параметризации [30] в глобальную модель E3SMv1 (Energy Exascale Earth System Model version 1), характеризующейся аналогичной CAM5 систематической ошибкой описания осадков. В [22] коррекция формул для расчета потоков на поверхности океана с учетом изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба позволила существенно уменьшить ошибку воспроизведения осредненного по сезонам глобального поля осадков, и особенно во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК). Уточненный подход и его влияние на точность воспроизведения осредненных характеристик атмосферы в рамках моделей E3SMv1 и E3SMv2 рассматривается в [19, 27].

В [13] рассматривается еще один способ параметризованного описания изменчивости скорости ветра на подсеточном масштабе для глобальной модели атмосферы. Ключевая идея этого подхода – коррекция (умножение) коэффициентов обмена на поверхности на величину, зависящую от напряжения трения ветра, плотности воздуха ρ и величины осадков P . Множитель для модели атмосферы ALADIN в [13] предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$c = \sqrt{1 + \left(\left(\frac{P}{P + P_0} \right)^\gamma \tilde{U} \right)^2 \frac{\rho}{F_u}}, \quad (4)$$

где величина $\tilde{U}$ представляет собой характерную скорость трения, обусловленную выпадающими осадками; P_0 – характерная сила осадков (мм/день), F_u – напряжение трения ветра. Параметры γ , $\tilde{U}$ и P_0 в (4) являются настраиваемыми величинами.

Модификация, предложенная в [15], обобщает данный подход на случай модели атмосферы, в которой применяется метод описания турбулентных потоков в пограничном слое атмосферы, основанном на методе третьих моментов. Множитель c здесь предлагается рассчитывать по уточненной формуле вида

$$c = \sqrt{1 + \left(\left(\frac{P}{P + P_0} \right)^\gamma \tilde{U} \right)^2 \frac{K_m \sqrt{(\partial \bar{u} / \partial z)^2 + (\partial \bar{v} / \partial z)^2}}{\rho}}, \quad (5)$$

где K_m – коэффициент турбулентного обмена для импульса. В [15] на $\sqrt{c}$ предлагается умножать предельные длины перемешивания для импульса и температуры, что неявно соответствует умножению коэффициентов обмена для импульса и температуры, а также коэффициент обмена в случае нейтральной стратификации на величину, равную c . Модификация [15] применяется во всем столбе воздуха, за исключением поверхности. Значение коэффициента c на поверхности рассчитывается по формуле (5), где дробь заменяется произведением коэффициентов турбулентного обмена K_m и обмена на поверхности при нейтральной стратификации на величину горизонтальной скорости ветра.

2. Уточненная версия ПЛАВ

Одной из наиболее заметных ошибок воспроизведения осредненных характеристик атмосферной циркуляции моделью ПЛАВ в версии для долгосрочного прогноза аномалий погоды является систематическое завышение количества осадков и, соответственно, среднегодового интегрального потока скрытого тепла на поверхности. Существенная часть осадков выпадает над водной поверхностью во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК). Атмосферная циркуляция здесь характеризуется переменной погодой: ветер может быстро меняться с относительно слабого до шквального с хорошо выраженным восточным или западным направлением. Это означает необходимость использования обоих параметризаций, описывающихся формулами (2) и (3).

ВЗК – регион интенсивного формирования тропических циклонов, где существенная часть выпадающих осадков – конвективного характера.

Параметризация глубокой конвекции в ПЛАВ основана на работе [12] с усовершенствованиями [17]. Источником неустойчивости здесь являются крупномасштабная конвергенция водяного пара и силы плавучести. Таким образом, возникновение явления глубокой конвекции в модели во многом определяется интенсивностью турбулентного перемешивания воздуха в пограничном слое атмосферы, которая в свою очередь связана с потоками на поверхности. Процессы глубокой конвекции часто сопровождаются осадками, которые усиливают перемешивание воздуха по вертикали и у поверхности. В условиях предписанной эволюции температуры поверхности океана параметризация пограничного слоя атмосферы может извлекать из воды тепло и влагу в неограниченных количествах. Таким образом, от выбора значений коэффициентов в уравнениях (2) и (5) зависит характер вертикального перемешивания воздуха в ВЗК. В модели ПЛАВ применяется подход [13] в модификации [15]. Значения γ , $\tilde{U}$ и P_0 , предложенные в этих работах, следующие: 0.125 м/с, 0.8 и 0.000115 кг/м²с соответственно. Отметим, что значение $P_0 = 0.000115$ отвечает осадкам величиной около 10 мм/день. Параметризация применяется в каждой вертикальной колонке модели на каждом уровне.

На рис. 1а иллюстрируется зависимость величины усиления c , рассчитанного по формуле (5), в зависимости от величины осадков P . Цвет кривых на рис. 1а соответствует разным скоростям ветра: от минимально допустимого 0.16 м/с (черный цвет) до 20 м/с (синий цвет). Пунктирные кривые вычислены с использованием значений параметров $\tilde{U}$, γ и P_0 : 0.2 м/с, 0.8 и 0.000115 кг/м²с соответственно. Данные значения используются в версии ПЛАВ, представленной к оперативным испытаниям в 2022 году в качестве метода долгосрочного прогноза аномалий погоды (далее, сокращенно, основная версия ПЛАВ).

На рис. 1а усиление c коэффициентов перемешивания в основной версии ПЛАВ быстро растет вблизи нуля, достигая насыщения при осадках P около 0.0005 кг/м²с, что соответствует 22 мм/день, или сильному дождю по классификации осадков из Наставления [4]. Таким образом, представленные выше значения коэффициентов в формуле (5) являются обоснованными для средних широт. В ВЗК максимальная величина осадков в западной части Тихого океана вблизи Новой Гвинеи в среднем за год достигает значения 13 мм/день по данным международного проекта по наблюдениям за осадками TRMM [31]. Суточные осадки здесь часто соответствуют очень сильным ливням. Поэтому в рамках глобальной модели атмосферы с разрешением вблизи экватора около 100 км значения коэффициентов γ , $\tilde{U}$ и P_0 были выбраны таким образом, чтобы уменьшить интенсификацию турбулентного перемешивания в целом и в случае небольшого дождя особенно. Вторым важным моментом является уменьшение коэффициента c при экстремальных осадках свыше 216 мм/день.

На рис. 1а сплошные кривые рассчитаны с уточненными значениями коэффициентов параметризации, описывающей изменчивость скорости ветра на подсеточном масштабе. Значения коэффициентов в (5) следующие: $\tilde{U}=0.14$ м/с, $\gamma=0.8$ и $P_0=0.0005$ кг/м²с. Отметим, что величина коэффициента турбулентного обмена для импульса K_m в обоих экспериментах задавалось равной 0.0011, что приблизительно соответствует среднему значению этой величины на поверхности океана в модели ПЛАВ.

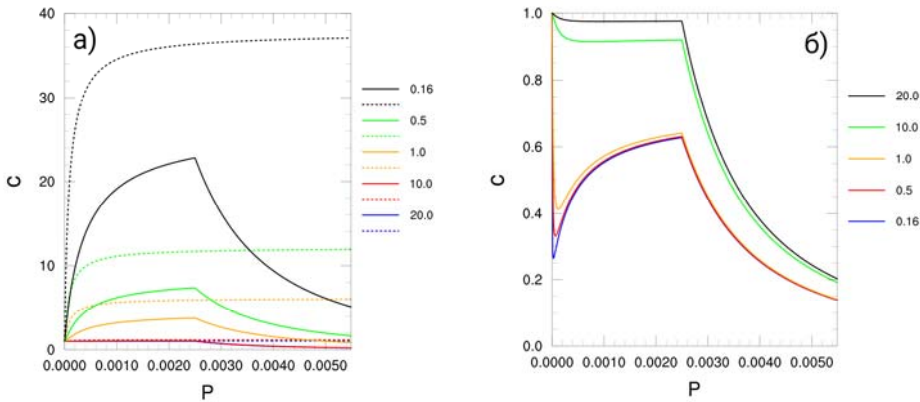


Рис. 1. Зависимость величины усиления c коэффициентов турбулентного перемешивания воздуха в зависимости от силы осадков P для разных скоростей ветра U в основной (пунктирная кривая) и уточненной (сплошная кривая) версиях ПЛАВ (а). Отношение коэффициента усиления в уточненной версии ПЛАВ к используемому значению в основной версии ПЛАВ для различных скоростях ветра (б).

Fig. 1. Dependence of the moist gustiness correction coefficient c on the precipitation flux P for different wind speeds in the reference (dashed curve) and proposed (solid curve) versions of SLAV model (a). Ratio of the gustiness correction coefficient in the proposed version of SLAV to its value used in the reference version of SLAV model for the different wind speeds (b).

На рис. 1а можно видеть, что уточнение параметров в формуле (5) имеет наибольший отклик в значения c в случае малых ветров (от нуля до нескольких метров в секунду) и малых осадков. С увеличением скорости ветра свыше 10 м/с на нижнем модельном уровне изменение величины c не превышает 0.9. Отношение значений c , рассчитанных по формуле (5) со значениями параметров, используемыми в основной версии ПЛАВ и с уточненными значениями, иллюстрируется на рис. 1б.

Изменение коэффициентов турбулентного перемешивания на поверхности оказало существенное влияние на географию и интенсивность процессов глубокой конвекции в тропическом регионе и ВЗК в частности. Это в свою очередь привело к появлению крупномасштабного отклика

в атмосферной циркуляции и статистически значимому снижению точности долгосрочного прогноза аномалий погоды на основе модифицированной версии ПЛАВ. Поэтому в модель было внесено несколько дополнительных уточнений. В первую очередь была перенастроена параметризация облачности с целью установления баланса интегральных средних потоков тепла на поверхности за счет, среди прочего, увеличения общего балла облачности. Также были увеличены параметры, определяющие скорость автоконверсии для осадков в жидкой (капли) и твердой (снег, град) фазах.

Версию модели ПЛАВ со всеми перечисленными изменениями далее мы будем называть уточненной. В следующем разделе исследуются многолетние осредненные характеристики атмосферной циркуляции уточненной версии ПЛАВ по сравнению с ее основной версией и реанализом ERA5 [23].

3. Осредненные характеристики уточненной версии ПЛАВ

Осредненной атмосферной циркуляцией мы будем называть характеристики модельной атмосферы, осредненные за некоторый продолжительный период (несколько месяцев, один год и более, например).

На рис. 2 иллюстрируется отклонение осредненного с 30 октября 1995 г. по 31 октября 2000 г. поля осадков (мм/день) в модели ПЛАВ от реанализа ERA5, осредненного за тот же период. Отклонение, представленное на рис. 2а, соответствует основной версии ПЛАВ, а на рис. 2б – ее уточненной версии. Можно видеть, что уточненная версия ПЛАВ характеризуется значительно меньшей амплитудой ошибки поля осадков в ВЗК. Среднеквадратическая ошибка (интеграл представленных на рис. 2 полей) составляет для рис. 2а величину, равную 1.52, а для рис. 2б – 1.40. Таким образом, ошибка уменьшилась на 8 %. В целом по глобусу осредненные за пять лет осадки уменьшились незначительно: с 3.5 до 3.45 мм/день (1.4 %).

Для оценки влияния внесенных в ПЛАВ изменений на осредненные характеристики атмосферной циркуляции применялась следующая технология. Модель ПЛАВ интегрируется на срок до пяти лет. Результаты моделирования по отдельным полям осредняются по всем 60 месяцам, затем рассчитывается их среднеквадратическое интегральное отклонение от данных реанализа ERA5, полученных по аналогичной технологии.

В колонках 3–5 табл. 1 приводятся рассчитанные по такой методологии ошибки стандартных полей, вычисленных по основной версии модели ПЛАВ и ее уточненной версии. Представленные ошибки позволяют сделать вывод об изменении т. н. среднего – осредненных за пять лет характеристик атмосферной циркуляции. Можно видеть, что внесенные в ПЛАВ уточнения параметризаций процессов подсеточного масштаба оказали наибольшее влияние на точность воспроизведения атмосферной циркуляции в верхней тропосфере. Уменьшение ошибки здесь превышает

20 % для поля геопотенциала и зонального компонента скорости, а для температуры на высотах, соответствующих 500 гПа и 250 гПа, изменение ошибки составляют величину около 25 % и 45 % соответственно. Ошибки, характеризующие качество воспроизведения нижней тропосферы, либо не изменились, либо немного увеличились. Здесь в первую очередь следует выделить существенное ухудшение точности описания давления на уровне моря и поля геопотенциала на высоте 850 гПа. Изменение ошибки воспроизведения меридионального компонента скорости разнонаправлено и находится в пределах 5 % для всех высот.

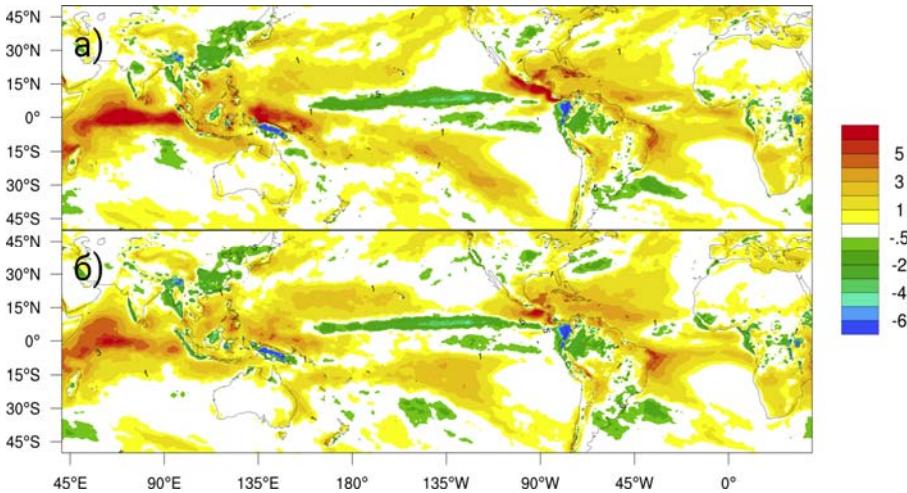


Рис. 2. Отклонение от реанализа ERA5, осредненного с 30.10.1995 по 31.10.2000 поля осадков, рассчитанного по основной версии модели ПЛАВ (а) и ее уточненной версии (б). Единицы измерения – мм/день.

Fig. 2. Precipitation bias (mm/day) averaged from 30.10.1995 to 31.10.2000 in the reference (a) and proposed (b) versions of SLAV model.

Для оценки влияния внесенных в ПЛАВ уточнений с учетом внутригодовой изменчивости атмосферной циркуляции для каждого из 60 месяцев были рассчитаны среднеквадратические интегральные ошибки по отношению к реанализу ERA5. Поделенная на 60 суммарная помесечная ошибка для стандартных полей представлена в колонках 6–8 табл. 1. В последней колонке табл. 1 приведено относительное изменение ошибки в уточненной версии ПЛАВ по сравнению с ее основной версией. Можно видеть, что характер изменения осредненной по месяцам среднеквадратической интегральной ошибки в целом близок тому, как изменилась среднеквадратическая интегральная ошибка осредненного поля при переходе с основной на уточненную версию ПЛАВ. Такой результат означает, что настройка ПЛАВ позволила достичь заметных улучшений в воспроизведении климата верхней тропосферы, не ухудшив при этом описание ее внутригодовой изменчивости.

Таблица 1. Среднеквадратическая интегральная ошибка воспроизведения осредненной атмосферной циркуляции основной и уточненной версиями ПЛАВ

Table 1. RMSE of the averaged atmospheric circulation in the reference and proposed versions of SLAV model with respect to ERA5

Величина	Высота	Среднеквадратическая интегральная ошибка осредненного поля			Осредненная по месяцам среднеквадратическая интегральная ошибка		
		Основная версия ПЛАВ	Уточненная версия ПЛАВ	Изменение ошибки, %	Основная версия ПЛАВ	Уточненная версия ПЛАВ	Изменение ошибки, %
Осадки	Поверхность	1.52	1.40	-7.9	2.613	2.366	-9.5
Давление на уровне моря	Поверхность	1.94	2.26	16.5	3.514	3.615	2.9
	850 гПа	125	146	16.8	259.2	264.5	2
	500 гПа	217	205	-5.5	503.3	487.7	-3.1
Зональный компонент скорости	250 гПа	546	396	-27.5	948.8	843.9	-11.1
	10 м	0.93	0.91	-2.2	1.586	1.517	-4.4
	850 гПа	1.47	1.50	2	2.539	2.450	-3.5
	500 гПа	1.73	1.36	-21.4	3.522	3.192	-9.7
	250 гПа	3.22	2.39	-25.8	6.194	5.513	-11
Меридиональный компонент скорости	10 м	0.93	0.98	5.4	1.354	1.386	2.4
	850 гПа	0.89	0.92	3.4	1.490	1.499	0.6
	500 гПа	0.65	0.65	0	1.674	1.694	1.2
	250 гПа	1.24	1.19	-4	2.859	2.822	-1.3
	850 гПа	1.11	1.12	0.9	2.742	2.728	-0.5
Температура	500 гПа	1.81	1.36	-24.9	2.728	2.392	-12.3
	250 гПа	1.52	0.83	-45.4	2.288	1.846	-19.3
	-	1.06	1.05	-0.9	1.381	1.335	-3.3
Балл облачности	-	1.06	1.05	-0.9	1.381	1.335	-3.3
Поток солнечного излучения	Поверхность	16.1	13.6	-15.5	41.99	40.96	-2.5
Поток теплового излучения	Поверхность	12.4	11.4	-8.1	15.86	15.11	-4.7
Поток скрытого тепла	Поверхность	21.4	23.9	11.7	37.47	35.88	-4.2
Поток явного тепла	Поверхность	13.0	13.8	6.2	21.00	21.70	3.3

Отметим, что сравнительно небольшое уменьшение среднеквадратической интегральной ошибки зонального компонента скорости на высоте 10 м (менее 5 %) наиболее заметно в ВЗК. Максимум амплитудной ошибки воспроизведения пассатов здесь уменьшился с 2.6 до 2.1 м/с. При этом уменьшение амплитудной ошибки в среднем в ВЗК составило величину около 1 м/с.

4. Результаты ретроспективных прогнозов

Для оценки влияния внесенных в ПЛАВ изменений основная и уточненная версии модели были проверены на серии ретроспективных прогнозов за период с 1991 по 2015 г. отдельно для летнего периода со стартовой датой, соответствующей 30 апреля, и для зимнего сезона со стартовой датой, соответствующей 30 октября. Заблаговременность каждого прогноза составила четыре месяца. Каждый ансамбль включал четырех участников. Стохастическое возмущение коэффициентов и констант в блоке параметризаций ПЛАВ [7] в экспериментах не использовалось.

В табл. 2 приводится осредненная за четыре месяца среднеквадратическая интегральная (по отдельным регионам) ошибка долгосрочного прогноза аномалий погоды на зимний (3 и 4 колонки) и летний (5 и 6 колонки) периоды для двух версий модели ПЛАВ: основной и уточненной. Можно видеть, применение уточненной версии ПЛАВ сопровождается уменьшением ошибки прогноза поля осадков и геопотенциала на высотах, соответствующих 500 и 850 гПа. Наиболее значимое изменение характерно для поля геопотенциала на высоте 200 гПа в тропическом регионе. Уменьшение ошибки здесь составляет величину свыше 40 % для зимнего и летнего прогноза. Среднеквадратическая ошибка воспроизведения геопотенциала на высоте, соответствующей 500 гПа, несколько меньше – свыше 20 % для обоих сезонов.

Для проверки статистической значимости полученных результатов использовались два теста: двухвыборочный тест Стьюдента [14] и тест Уилкоксона [28] – традиционный непараметрический тест для сравнения двух зависимых выборок. Оба показали статистическую значимость уменьшения ошибки прогноза поля геопотенциала на высотах, соответствующих 200 гПа и 500 гПа, в тропическом регионе. В обоих тестах использовался уровень значимости, равный 0.05. Отметим, что ошибки прогноза указанных полей подчиняется нормальному закону распределения. Это подтверждено тестом Харке – Бера [21], сверяющим третий и четвертый моменты с моментами нормального распределения и критерием Лиллиефорса [26].

Статистически значимое уменьшение ошибки прогноза на двухвыборочном тесте Стьюдента и тесте Уилкоксона получено для поля геопотенциала на высоте 500 гПа на глобусе, а также для поля осадков в Южном полушарии.

Таблица 2. Среднеквадратическая интегральная ошибка ретроспективных прогнозов за период с 1991 по 2015 г. по основной и уточненной версиям ПЛАВ для разных регионов

Table 2. RMSE of retrospective long-range forecasts over the period of 1991-2015 in the reference and proposed versions of SLAV model for different regions

Величина	Регион	Среднеквадратическая интегральная ошибка			
		Зимний период		Летний период	
		Основная версия ПЛАВ	Уточненная версия ПЛАВ	Основная версия ПЛАВ	Уточненная версия ПЛАВ
Температура на высоте 2 м	Глобус	2.01	2.04	2.02	2.18
	Тропики	1.22	1.19	1.07	1.06
	Южное полушарие	1.36	1.34	2.76	3.06
	Северное полушарие	2.98	3.04	1.84	1.88
Давление на уровне моря	Глобус	3.06	2.79	3.67	3.87
	Тропики	1.09	1.13	1.53	1.48
	Южное полушарие	2.89	2.57	4.79	5.09
	Северное полушарие	4.17	3.86	3.81	4.01
Осадки	Глобус	2.14	1.96	2.36	2.05
	Тропики	3.12	2.81	3.42	2.83
	Южное полушарие	1.32	1.3	1.29	1.23
	Северное полушарие	1.45	1.35	1.79	1.73
Геопотенциал на высоте 500 гПа	Глобус	39.2	33.6	39.	38.9
	Тропики	27.9	20.1	30.3	23.
	Южное полушарие	37.8	31.2	46.6	52.3
	Северное полушарие	46.8	43.9	36.7	33.9
Геопотенциал на высоте 200 гПа	Глобус	77.3	59.3	75.6	58.8
	Тропики	90.2	50.9	93.2	55.1
	Южное полушарие	66.9	58.1	62.8	68.
	Северное полушарие	71.3	66.8	65.6	50.
Температура на высоте 850 гПа	Глобус	1.62	1.52	1.66	1.73
	Тропики	1.2	1.18	1.05	1.05
	Южное полушарие	1.53	1.36	2.02	2.17
	Северное полушарие	2.	1.92	1.75	1.76

Несмотря за заметное уменьшение среднеквадратической ошибки прогноза осадков в тропическом регионе по сравнению с Южным полушарием, данный результат нельзя считать статистически значимым: хотя оба теста на статистическую значимость были пройдены, распределение ошибки в уточненной версии модели ПЛАВ не подчиняется нормальному закону распределения.

Наряду с оценкой среднеквадратической интегральной ошибки прогноза изучалось изменение коэффициента корреляции аномалий стандартных полей. Результаты расчетов этой величины для прогнозов на зимний и летний сезоны представлены в табл. 3. Результаты анализа изменений коэффициента корреляции аномалий для основной и уточненной версий ПЛАВ повторяют выводы, сделанные на основе исследований среднеквадратической ошибки прогноза: существенное и статистически значимое увеличение корреляции аномалий прогноза геопотенциала на высотах 200 гПа и 500 гПа в тропическом регионе на величину свыше 10 % и осадков в Южном полушарии. Схожие результаты можно ожидать для поля температуры на таких же высотах (данные не приводятся).

На рис. 3 приводится средне-зональная осредненная ошибка прогноза температуры на зимние (а, в) и летние (б, г) месяцы по основной (а, б) и уточненной (в, г) версиям модели ПЛАВ по сравнению с реанализом ERA5. Можно видеть, что уменьшение осредненной за три месяца ошибки прогноза на зимний и летний сезоны в тропосфере составляет до двух градусов. Наибольшее уменьшение ошибки соответствует предельным высотам процессов глубокой конвекции в ВЗК. Также следует отметить уменьшение ошибки более чем на один градус в районе Северного полюса на высотах, соответствующих 15 гПа, в зимний период. На высотах свыше 10 гПа изменение ошибки прогноза температуры на оба сезона несущественно.

На рис. 4 иллюстрируется средне-зональная осредненная ошибка прогноза на зимние (а, в) и летние (б, г) месяцы зонального компонента скорости по основной (а, б) и уточненной (в, г) версиям модели ПЛАВ. Ошибка прогноза рассчитана по отношению к реанализу ERA5. На рис. 4 можно отметить уменьшение амплитудной ошибки воспроизведения струйного течения в Северном полушарии на величину около 1 м/с в зимний период и свыше 2 м/с в летние месяцы. В ВЗК уменьшение ошибки прогноза более значимо и превышает 3 м/с для обоих сезонов. Повышение точности воспроизведения пассатов в ПЛАВ позволяет надеяться на воспроизведение прямых и обратных связей между атмосферой и океаном в ВЗК в разрабатываемой в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Гидрометцентре России и ИВМ РАН совместной модели ПЛАВ-NEMO-SI3, что позволит описывать на ее основе такие важные природные явления, как колебание Маддена – Джулиана и Эль-Ниньо – источники долгосрочной предсказуемости.

Таблица 3. Корреляция аномалий ретроспективных прогнозов за период с 1991 по 2015 г. по основной и уточненной версиям ПЛАВ для разных регионов

Table 3. Anomaly correlation of retrospective long-range forecasts over the period of 1991-2015 in the reference and proposed versions of SLAV model for different regions

Величина	Регион	Корреляция аномалий			
		Зимний период		Летний период	
		Основная версия ПЛАВ	Уточненная версия ПЛАВ	Основная версия ПЛАВ	Уточненная версия ПЛАВ
Температура на высоте 2 м	Глобус	0.058	0.207	0.199	0.179
	Тропики	0.373	0.422	0.315	0.339
	Южное полушарие	0.154	0.224	0.186	0.127
	Северное полушарие	0.01	0.176	0.16	0.176
Давление на уровне моря	Глобус	0.061	0.158	0.129	0.057
	Тропики	0.48	0.578	0.43	0.403
	Южное полушарие	0.115	0.162	0.11	0.052
	Северное полушарие	0.006	0.11	0.094	-0.068
Осадки	Глобус	0.243	0.290	0.144	0.155
	Тропики	0.319	0.377	0.178	0.209
	Южное полушарие	0.061	0.115	0.062	0.043
	Северное полушарие	0.065	0.074	0.057	0.031
Геопотенциал на высоте 500 гПа	Глобус	0.048	0.141	0.128	0.063
	Тропики	0.132	0.19	0.154	0.179
	Южное полушарие	0.077	0.157	0.14	0.092
	Северное полушарие	0.036	0.096	0.054	-0.061
Геопотенциал на высоте 200 гПа	Глобус	0.099	0.182	0.157	0.120
	Тропики	0.430	0.467	0.374	0.349
	Южное полушарие	0.152	0.209	0.14	0.121
	Северное полушарие	0.040	0.106	0.082	-0.002
Температура на высоте 850 гПа	Глобус	0.053	0.165	0.129	0.116
	Тропики	0.184	0.224	0.238	0.235
	Южное полушарие	0.036	0.145	0.143	0.124
	Северное полушарие	0.044	0.149	0.049	0.019

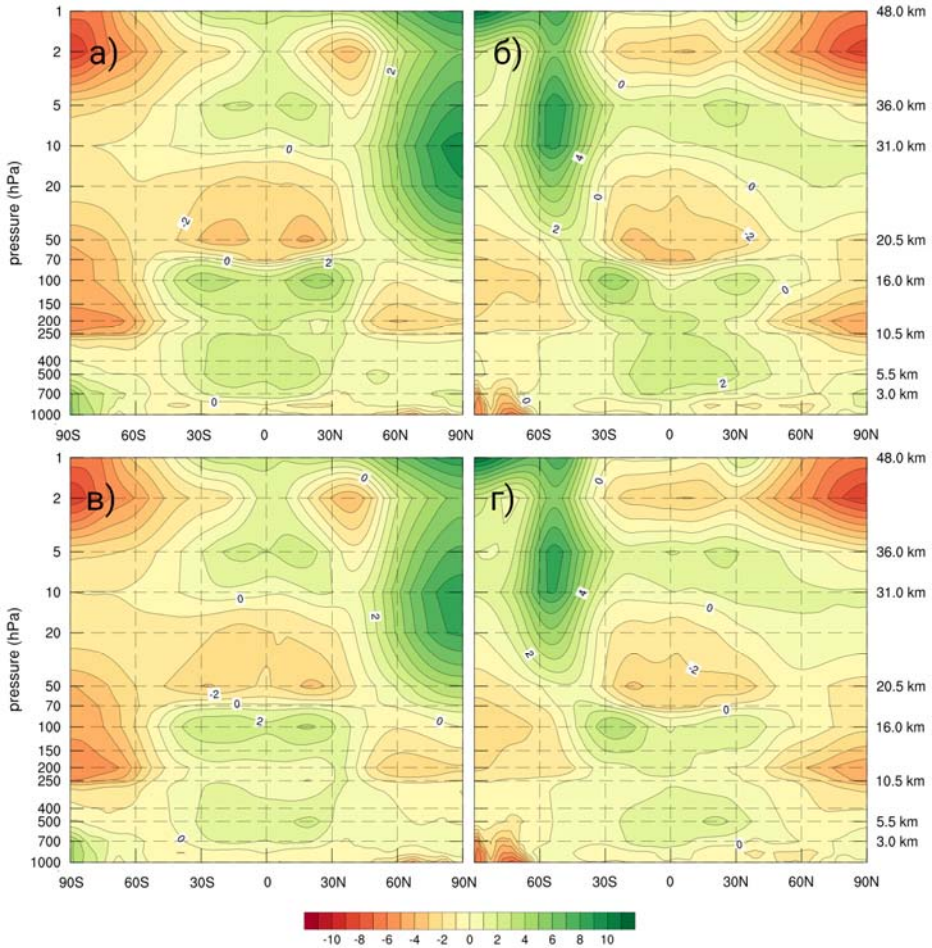


Рис. 3. Средне-зональная ошибка температуры по основной (а, б) и уточненной (в, г) версиям модели ПЛАВ по сравнению с реанализом ERA5, осредненная за три зимних (а, в) и три летних (б, г) месяца.

Рис. 3. Zonally averaged temperature bias of the reference (а, б) and proposed (в, г) versions of SLAV model for DJF (а, в) and JJA (б, г).

Заключение

Совершенствование прогностической модели не всегда требует внедрения новых математических подходов к описанию физических явлений в атмосфере Земли. В рамках данной работы показана возможность повышения точности прогноза аномалий погоды посредством настройки параметров, используемых в упрощенных уравнениях для описания процессов подсеточного масштаба.

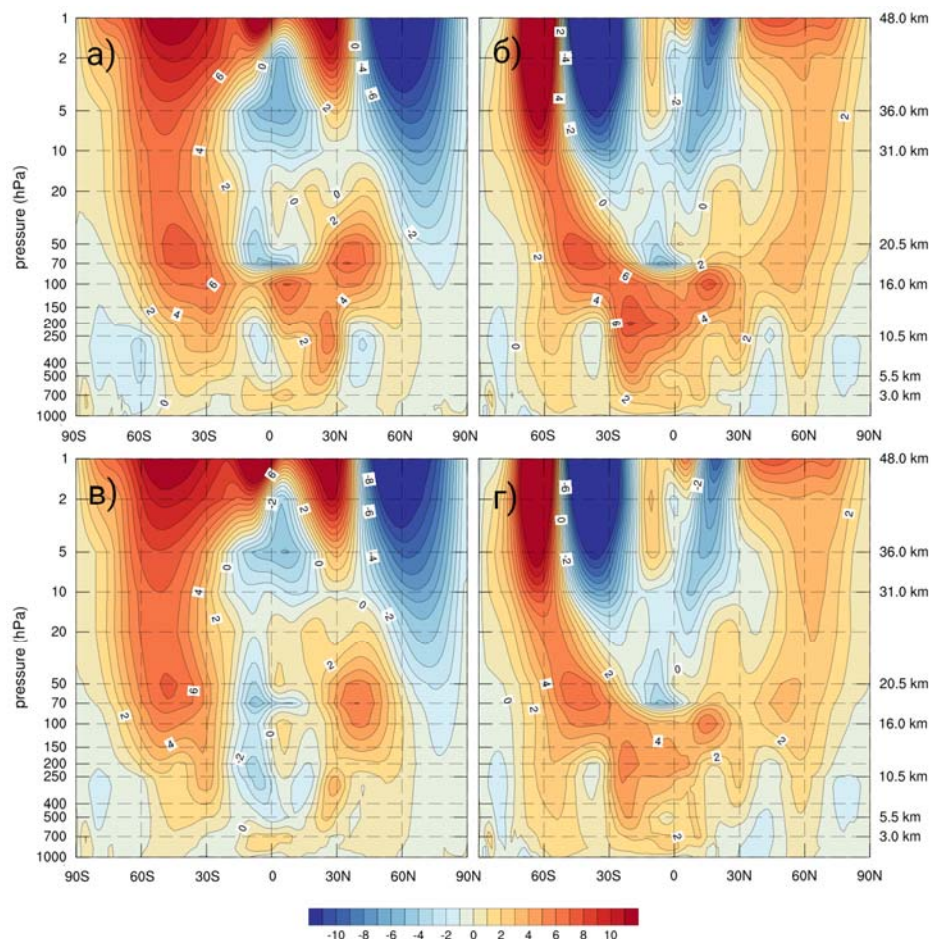


Рис. 4. Средне-зональная ошибка зонального компонента скорости ветра по основной (а, б) и уточненной (в, г) версиям модели ПЛАВ по сравнению с реанализом ERA5, осредненная за три зимних (а, в) и три летних (б, г) месяца.

Fig. 4. Zonally averaged U-wind bias of the reference (а, б) and proposed (в, г) versions of SLAV model for DJF (а, в) and JJA (б, г).

Завышенное усиление коэффициентов турбулентного перемешивания вследствие осадков приводило в ПЛАВ к интенсификации явлений глубокой конвекции во внутритропической зоне конвергенции и систематическому завышению температуры на высотах, соответствующих 500 гПа и 250 гПа.

Уменьшение роли осадков в турбулентном перемешивании воздуха в пограничном слое атмосферы позволило существенно и статистически значимо уменьшить ошибки воспроизведения поля зонального компонента скорости и геопотенциала в верхней тропосфере.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-11-00053.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н. и др. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 12-36.
2. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А., Байдин А.В. О предсказуемости крупных аномалий приземной температуры воздуха по данным исторических сезонных прогнозов, рассчитанных с использованием МОЦАО ГГО (Т63L25/ИВМ РАН) // Труды ГГО. 2020. № 598. С. 137-154.
3. Обухов А.М., Монин А.С. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды Геофизического инст. АН СССР. 1954. № 24 (151). С. 163-187.
4. РД 52.27.724–2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. 66 с.
5. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М. и др. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛИАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25-35.
6. Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛИАВ: разработка и первые результаты // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 22-35.
7. Alipova K.A., Goyman G.S., Tolstykh M.A., Mzyak V.G., Rogutov V.S. Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model // Russ. J. Numer. Anal. Math. Mod. 2022. Vol. 37 (63). P. 331-347.
8. Bařtak řuran I., Geleyn J.-F., Vaņa F. A Compact Model for the Stability Dependency of TKE Production – Destruction – Conversion Terms Valid for the Whole Range of Richardson Numbers // J. Atmos. Sci. 2014. Vol. 71. P. 3004-3026.
9. Beljaars A.C.M. The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1995. Vol. 121. P. 255-270.
10. Blein S., Romain R., Voldoire A., Faure G. Meso-scale contribution to air–sea turbulent fluxes at GCM scale // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146. P. 2466-2495. <https://doi.org/10.1002/qj.3804>
11. Blein S., Roehrig R., Voldoire A. Parametrizing the mesoscale enhancement of oceanic surface turbulent fluxes: A physical-statistical approach // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2022. Vol. 148 (745). P. 1683-1708. <https://doi.org/10.1002/qj.4273>.
12. Bougeault P. A Simple Parameterization of the Large-Scale Effects of Cumulus Convection // Mon. Wea. Rev. 1985. Vol. 113 (12). P. 2108-2121. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2)
13. Brořkova R., Derkova M., Belluř M., Farda A. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings // Ocean Sci. 2006. Vol. 2. P. 113-121. <https://doi.org/10.5194/os-2-113-2006>
14. Dudewicz E.J., Ma Y., Mai E.S., Su H. Exact solutions to the Behrens–Fisher Problem: Asymptotically optimal and finite sample efficient choice among // J. Stat. Planning Infer. 2007. Vol. 5, no. 137. P. 1584-1605.
15. řuran I.V., Geleyn J.-F., Vaņa F. Report from stay in Prague – eTKE scheme and preparation for TOMs. 2010. https://www.rclace.eu/media/files/Physics/2009/bastak_toucans_prague2009.pdf
16. Esbensen S.K., McPhaden M.J. Enhancement of Tropical Ocean Evaporation and Sensible Heat Flux by Atmospheric Mesoscale Systems // J. Clim. 1996. Vol. 9(10). P. 2307-2325.
17. Gerard L., Geleyn J.-F. Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 131. P. 2293-2312. <https://doi.org/10.1256/qj.04.72>

18. Godfrey J.S., Beljaars A.C.M. On the turbulent fluxes of buoyancy, heat and moisture at the air-sea interface at low wind speeds // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96. P. 22043-22048.
19. Golaz J.-C., Van Roekel L.P., Zheng et al. The DOE E3SM Model version 2: Overview of the physical model and initial model evaluation // *J. Adv. Model. Earth Sys.* 2022. Vol. 14. e2022MS003156. <https://doi.org/10.1029/2022MS003156>
20. Jabouille P., Redelsperger J.L., Lafore J.P. Modification of surface fluxes by atmospheric convection in the TOGA COARE region // *Mon. Wea. Rev.* 1996. Vol. 124, no. 5. P. 816-837.
21. Jarque C.M., Bera A.K. A test for normality of observations and regression residuals // *Inter. Stat. Rev.* 1987. Vol. 55 (2). P. 163-172.
22. Harrop B.E., Ma P.-L., Rasch P.J., Neale R.B., Hannay C. The role of convective gustiness in reducing seasonal precipitation biases in the Tropical West Pacific // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2018. Vol. 10. P. 961-970.
23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) 2018. 10.24381/cds.adbb2d47 (Accessed on 07-MAR-2023).
24. Hirahara S., Kuba Y., Yoshida T., Komori T., Chiba J. et al. Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3) // *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II.* 2023. Vol. 101 (2). P. 149-169. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-009>
25. Knut von Salzen, Scinocca J.F., Norman A. McF. et al. The Canadian Fourth Generation Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Part I: Representation of Physical Processes // *Atmosphere-Ocean*. 2013. Vol. 51 (1). P. 104-125. DOI: 10.1080/07055900.2012.755610
26. Lilliefors H.W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *J. Amer. Stat. Assoc.* 1967. Vol. 62. P. 399-402.
27. Ma Po-Lun, Harrop B.E., Larson V.E., Neale R.B., Gettelman A. Better calibration of cloud parameterizations and subgrid effects increases the fidelity of the E3SM Atmosphere Model version 1 // *Geosci. Model Dev.* 2022. Vol. 15. P. 2881-2916. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2881-2022>
28. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // *Annals Math. Stat.* 1947. Vol. 18. P. 50-60.
29. Miller M.J., Beljaars A.C.M., Palmer T.N. The sensitivity of the ECMWF model to the parametrization of evaporation from the tropical oceans // *J. Clim.* 1992. Vol. 5. P. 418-434.
30. Redelsperger J.-L., Guichard F., Mondon S. A parametrization of mesoscale enhancement of surface fluxes for large-scale models // *J. Clim.* 2000. Vol. 13. P. 402-421.
31. TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/trmm-tropical-rainfall-measuring-mission>
32. Walters D.N., Best M.J., Bushell A.C. et al. The Met Office Unified Model Global Atmosphere 3.0/3.1 and JULES Global Land 3.0/3.1 configurations // *Geoscientific Model Development*. 2011. Vol. 4 (4). P. 1991-9603.

References

1. Vilfand R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tischenko V.A., Tolstych M.A., Khan V.M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 12-36 [in Russ.].
2. Mirvis V. M., Meleshko V. P., Lvova T. Yu., Matyugin V. A., Baidin A. V. On the predictability of large surface air temperature anomalies according to historical seasonal forecasts calculated using the CGCM GGO (T63L25 / INM RAS). *Trudy GGO* [*Proceedings of MGO*], 2020, vol. 598, pp. 137-154 [in Russ.].
3. Obuhov A.M., Monin A.S. Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery. *Trudy Geofizicheskogo inst. AN SSSR*, 1954, vol. 151, no. 24, pp. 163-187 [in Russ.].

4. RD 52.27.724–2019. Nastavleniya po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. 66 s. [in Russ.].

5. Tolstykh M.A., Geleyn J.F., Volodin E.M., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T. V., Kostykin S.V., Mityak V.G., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Shlyayeva A.V., Ezau I.N., Yurova A.Yu. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, pp. 374–382. DOI: 10.3103/S1068373915060035.

6. Fadeev R.Y., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate Version of the SL-AV Global Atmospheric Model: Development and Preliminary Results. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, pp. 13–22. DOI: 10.3103/S1068373919010023.

7. Alipova K.A., Goyman G.S., Tolstykh M.A., Mityak V.G., Rogutov V.S. Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Mod.*, 2022, vol. 37 (63), pp. 331–347.

8. Bašták Ľurán I., Geleyn J.-F., Váňa F. A Compact Model for the Stability Dependency of TKE Production – Destruction – Conversion Terms Valid for the Whole Range of Richardson Numbers. *J. Atmos. Sci.*, 2014, vol. 71, pp. 3004–3026.

9. Beljaars A.C.M. The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1995, vol. 121, pp. 255–270.

10. Blein S., Romain R., Voldoire A., Faure G. Meso-scale contribution to air–sea turbulent fluxes at GCM scale. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 2466–2495. DOI: 10.1002/qj.3804.

11. Blein S., Roehrig R., Voldoire A. Parametrizing the mesoscale enhancement of oceanic surface turbulent fluxes: A physical-statistical approach. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2022, vol. 148 (745), pp. 1683–1708. DOI: 10.1002/qj.4273.

12. Bougeault P. A Simple Parameterization of the Large-Scale Effects of Cumulus Convection. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, vol. 113, no. 12, pp. 2108–2121. DOI: 10.1175/1520-0493(1985)113<2108:ASPOTL>2.0.CO;2.

13. Brožková R., Derková M., Belluš M., Farda A. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Sci.*, 2006, vol. 2, pp. 113–121. DOI: 10.5194/os-2-113-2006.

14. Dudewicz E.J., MaY., Mai E.S., Su H. Exact solutions to the Behrens–Fisher Problem: Asymptotically optimal and finite sample efficient choice among. *J. Stat. Planning Infer.*, 2007, vol. 5, no. 137, pp. 1584–1605.

15. Ľurán I.V., Geleyn J.-F., Váňa F. Report from stay in Prague – eTKE scheme and preparation for TOMs. 2010. Available at: https://www.rclace.eu/media/files/Physics/2009/bastak_toucans_prague2009.pdf.

16. Esbensen S.K., McPhaden M.J. Enhancement of Tropical Ocean Evaporation and Sensible Heat Flux by Atmospheric Mesoscale Systems. *J. Clim.*, 1996, vol. 9, no. 10, pp. 2307–2325.

17. Gerard L., Geleyn J.-F. Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, pp. 2293–2312. DOI: 10.1256/qj.04.72.

18. Godfrey J.S., Beljaars A.C.M. On the turbulent fluxes of buoyancy, heat and moisture at the air-sea interface at low wind speeds. *J. Geophys. Res.*, 1991, vol. 96, pp. 22043–22048.

19. Golaz J.-C., Van Roekel L.P., Zheng et al. The DOE E3SM Model version 2: Overview of the physical model and initial model evaluation. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, 2022, vol. 14, e2022MS003156. DOI: 10.1029/2022MS003156.

20. Jabouille P., Redelsperger J.L., Lafore J.P. Modification of surface fluxes by atmospheric convection in the TOGA COARE region. *Mon. Wea. Rev.* 1996, vol. 124, no. 5, pp. 816–837.

21. Jarque C.M., Bera A.K. A test for normality of observations and regression residuals. *Inter. Stat. Rev.*, 1987, vol. 55, no. 2, pp. 163–172.

22. Harrop B.E., Ma P.-L., Rasch P.J., Neale R.B., Hannay C. The role of convective gustiness in reducing seasonal precipitation biases in the Tropical West Pacific. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, 2018, vol. 10, pp. 961–970.

23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) 2018. 10.24381/cds.adbb2d47 (Accessed on 07-MAR-2023).
24. Hirahara S., Kuba Y., Yoshida T., Komori T., Chiba J. et al. Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System Version 3 (JMA/MRI-CPS3). *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II.*, 2023, vol. 101, no. 2, pp. 149-169. DOI: 10.2151/jmsj.2023-009.
25. Knut von Salzen, Scinocca J.F., Norman A. McF. et al. The Canadian Fourth Generation Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Part I: Representation of Physical Processes. *Atmosphere-Ocean*, 2013, vol. 51, no. 1, pp. 104-125. DOI: 10.1080/07055900.2012.755610
26. Lilliefors H.W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *J. Amer. Stat. Assoc.*, 1967, vol. 62, pp. 399-402.
27. Ma Po-Lun, Harrop B.E., Larson V.E., Neale R.B., Gettelman A. Better calibration of cloud parameterizations and subgrid effects increases the fidelity of the E3SM Atmosphere Model version 1. *Geosci. Model Dev.*, 2022, vol. 15, pp. 2881-2916. DOI: 10.5194/gmd-15-2881-2022.
28. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals Math. Stat.*, 1947, vol. 18, pp. 50-60.
29. Miller M.J., Beljaars A.C.M., Palmer T.N. The sensitivity of the ECMWF model to the parametrization of evaporation from the tropical oceans. *J. Clim.*, 1992, vol. 5, pp. 418-434.
30. Redelsperger J.-L., Guichard F., Mondon S. A parametrization of mesoscale enhancement of surface fluxes for large-scale models. *J. Clim.*, 2000, vol. 13, pp. 402-421.
31. TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/trmm-tropical-rainfall-measuring-mission>
32. Walters D.N., Best M.J., Bushell A.C. et al. The Met Office Unified Model Global Atmosphere 3.0/3.1 and JULES Global Land 3.0/3.1 configurations. *Geoscientific Model Development*. 2011, vol. 4, no. 4, pp. 1991-9603.

Поступила 10.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 10.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-55-76>

УДК 551.513.3

**Статистические оценки параметров
центров действия атмосферы
в зимнем и летнем сезонах по данным реанализа
за период 1992–2021 годов**

***В.С. Балакин¹, Ю.В. Шипко¹, О.В. Колычев¹,
И.Е. Кузнецов², В.П. Закусилов², Е.В. Шувакин²***

¹*Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил
(Минобороны России), г. Москва, Россия;*

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

Исследуются климатологические центры действия атмосферы (постоянные и сезонные) Северного и Южного полушарий для центральных месяцев зимнего и летнего сезонов. В качестве исходной информации использованы данные геопотенциальной высоты изобарического уровня 1000 гПа архива реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II за 1992–2021 гг. Программно-реализованная обработка многолетних данных файлов реанализа позволила отобразить на карте распределения повторяемости «синоптических» центров действия в узлах регулярной сетки (с шагом 2,5° по широте и долготе). Представлены статистические оценки параметров центров действия атмосферы (местоположения, интенсивности), в том числе характеристики эллипсов рассеяния. Дан анализ изменения характеристик в сравнении с базовым климатическим периодом 1961–1990 гг. (по данным реанализа NCEP/NCAR). Показана динамика характеристик центров действия в виде скользящих 10-летних средних за период 2000–2021 гг.

Ключевые слова: центр действия атмосферы, реанализ, геопотенциальная высота, эллипс рассеяния, скользящая средняя, тенденция

**Statistical estimates of the parameters
of winter and summer atmospheric centers of action
based on 1992–2021 reanalysis**

***V.S. Balakin¹, Yu.V. Shipko¹, O.V. Kolychev¹,
I.E. Kyznetsov², V.P. Zakusilov², E.V. Shuvakin²***

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

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

The subject of the present study is climatological atmospheric centers of action (permanent and seasonal) of the Northern and Southern hemispheres for the central months of the winter and summer seasons. Data on 1000 hPa geopotential height from the

NCEP/DOE AMIP-II reanalysis of atmospheric parameters for 1992–2021 are used as initial information. Software-implemented processing of long-term reanalysis data files made it possible to map of the distribution of synoptic centers of action at regular grid points (with a step of 2.5° in latitude and longitude). Statistical estimates of the parameters of atmospheric centers of action (location and intensity), including concentration ellipse characteristics, are presented. An analysis of the change in the characteristics as compared to the base climate period of 1961–1990 (according to the NCEP/NCAR reanalysis data) is given. The dynamics of the characteristics of the centers of action in the form of moving 10-year averages for 2000–2021 is demonstrated.

Keywords: atmospheric center of action, reanalysis, geopotential height, concentration ellipse, moving average, trend

Введение

Предметом исследования являются климатологические центры действия атмосферы (ЦДА) – области повышенного или пониженного давления на уровне моря на многолетних средних картах по сезонам либо за год. ЦДА являются статистическим результатом преобладания в определенном районе барических объектов атмосферы одного и того же знака.

В настоящее время многие работы в области исследования общей циркуляции атмосферы, оценки климатических изменений, долгосрочного прогнозирования проводятся с учетом характеристик ЦДА [1, 6, 9]. Раскрывается природа ЦДА, рассматриваются факторы, обуславливающие их образование [10, 13, 15]. Анализируется влияние состояния ЦДА на погодно-климатические региональные особенности различных территорий [16]; рассматриваются долгопериодные изменения повторяемости циклонической [3, 5] и антициклонической [4] активности в регионах Северного полушария, их отклик на моды атмосферной циркуляции атлантико-европейского сектора. Оценивается связь характеристик ЦДА с приповерхностной температурой Северного и Южного полушарий, в частности с ключевыми климатическими модами (атлантической мультидесятилетней осцилляцией Эль-Ниньо, Ла-Нинья) [12, 13]. Кроме того, прогнозируются климатические изменения параметров ЦДА при глобальном потеплении [11], моделируются по различным сценариям тенденции их изменений до конца столетия (с помощью ансамбля CMIP5) [22]. Таким образом, работы по тематике исследований ЦДА не теряют актуальности.

Целью данного исследования является оценка характеристик ЦДА на материале последнего тридцатилетия, что актуально для современного периода климатических изменений, имеет методическое значение для решения прикладных задач метеорологии.

В работе рассматриваются перманентные (постоянные) ЦДА Северного и Южного полушарий, а также основные сезонные ЦДА. Не учитывались климатологические барические образования, не имеющие выраженного центра: экваториальная и предантарктическая зоны пониженного давления, а также арктический антициклон.

Исходный материал и методика расчета

Исходным материалом в исследованиях ЦДА служат синоптические карты давления на уровне моря, или поля средних месячных значений давления [2, 15, 20], или «сеточные» архивы, являющиеся результатом резервного объективного анализа (реанализа) «станционных» данных [11–13, 23, 24]. В данной работе в качестве исходной информации использовались поля среднесуточных значений геопотенциальной высоты в узлах регулярной сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе на изобарическом уровне 1000 гПа за январь и июль – данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II [23] за 30-летний период (1992–2021 гг.). Выбор материала NCEP/DOE обоснован тем, что опыт сопоставления данных различных реанализов (ERA-Interim, ERA5, JRA55, NCEP [21]) показывает разумную успешность для параметров в средней тропосфере. Как показано в исследованиях [13, 21, 25], качество данных проекта NCEP/DOE AMIP-II для атмосферного давления на уровне 1000 гПа имеет удовлетворительную успешность и, следовательно, данный источник информации может быть использован для исследования ЦДА (постоянных и сезонных) обоих полушарий.

В целях сравнения соответствующих статистических оценок характеристик ЦДА с предыдущим временным периодом, использованы файлы реанализа NCEP/NCAR [24], который включает архивы данных базового климатического периода 1961–1990 годов.

Обработка файлов реанализа геопотенциальной высоты (формата hgt.*.nc), расчет статистических характеристик и графическое отображение «синоптических» центров ЦДА на карте проведены с помощью специально разработанной программы (на языке Python).

Для идентификации циклонов/антициклонов и расчета их характеристик используется упрощенный подход [5]: нахождение точки экстремума H_{oj} (максимума или минимума, в зависимости от ЦДА) в определенных (условных) границах районов для дискретного поля H_{1000} за каждый день расчетного месяца; данная точка принимается за «синоптический» ЦДА, определяется широта и долгота центра (φ_i, λ_j) . Принадлежность выявленного экстремума к тому или иному ЦДА определяется по географическому району возникновения. Если встречается два и более равных значения экстремумов, то учитывается только одна точка H_{oj} , расположенная ближе к центральной части района соответствующего ЦДА (в расчете такие случаи встречались крайне редко).

Предусматривается формирование многомерных массивов значений $H_{oj}, \varphi_i, \lambda_j$ по месяцам (январь, июль) за каждый год периода 1992–2021 гг. Проводится расчет статистических характеристик за январь, июль (для периода 1992–2021 гг. и за десятилетия: 1992–2001, 1993–2002, ..., 2012–2021 гг.):

– средних и средних квадратических отклонений: $\bar{\varphi}, \bar{\lambda}, \bar{H}_0, \sigma_{\varphi}, \sigma_{\lambda}$; величины $\sigma_{\varphi}, \sigma_{\lambda}$ переведены в километры (условно принято для градуса параллели и меридиана $1^\circ \approx 100$ км);

– геометрических характеристик эллипса рассеяния с центром $(\bar{\varphi}, \bar{\lambda})$: площади $S = \pi \sigma_x \sigma_y$; коэффициента сжатия $k = \sigma_y / \sigma_x$, где σ_x, σ_y – главные средние квадратические отклонения $\sigma_{x/y}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{\lambda}^2 + \sigma_{\varphi}^2 \pm \sqrt{(\sigma_{\lambda}^2 - \sigma_{\varphi}^2)^2 + 4r^2 \sigma_{\lambda}^2 \sigma_{\varphi}^2})$, характеризующие рассеивание вдоль осей x, y системы координат, полученной поворотом системы λ, φ на угол α , $\operatorname{tg} 2\alpha = 2r\sigma_{\varphi}\sigma_{\lambda} / (\sigma_{\lambda}^2 - \sigma_{\varphi}^2)$.

Распределения повторяемости синоптических центров в узлах регулярной сетки для января и июля (1992–2021 гг.) отображаются на карте в автоматизированном режиме.

Следует отметить, что статистические характеристики ЦДА зависят от выбранных размеров районов расположения. Для охвата более обширной территории исследования сначала рассматривались районы ЦДА с подвижными границами, т. е. программный модуль вычислений максимума/минимума дискретных полей геопотенциальной высоты был построен так, что при остановке цикла поиска на границе района (по широте или долготе) добавлялись шаги ($2,5^\circ$), пока точка H_{oij} оказывалась внутри границ района положения ЦДА. Однако подобный подход не был принят, поскольку в зону одного ЦДА попадали центры другого. Например, как показано на рис. 1, в июле кластер рассчитанных синоптических центров Гренландского антициклона над Баренцевым и Норвежским морями можно отнести к арктическому антициклону.

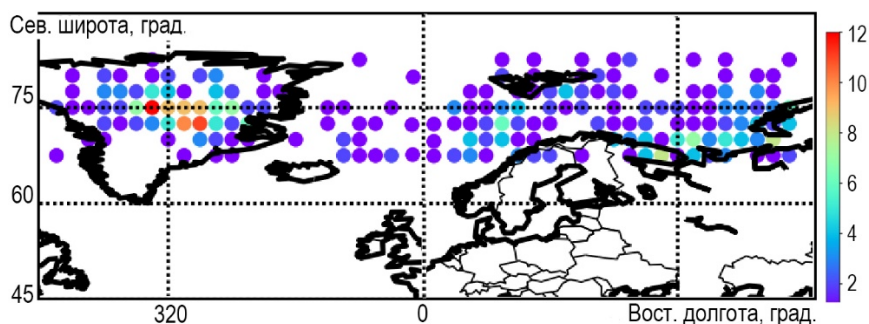


Рис. 1. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Гренландского антициклона в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг., июль). Вариант автоматизированного расчета с подвижной границей района.

Fig. 1. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Greenland highs at regular grid nodes (1992–2021, July). Option of calculation with mobile boundary of the area.

Разделение районов ЦДА в таких случаях затруднительно (пояс экстремумов полей геопотенциальной высоты может быть непрерывным, и их отнесение к тому или иному ЦДА является условным), поэтому далее в работе приняты постоянные границы районов (приведены в представленной ниже таблице).

Характеристики ЦДА периода 1992–2021 гг.

Результатам расчета оценок характеристик ЦДА периода 1992–2021 гг. (табл. 1) можно дать следующую интерпретацию.

Общая повторяемость центров (p , %) в рассматриваемых районах показывает, что наиболее устойчивыми, когда чаще наблюдаются циклонические/антициклонические объекты (с повторяемостью $p > 90$ %), являются барические образования: в январе – Алеутской, Исландской депрессий, Сибирского, Южно-Тихоокеанского, Южно-Атлантического и Южно-Индийского максимумов; в июле – Южно-Азиатской депрессии, Азорского и Северо-Тихоокеанского (Гонолульского) антициклонов.

Наибольшую площадь эллипса рассеивания (более 5 млн км²) имеют в январе Азорский максимум и Австралийский минимум; наименьшая площадь эллипса у Южно-Азиатской (термической) депрессии в июле (менее 1 млн км²).

Сравнение «мощностей» ЦДА представлено в виде диаграммы их средней за многолетний месяц геопотенциальной высоты $\bar{H}_0$ изобарического уровня 1000 гПа (рис. 2). Как следует из рис. 2а, на этом изобарическом уровне в январе наибольшей «мощностью» обладает Сибирский максимум (33,5 дам), глубокие области пониженного давления имеют Алеутский и Исландский минимумы (~ -19 дам). В июле (рис. 2б) климатические антициклоны (кроме Гренландского) близки по интенсивности (24–27 дам).

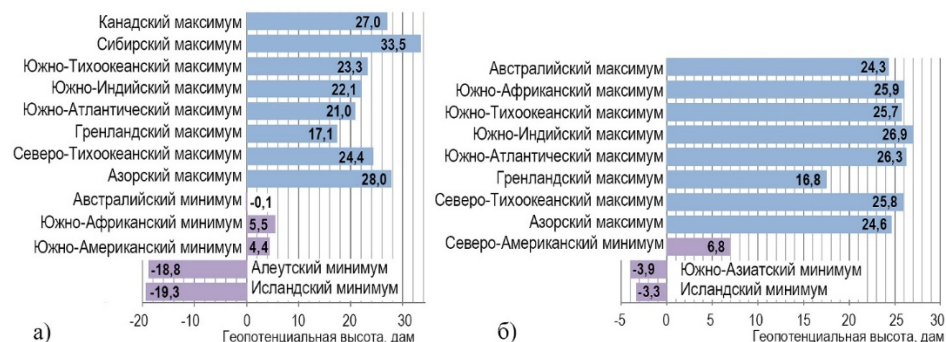


Рис. 2. Средние значения геопотенциальной высоты ЦДА (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 2. Mean geopotential heights COA (1992–2021): January (а), July (б).

Таблица 1. Статистические характеристики ЦДА (1992–2021 гг.)
Table 1. Statistical characteristics of Atmospheric Centers of Action (1992–2021)

ЦДА	Месяц	В границах		$\rho, \%$	$\bar{\varphi}, ^\circ$	$\bar{\lambda}, ^\circ$	$\sigma_{\varphi},$ км	$\sigma_{\lambda},$ км	$S,$ млн км ²	k
		$\varphi, ^\circ$	$\lambda^*, ^\circ$							
Северное полушарие										
Перманентные										
Азорский максимум	январь	20...60	290...20	80,1	40,8	340,0	800	2030	5,1	0,39
	июль	20...60	290...20	98,2	38,8	324,5	590	1310	2,4	0,45
Исландский минимум	январь	45...75	270...360	91,4	60,2	327,5	600	2050	3,5	0,26
	июль	45...75	250...340	75,6	59,1	293,7	620	2360	4,6	0,26
Северо-Тихоокеанский максимум	январь	20...50	140...240	58,9	35,0	210,4	600	2400	4,5	0,25
	июль	20...50	140...240	96,7	39,9	204,1	390	1340	1,6	0,28
Гренландский максимум	январь	65...85	280...360	38,4	74,2	324,7	370	1440	1,7	0,25
	июль	65...85	280...360	49,0	74,1	334,5	390	2020	2,4	0,19
Сезонные										
Алеутский минимум	январь	35...70	130...240	98,6	50,4	186,4	580	2030	3,6	0,28
Сибирский максимум	январь	25...70	50...140	91,5	47,1	94,1	840	1380	3,6	0,61
Канадский максимум	январь	30...60	240...290	69,5	43,2	258,1	630	1320	2,6	0,47
Северо-Американский минимум	июль	15...45	240...280	31,7	33,9	255,2	780	840	1,9	0,64
Южно-Азиатский минимум	июль	10...45	30...90	99,6	26,2	64,5	300	1060	0,9	0,24

ЦДА	Месяц	В границах		$\rho, \%$	$\bar{\varphi}, ^\circ$	$\bar{\lambda}, ^\circ$	$\sigma_{\varphi},$ км	$\sigma_{\lambda},$ км	$S,$ млн км ²	k
		$\varphi, ^\circ$	$\lambda^*, ^\circ$							
Южное полушарие										
Перманентные										
Южно-Тихоокеанский максимум	январь	-15...-50	200...290	93,5	-37,7	245,4	460	2010	2,7	0,21
	июль	-15...-50	200...290	79,9	-35,7	250,5	560	2110	3,7	0,26
	январь	-15...-50	290...10	95,2	-35,0	344,0	450	1600	2,3	0,28
	июль	-15...-50	290...10	83,1	-34,0	338,7	520	2000	3,3	0,26
Южно-Индийский максимум	январь	-15...-50	40...110	93,4	-37,0	76,8	370	1570	1,7	0,22
	июль	-15...-50	40...110	83,7	-33,8	69,2	360	1630	1,8	0,22
Сезонные										
Южно-Американский минимум	январь	0...-45	280...320	31,1	-26,1	302,3	870	560	1,5	0,62
Южно-Африканский минимум	январь	15...-45	0...40	20,9	-16,9	24,4	1530	740	3,5	0,48
Южно-Африканский максимум	июль	15...-45	0...40	34,1	-31,6	19,3	400	1160	1,4	0,32
Австралийский минимум	январь	-10...-45	110...180	44,1	-23,8	144,5	880	2000	5,5	0,44
Австралийский максимум	июль	-15...-50	110...180	72,7	-35,7	145,6	530	1660	2,7	0,31

Примечание. λ – долгота восточная.

На рис. 3–14 представлены распределения синоптических центров рассматриваемых ЦДА на картах районов функционирования, показаны повторяемости в узлах регулярной сетки максимумов/минимумов полей геопотенциальной высоты уровня 1000 гПа. В результате совместного анализа этих рисунков и данных табл. 1 можно сформулировать особенности каждого ЦДА в январе и июле.

Азорский максимум в январе, кроме своего обычного положения, имеет повторяемость синоптических центров на западной части Европы и северной части Африки (рис. 3а), что не отмечается в июле (рис. 3б). За счет этой особенности в январе велики среднее квадратическое отклонение по долготе и площадь эллипса рассеяния (см. табл. 1).

Значительное смещение среднего центра на запад от января к июлю (почти на 30° долготы) имеет Исландская депрессия (рис. 4, табл. 1). Если в январе минимумы депрессии располагаются на севере Атлантики, то в июле (в основном) – на восточной части Канады.

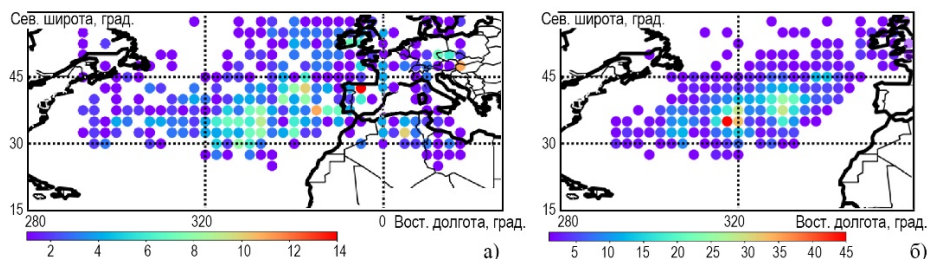


Рис. 3. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Азорского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 3. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Azores high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (b).

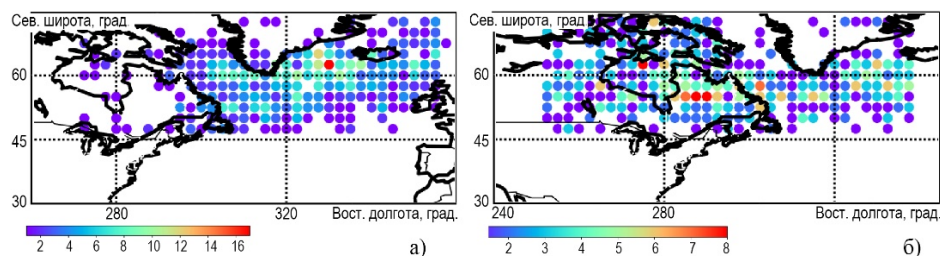


Рис. 4. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Исландской депрессии в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 4. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Icelandic Low at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (b).

Средний центр Северо-Тихоокеанского антициклона также подвержен смещению от января к июлю – на северо-запад; при этом площадь его эллипса рассеяния уменьшается более чем в два раза (рис. 5, табл. 1).

Центр Гренландского антициклона от января к июлю несколько смещается в восточном направлении (рис. 6, табл. 1).

Алеутская депрессия и Сибирский антициклон имеют равные площади эллипсов рассеяния центров, однако коэффициенты сжатия различаются в два раза (табл. 1), что прослеживается по отображениям на рис. 7, 8а. Центры Сибирского максимума наблюдаются и на Урале, и на юго-востоке Азии (рис. 8а).

Устойчивы в июле (повторяемость 99,6 %) минимумы объектов Южно-Азиатской депрессии (рис. 8б). Особенности характеристик данного ЦДА отражены в работах [18, 19].

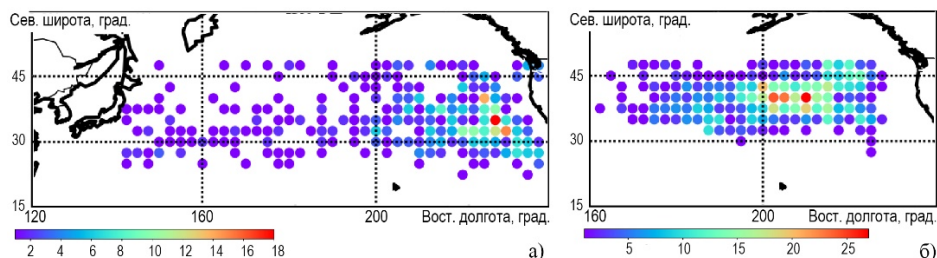


Рис. 5. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Северо-Тихоокеанского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 5. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of North Pacific high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (b).

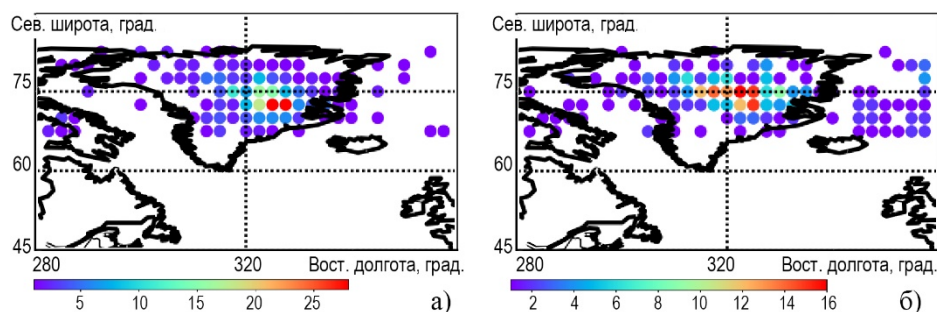


Рис. 6. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Гренландского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 6. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Greenland high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (b).

Северо-Американский (Канадский) максимум в январе сменяется Северо-Американским минимумом в июле (рис. 9), если повторяемость антициклонов примерно 70 %, то циклонов ~30 %. Как следует из рис. 9б и 4б, в летнее время распределения центров циклонических объектов Северо-Американского минимума и Исландской депрессии (смещенные к западу) могут иметь общие области, поэтому статистические оценки характеристик ЦДА, как уже отмечалось, даны для рассматриваемых условных границ районов ЦДА (табл. 1).

Характеристики рассеяния центров Южно-Тихоокеанского (рис. 10), Южно-Атлантического (рис. 11), Южно-Индийского (рис. 12) антициклонов от января к июлю практически не изменяются, но их средние многолетние центры несколько смещаются в сезонах, соответственно, на северо-восток, северо-запад, северо-запад (табл. 1).

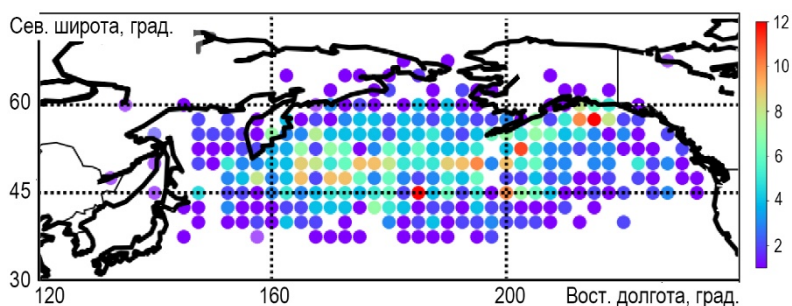


Рис. 7. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Алеутской депрессии в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг., январь).

Fig. 7. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Aleutian Low at regular grid nodes (1992–2021, January).

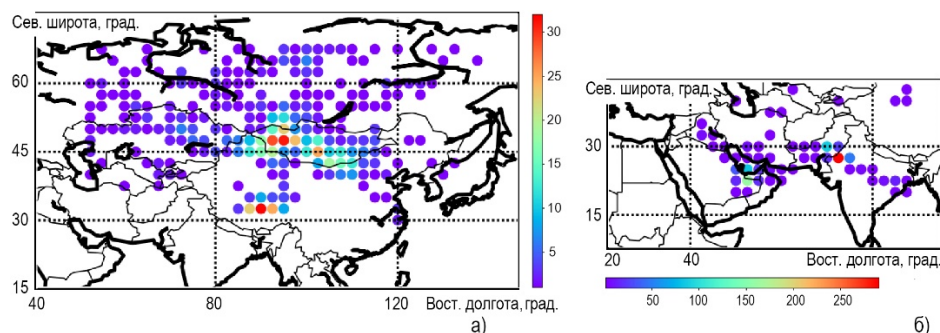


Рис. 8. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Сибирского максимума в январе (а) и Южно-Азиатской депрессии в июле (б) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 8. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Siberian high (a), and South Asia Low in July (б) at regular grid nodes (1992–2021).

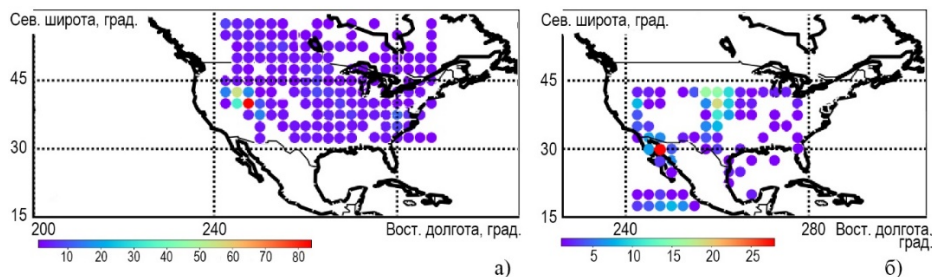


Рис. 9. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Северо-Американского (Канадского) максимума в январе (а) и Северо-Американского циклона в июле (б) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 9. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of North American (Canadian) high in January (a), and North American Low in July (б) at regular grid nodes (1992–2021).

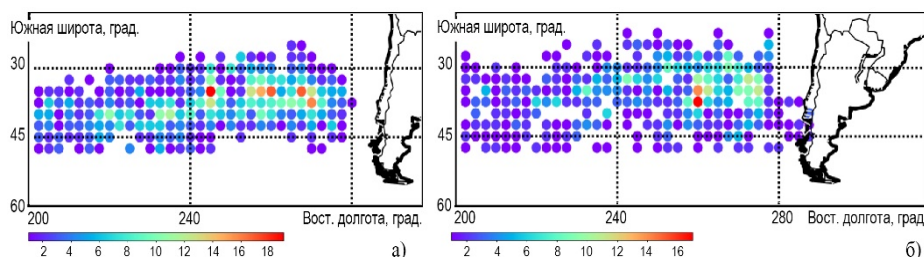


Рис. 10. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Тихоокеанского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 10. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South Pacific high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

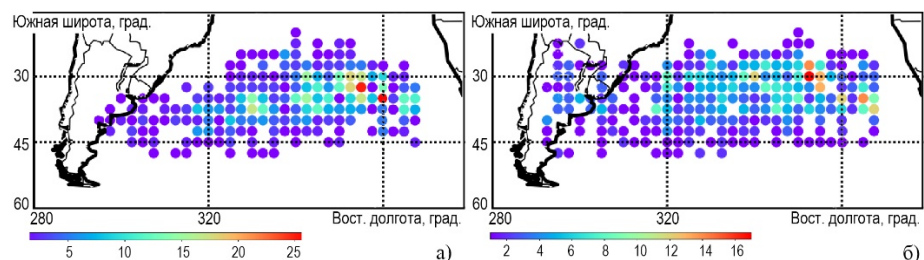


Рис. 11. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Атлантического максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б).

Fig. 11. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South Atlantic high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

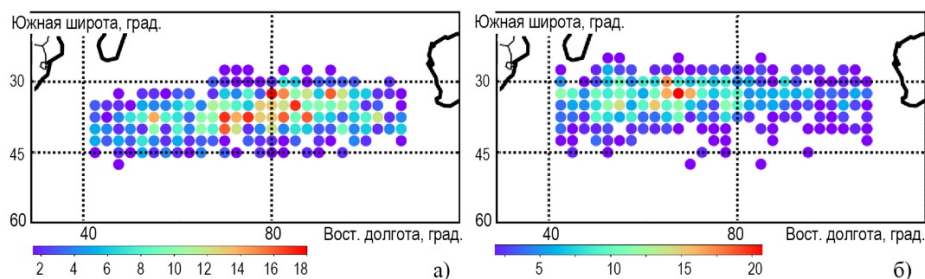


Рис. 12. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Индийского максимума в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.): январь (а); июль (б)

Fig. 12. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South India high at regular grid nodes (1992–2021): January (a), July (б).

Сезонный Южно-Американский минимум (рис. 13а) отличается невысокой повторяемостью (~30 %). Циклонические объекты Южно-Африканского минимума в январе обладают наименьшей повторяемостью 21 % (табл. 1), распределяются от 15° северной широты до 45° южной (рис. 13б). В июле объекты Южно-Африканского максимума концентрируются в районе 31° южной широты (рис. 13в).

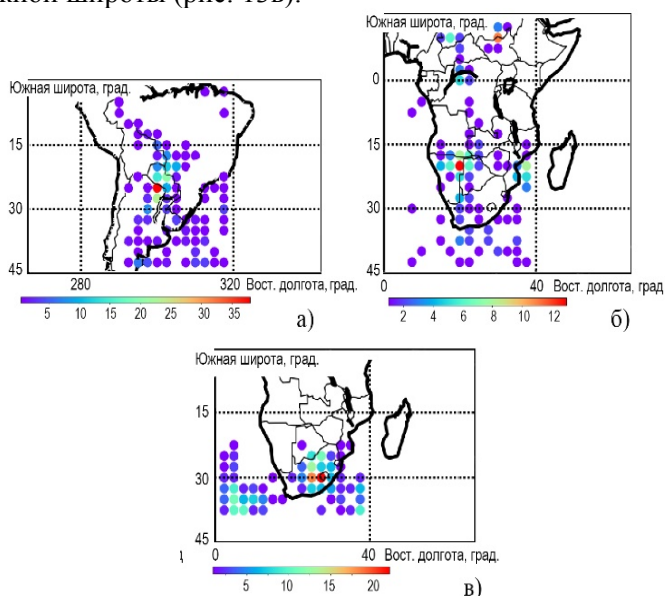


Рис. 13. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Южно-Американского минимума в январе (а), Южно-Африканского минимума в январе (б) и Южно-Африканского максимума в июле (в) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 13. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of South American Low in January (a), South Africa Low in January (б) and South Africa high in July (в) at regular grid nodes (1992–2021).

Центр Южно-Австралийского минимума в январе находится на широте (южной) $\sim 24^\circ$, в июле центр Южно-Австралийского антициклона – на широте $\sim 35^\circ$ (рис. 14, табл. 1).

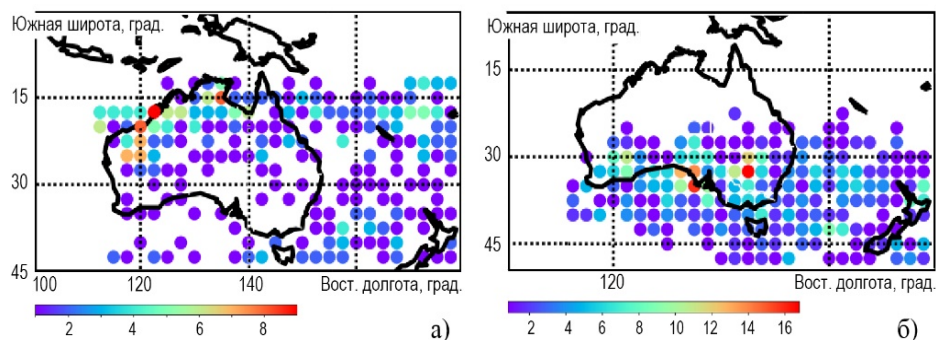


Рис. 14. Распределение повторяемости (числа случаев) синоптических центров Австралийского минимума в январе (а) и Австралийского максимума в июле (б) в узлах регулярной сетки (1992–2021 гг.).

Fig. 14. Distribution of recurrence (number of cases) of synoptic centers of Australian Low in January (a) and Australian high in July (б) at regular grid nodes (1992–2021).

Сравнительный анализ характеристик ЦДА за разные периоды

Проведено сравнение расчетных статистических оценок характеристик ЦДА периода 1992–2021 гг. (NCEP/DOE) с соответствующими оценками базового климатического периода 1961–1990 гг. (по данным реанализа NCEP/NCAR, для которого также рассчитаны среднегодовые ряды данных). Сравнение с данными других источников, например для периода 1981–2010 гг. (по данным реанализа ERA-Interim и др.) [13] или для 1949–2000 гг. (по данным ВНИИГМИ-МЦД) [12], может быть не совсем корректным, поскольку в работах рассматриваются разные границы районов ЦДА и различные периоды осреднения.

Результаты сравнения представлены в табл. 2 в виде аномалий $\delta x_i = x_i - x_{i1}$, где x_i, x_{i1} – статистические оценки характеристик (средней геопотенциальной высоты $\bar{H}_0$, широты и долготы $\bar{\varphi}, \bar{\lambda}$ центров, средних квадратических отклонений центров $\sigma_\varphi, \sigma_\lambda$ по широте и долготе), соответственно, для периодов 1992–2021 и 1961–1990 гг. Однако представленная форма изменения характеристик ЦДА является малоинформативной, поэтому дополнительно дана оценка статистической значимости их различий в рассматриваемых периодах.

Таблица 2. Аномалии характеристик ЦДА периода 1992–2021 гг. (NCEP/DOE) относительно базового климатического периода 1961–1990 гг. (NCEP/NCAR)
Table 2. Anomalies of characteristics of Atmospheric Centers of Action of period 1992–2021 (NCEP/DOE) relative to basic climatic period 1961–1990 (NCEP/NCAR)

ЦДА	Месяц	$\delta \bar{H}_0$, дам	$\delta \bar{\varphi}$, °	$\delta \bar{\lambda}$, °	$\delta \sigma_{\varphi}$, °	$\delta \sigma_{\lambda}$, °	δS , 1 млн км ²	δk
Северное полушарие								
<i>Перманентные</i>								
Азорский максимум	январь	0,50	0,1	2,7	0,0	0,2	0,3	0,02
	июль	-0,36	-1,7	-1,6	-1,2	-0,8	-0,6	-0,05
Исландский минимум	январь	-0,01	1,0	0,8	-0,3	-0,1	-0,2	-0,01
	июль	-0,08	-0,6	-0,9	-0,1	0,5	0,0	-0,01
Северо-Тихоокеанский максимум	январь	-0,22	-0,4	-1,4	0,1	1,6	0,5	-0,01
	июль	0,35	0,5	-0,9	-0,2	0,7	0,0	-0,03
Гренландский максимум	январь	-4,11	0,3	0,8	0,2	3,8	0,5	-0,07
	июль	1,14	-0,1	-1,2	-0,7	-6,4	-1,4	0,02
<i>Сезонные</i>								
Алеутский минимум	январь	-0,02	-0,2	2,3	-0,2	0,2	-0,1	-0,02
Сибирский максимум	январь	-0,01	-0,7	0,0	0,2	-0,8	-0,1	0,04
Канадский максимум	январь	-0,49	0,4	0,6	0,3	0,1	0,1	0,02
Северо-Американский минимум	июль	-0,89	0,5	3,0	0,8	0,5	0,3	0,03
Южно-Азиатский минимум	июль	0,96	-1,5	-1,3	-1,4	-0,1	-0,4	-0,10
Южное полушарие								
<i>Перманентные</i>								
Южно-Тихоокеанский максимум	январь	0,51	-0,6	-1,4	0,4	0,1	0,2	0,01
	июль	1,43	-0,4	1,2	-0,8	-0,7	-0,5	-0,02
Южно-Атлантический максимум	январь	0,91	-1,1	0,0	-0,4	0,5	-0,1	-0,03
	июль	1,09	-0,3	3,6	-0,3	-0,1	-0,2	-0,01
Южно-Индийский максимум	январь	1,22	-1,6	-1,6	-0,1	0,1	-0,1	-0,01
	июль	0,78	0,4	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	0,00
<i>Сезонные</i>								
Южно-Американский минимум	январь	0,38	2,4	1,3	1,9	0,1	0,3	-0,18
Южно-Африканский минимум	январь	1,59	-6,4	-0,9	-4,3	-0,7	-1,4	0,07
Южно-Африканский максимум	июль	1,53	0,0	0,0	0,3	0,5	0,1	0,00
Австралийский минимум	январь	-0,10	-1,2	3,2	1,1	-0,4	0,6	0,06
Австралийский максимум	июль	0,67	-0,3	1,5	-0,2	-0,3	-0,1	0,00

Проведена проверка статистических гипотез: во-первых, о принадлежности параметров разным распределениям; во-вторых, о значимом неравенстве средних. При этом применялись непараметрические критерии Смирнова – Колмогорова и Манна – Уитни для двух независимых выборок [17], в качестве которых использовались ряды среднегодовых средних для двух периодов (1992–2021, 1961–1990 гг.). В табл. 2 выделены ячейки при значимой (на уровне статистической значимости 0,05) неадекватности распределений параметров или при значимых отличиях средних (на уровне 0,05).

Для примера на рис. 15 приведены гистограммы распределения характеристик Гренландского максимума в различных периодах.

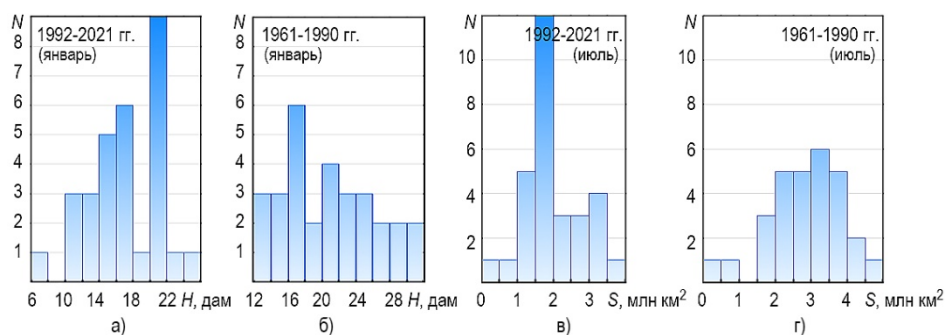


Рис. 15. Гистограммы распределения характеристик Гренландского максимума в разных периодах: средней геопотенциальной высоты в январе (а, б) и площади эллипса рассеяния в июле (в, г).

Fig. 15. Histograms of distribution of Greenland high characteristics in different periods: mean geopotential high in January (а, б), scattering ellipse area in July (в, г).

Как следует из данных табл. 2, в сравнении с базовым климатическим периодом значительно снизились средний максимум Гренландского ЦДА в январе и площадь его эллипса рассеяния в июле, что подтверждает происходящие в последние десятилетия процессы таяния ледяного щита Гренландии. Отмечается рост среднего минимума Южно-Азиатской депрессии и его смещение к югу, но углубление Северо-Американской депрессии, обусловленной прогреванием плоскогорий Большого бассейна и плато Колорадо.

В Южном полушарии определено значимое усиление интенсивности субтропических антициклонов. Вместе с этим изменились координаты широты (в южном направлении) их средних центров, что согласуется с выводами исследования [7] о связи широтного положения и интенсивности данных ЦДА (интенсивность увеличивается при перемещении ЦДА в более высокие широты, к югу, что обеспечивает адвекцию тепла и усиление

вихря в поле силы Кориолиса). Эти изменения характеристик ЦДА в сравнении с базовым климатическим периодом подтверждают аспекты современного климата в части интенсификации процессов Эль-Ниньо [13] и климатических изменений в прибрежных районах Антарктики [8].

Динамика характеристик ЦДА периода 2000–2021 годов

Оценка динамики характеристик ЦДА проведена в виде расчета хода скользящих десятилетних средних, результаты представлены для современного периода 2000–2021 гг. в табл. 3, при этом показаны только параметры, выделяющиеся особенностью тенденций, для которых коэффициент детерминации линейного тренда $R^2 > 0,7$. По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы по тенденциям средних характеристик ЦДА.

Северное полушарие. Азорский максимум: в январе имеется тенденция перемещения среднего центра на запад, снижается рассеяние центров по широте, уменьшается степень сжатия эллипса рассеяния; в июле – тенденция смещения среднего центра в восточном направлении. Исландский минимум: в январе уменьшается рассеяние центров по широте, в июле есть тенденция смещения центра к западу. Северо-Тихоокеанский максимум: в январе снижается рассеяние центров по широте; в июле отмечается тенденция роста средней интенсивности и смещения центра в северном направлении. Гренландский антициклон: в январе присутствует тенденция роста среднего максимума, его смещения к востоку, при этом снижается площадь эллипса рассеивания и разброс центров по широте, долготе; в июле – только тенденция уменьшения среднего квадратического отклонения по долготе. Алеутский минимум в январе имеет тенденцию к углублению. Сибирский максимум: средний центр смещается к западу, увеличивается рассеивание в широтном направлении. Южно-Азиатская депрессия имеет тенденции роста рассеяния центров по долготе и площади эллипса рассеяния.

Южное полушарие. Южно-Тихоокеанский максимум: в январе имеет место тенденция смещения среднего центра на юго-запад. Южно-Атлантический максимум: в январе – тенденция смещения среднего центра в северном направлении; в июле – тенденции роста средней мощности, смещения центра к югу и снижения площади рассеивания. Южно-Индийский максимум: в январе – смещение среднего центра к западу, в июле – к юго-востоку, с ростом характеристик рассеяния. Южно-Американский минимум: центр смещается на юго-восток, растет площадь эллипса рассеивания. Южно-Африканский минимум и Южно-Африканский максимум: изменяются геометрические характеристики эллипса рассеяния. Австралийский минимум имеет тенденцию к снижению среднего давления.

Не выявлено значимых тенденций изменения характеристик сезонных ЦДА – Северо-Американского минимума и Канадского максимума (в табл. 3 не представлены).

Таблица 3. Тенденции характеристик ЦДА в скользящих периодах за 2000–2021 гг.**Table 3.** Characteristics trends of Atmospheric Centers of Action in moving periods for 2000–2021

ЦДА	Месяц	Параметр	Тренд*	R^2
Северное полушарие				
Азорский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	—	0,72
		σ_{φ}	—	0,91
		k	—	0,85
	июль	$\bar{\lambda}$	+	0,90
Исландский минимум	январь	σ_{φ}	—	0,85
		k	—	0,76
	июль	$\bar{\lambda}$	—	0,93
Северо-Тихоокеанский максимум	январь	σ_{φ}	—	0,75
		k	—	0,80
	июль	$\bar{H}_o$	+	0,92
			$\bar{\varphi}$	+
Гренландский максимум	январь	$\bar{H}_o$	+	0,74
		$\bar{\lambda}$	+	0,72
		σ_{λ}	—	0,92
		σ_{φ}	—	0,90
		k	+	0,88
		S	—	0,91
	июль	σ_{λ}	—	0,83
Алеутский минимум	январь	$\bar{H}_o$	—	0,70
Сибирский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	—	0,88
		σ_{φ}	+	0,89
Южно-Азиатский минимум	июль	σ_{λ}	+	0,92
		S	+	0,70
Южное полушарие				
Южно-Тихоокеанский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	—	0,78
		$\bar{\varphi}$	—	0,95
	июль	σ_{φ}	—	0,77
Южно-Атлантический максимум	январь	$\bar{\varphi}$	+	0,91
	июль	$\bar{H}_o$	+	0,87
		$\bar{\varphi}$	—	0,86
		S	—	0,73

ЦДА	Месяц	Параметр	Тренд*	R^2
Южно-Индийский максимум	январь	$\bar{\lambda}$	–	0,81
		σ_{φ}	+	0,77
		k	+	0,73
		S	+	0,73
	июль	$\bar{\lambda}$	+	0,96
		$\bar{\varphi}$	–	0,73
		σ_{φ}	+	0,77
		k	+	0,85
Южно-Американский минимум	январь	$\bar{\lambda}$	+	0,76
		$\bar{\varphi}$	–	0,71
		σ_{λ}	+	0,86
		σ_{φ}	+	0,81
		S	+	0,84
Южно-Африканский минимум	январь	σ_{φ}	–	0,89
		k	+	0,92
Южно-Африканский максимум	июль	σ_{λ}	+	0,74
Австралийский минимум	январь	$\bar{H}_o$	–	0,78
		σ_{φ}	+	0,77
Австралийский максимум	июль	σ_{φ}	–	0,72

Примечание. * (+) – рост; (–) – снижение.

Заключение

В настоящее время остаются востребованными статистические методы исследования [14]. Они позволяют на базе обработки большого объема материала проникнуть в суть атмосферных процессов путем выявления закономерностей их проявления, а увеличение количества и качества исходной информации о состоянии атмосферы дает возможность получить новые сведения об особенностях циркуляции для совершенствования методов долгосрочного прогнозирования, корректировки климатических моделей, оценки взаимосвязей параметров атмосферных процессов.

В данной работе представлены статистические оценки характеристик ЦДА Северного и Южного полушарий, отображены на карте распределения повторяемости синоптических центров действия в узлах регулярной сетки.

Полученные оценки параметров ЦДА на современном исходном материале позволили их сравнить с оценками базового климатического периода

1961–1990 гг. Основные статистически значимые изменения характеристик ЦДА следующие: для Северного полушария: в июле смещен к югу средний центр Азорского максимума; ослаблена интенсивность Гренландского максимума в январе, в июле уменьшилась площадь его эллипса рассеяния; в январе увеличилась площадь эллипса рассеяния Северо-Тихоокеанского антициклона; в июле углубился Северо-Американский минимум, но возрос средний минимум (со смещением к югу) Южно-Азиатской депрессии; для Южного полушария: произошло усиление субтропических антициклонов с отклонением к югу их центров.

Определены средние значения характеристик ЦДА в скользящих 10-летних периодах, которые позволили выявить значимые тенденции изменений периода 2000–2021 гг. Динамика характеристик ЦДА показывает, что в последние 20 лет происходит в январе: усиление Гренландского антициклона, углубление Алеутского и Австралийского циклонов; в июле: рост среднего максимума Северо-Тихоокеанского и Южно-Атлантического антициклонов. Кроме того, отмечаются тенденции изменений положения средних центров многих ЦДА и их геометрических характеристик рассеяния. Отмеченные изменения связаны со сложными взаимозависимыми климатическими механизмами, типами потепления [11], ведущими климатическими модами [13].

Список литературы

1. Алимпиева М.А., Морозова С.В. О состоянии центров действия атмосферы на фоне глобальных климатических тенденций // Современная экология: образование, наука, практика. Воронеж: Научная книга, 2017. С. 383–387.
2. Апасова Е.Г. О характеристиках местоположения центров действия атмосферы // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1979. Вып. 58. С. 89–97.
3. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 2. С. 57–80. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.
4. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. № 3. С. 32–58. DOI: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.
5. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности изменчивости циклонической активности умеренных широт северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в атлантико-европейском секторе // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 2. С. 14–40.
6. Вершовский М.Г. Статистические оценки многолетних изменений интенсивности центров действия атмосферы // Электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 26. С. 1–15.
7. Вершовский М.Г., Кондратович К.В. Южно-Тихоокеанский субтропический антициклон: интенсивность и локализация // Метеорология и гидрология. 2007. № 12. С. 29–34.
8. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Крупномасштабные колебания циркуляции атмосферы в Южном полушарии и их влияние на изменение климата некоторых регионов земного шара в XX веке // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 5–17.
9. Егорина А.В. Режим атмосферной циркуляции над Евразией // Международный журнал прикладных исследований. 2015. № 6 (часть 2). С. 265–268. [Электронный ресурс]. URL: <https://applied-research.ru/article/view?id=6885> (дата обращения: 28.07.2022).

10. Морозова С.В. Комплексный анализ основных центров действия атмосферы Северного полушария // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2013. Т. 13. Вып. 1. С. 38-44.
11. Мохов И.И., Петухов В.К. Центры действия в атмосфере и тенденции их изменения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 3. С. 321-329.
12. Мохов И.И., Хон В.Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменений центров действия атмосферы в Северном полушарии: Анализ данных наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 6. С. 723-732.
13. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 5-23.
14. Ранькова Э.Я., Алексеев Г.В., Алешина М.А. и др. Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи (Научные чтения памяти Георгия Вадимовича Груза) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 5-50. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-5-50.
15. Розанова И.В., Сарухян Э.И., Смирнов Н.П. Изменчивость интенсивности и положения циклонического центра действия в атлантическом секторе Южного океана во второй половине XX столетия // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 75-82.
16. Смолянкина Т.В. Центры действия атмосферы Северного полушария и их вклад в формирование аномалий погоды Дальнего Востока: автореферат дис. канд. геогр. наук: 11.00.09. Владивосток, 2000. 25 с.
17. Справочник по прикладной статистике. Т. 2 / Пер. с англ., под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1990. 526 с.
18. Шипко Ю.В., Балакин В.С., Шувакин Е.В. Факторная модель переднеазиатской депрессии на изобарическом уровне 925 гПа // Вестник Воронежского гос. университета. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 1. С. 22-28. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2657.
19. Шипко Ю.В., Колычев О.В., Дьяков С.А., Кузнецов И.Е., Закусилов В.П. Методика анализа обобщенных характеристик структуры Южноазиатской депрессии с учетом термического режима подстилающей поверхности // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 84-98. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-84-98.
20. Atmospheric Centers of Action Indices [Электронный ресурс]. URL: <https://you.stonybrook.edu/coaindices> (дата обращения: 28.07.2022).
21. Atmospheric Reanalyses Comparison Table [Электронный ресурс]. URL: <https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table> (дата обращения: 20.02.2023).
22. Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M. Atmospheric centers of action in the Northern and Southern Hemispheres: Tendencies of change in the 21st century from model simulations // Research Activities in Earth System Modelling. 2021. Rep. 51. WCRP report № 4/2021. WMO. Geneva. S. 7. P. 11-12.
23. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html> (дата обращения: 20.09.2021).
24. NCEP-NCAR Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 20.02.2023).
25. Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses // Journal of Climate. 2013. Т. 26, № 17. С. 6419-6438. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00777.1

References

1. Alimpiieva M.A., Morozova S.V. On the state of atmospheric centers of action against the background of global climate change. *Sovremennaya ekologiya: obrazovanie, nauka, praktika. [Modern ecology: Education, Science, Practice]*. Voronezh: Science book publ., 2017, pp. 383-387 [in Russ.].

2. Apasova E.G. About the characteristics of the location of atmospheric action centers. *Trudy VNIIGMI-MCD [Proceedings of RIHMI-WDC]*, 1979, vol. 58, pp. 89-97 [in Russ.].
3. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Long-period variation of cyclone frequency in the Northern Extratropics. *Fundamental and Applied Climatology*, 2021. vol. 7, no. 2, pp. 57-80, DOI: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80 [in Russ.].
4. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Variability of anti-cyclonic activity in Northern Extratropics. *Fundamental and Applied Climatology*, 2019, no. 3, pp. 32-58, DOI: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58 [in Russ.].
5. Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Specific features of variability of cyclone activity in Northern Extratropics associated with leading atmospheric circulation modes in Atlantic-European sector. *Fundamental and Applied Climatology*, 2015, no. 2, pp. 14-40 [in Russ.].
6. Vershovskii M.G. Statistical estimates of long-term intensity changes of atmospheric centers of action. *Electronic journal of Kuban state university*, 2007, no. 26, pp. 1-15 [in Russ.].
7. Vershovskii M.G., Kondratovich K.V. South Pacific subtropical anticyclone: Intensity and localization. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 12, pp. 738-742. DOI: 10.3103/S1068373907120035.
8. Gruza G.V., Ran'kova E.Y., Rocheva E.V. Large-scale oscillations of the atmospheric circulation in the southern hemisphere and their influence on climate change in some regions of the globe in the 20th century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 7, pp. 417-425. DOI: 10.3103/S1068373907070011.
9. Egorina A.V. Circulation atmosphere over Eurasia. *International Journal of Applied Research*, 2015, no. 6, part. 2, pp. 265-268. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6885> [in Russ.].
10. Morozova S.V. Comprehensive analysis of atmospheric centers of action of the Northern hemisphere. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle [Izv. of Saratov university. New series. Earth Science series]*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 38-44 [in Russ.].
11. Mokhov I.I., Petukhov V.K. Atmospheric centers of action and tendencies of their change. *Izv. Atmospheric and ocean physics*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 321-329 [in Russ.].
12. Mokhov I.I., Khon V.Ch. Interannual variability and long-term tendencies of change in atmospheric centers of action in the Northern hemisphere: Analyses of observational data. *Izv. Atmospheric and ocean physics*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 723-732 [in Russ.].
13. Mokhov I.I., Chernokul'skii A.V., Osipov A.M. Atmospheric Centers of Action in the Northern and Southern Hemispheres: Features and Variability. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 11, pp. 749-761. DOI: 10.3103/S1068373920110011
14. Rankova E.Ya., Alekseev G.V., Aleshina M.A. et al. Statistical climatology: modern achievements and new ideas (Scientific readings in memory of G.V. Gruza). *Fundamental and Applied Climatology*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 5-50. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-5-50 [in Russ.].
15. Rozanova I.V., Sarukhanyan E.I., Smirnov N.P. Variability of intensity and position of the cyclone center of action in Atlantic sector of the Southern ocean in the second half of the 20th century. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2003, no. 1, pp. 75-82 [in Russ.].
16. Smolynkina T.V. Atmospheric Centers of Action of the Northern Hemisphere and their contribution to the formation of weather anomalies in the Far East. *Abstract of the dissertation cand. geogr. sciences*, Vladivostok, 2000, 25 p. [in Russ.].
17. *Spravochnik po prikladnoy statistike*. Vol. 2. Per. s angl., pod red. E. Lloyda, U. Ledermana, S.A. Ayvazyana, YU.N. Tyurina. M.: Finansy i statistika, 1990, 526 p. [in Russ.].
18. Shipko Yu.V., Balakin V.S., Shuvakin E.V. Factor model of the South Asia Low at the isobaric level 925 hPa. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geocology*, 2020, no. 1, pp. 22-28. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2657 [in Russ.].
19. Shipko Yu.V., Kolychev O.V., Dykov S.A., Kyznetsov I.E., Zakusilov V.P. Method of analysis of generalized characteristics of the South Asia Low structure taking into account thermal regime of underlying surface. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]* 2021, vol. 382, no. 4, pp. 84-98. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-84-98 [in Russ.].

20. Atmospheric Centers of Action Indices. Available at: <https://you.stonybrook.edu/coaindices> (accessed: 28.07.2022).

21. Atmospheric Reanalyses Comparison Table. Available at: <https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table> (accessed: 20.02.2023).

22. Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M. Atmospheric centers of action in the Northern and Southern Hemispheres: Tendencies of change in the 21st century from model simulations. *Research Activities in Earth System Modelling*, 2021, Rep. 51, WCRP report no. 4/2021, WMO, Geneva, S. 7, pp. 11–12.

23. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html> (accessed: 20.09.2021).

24. NCEP-NCAR Reanalysis Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (accessed: 20.02.2023).

25. Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I., Koltermann P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses. *J. Clim.*, 2013, vol. 26, no. 17, pp. 6419–6438. Doi: 10.1175/JCLI-D-12-00777.1.

Поступила 27.12.2022; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 27.12.2022; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-77-92>

УДК 551.581

Синоптические условия формирования сухих и влажных волн тепла и холода на Средней Волге

***С.В. Морозова, С.Н. Лапина,
Е.А. Полянская, М.А. Алимпиева***

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
swetwl@yandex.ru*

Статья посвящена памяти Нины Константиновны Кононовой – выдающегося ученого-метеоролога, исследователя и замечательного человека.

Приведены результаты синоптико-статистического анализа сухих и влажных волн тепла и холода различной продолжительности и интенсивности на Средней Волге. Идентификация волн производилась на основе данных о средней суточной температуре воздуха и суточных суммах осадков на станции Саратов. С использованием евклидова расстояния проведена классификация синоптических ситуаций и выделены соответствующие эталонные поля давления.

Ключевые слова: волны тепла и холода, синоптические условия формирования волн, метод эталонов, трансформационные и динамические процессы

Synoptic conditions for the formation of dry and wet heat and cold waves in the Middle Volga Region

***S.V. Morozova, S.N. Lapina,
E.A. Polyanskaya, M.A. Alimpieva***

*Saratov State University, Saratov, Russia
swetwl@yandex.ru*

The results of a synoptic-statistical analysis of dry and wet heat and cold waves of various duration and intensity in the Middle Volga region are presented. The waves were identified from the data on average daily air temperature and daily precipitation at Saratov station. Using the Euclidean distance, a classification of synoptic conditions was carried out, and the corresponding reference air pressure fields were identified.

Key words: heat and cold waves, synoptic conditions of wave formation, method of references, transformational and dynamic processes

*Памяти
Нины Константиновны Кононовой
посвящается*

Нина Константиновна Кононова начинала обучение в Саратовском государственном университете на кафедре климатологии. Проучившись на кафедре два года, она перевелась в Московский университет, так как в Саратовском университете кафедра климатологии была закрыта. Тем не менее Нина Константиновна никогда не теряла связи с кафедрой, считала ее своей родной, тепло отзывалась о первой заведующей кафедрой Елизавете Владимировне Ишерской.

Современный коллектив кафедры считает своим долгом снова вспомнить о Нине Константиновне – Синоптике с большой буквы – и посвятить ей эту синоптическую работу.

Введение

Волны тепла и холода – сложное гидрометеорологическое явление, характеризующееся несколькими параметрами, главные из которых – интенсивность и продолжительность. Сложность изучения этого явления заключается в том, что интенсивность волны определяется в первую очередь динамическим фактором, а в формировании продолжительности существования волны существенную роль играет и трансформация воздушной массы. В связи с этим сложилось несколько принципиально разных подходов в определении этого гидрометеорологического явления.

Если обратиться к истории, то изначально волна холода определялась Б.И. Срезневским [18] как поступательное, подобное волне смещение воздушных масс, которое сопровождалось понижением средней суточной температуры воздуха на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более в течение суток. Впоследствии это определение распространилось и на волну тепла. В дальнейшем было предложено множество критериев, различающихся количественными характеристиками интенсивности и продолжительности волн тепла/холода.

Обобщенное определение волны тепла и холода приводится в Метеорологическом словаре [20], в котором подчеркивается определяющая роль адвекции в образовании волн. Вышеописанный способ определения волны широко применялся многими исследователями [1, 3, 4, 7, 16, 17], в том числе и сотрудниками ФГБУ «Гидрометцентр России» [6, 16, 19]. Отметим, что при этом для характеристики интенсивности волны используется не только величина аномалии температуры воздуха, но и величина среднего квадратического отклонения, как правило, от $0,5\sigma$ до 2σ [5, 8].

В качестве примера другого подхода к идентификации волны тепла/холода, учитывающего трансформационные процессы, можно привести определение [5]. Согласно авторам [5], волной тепла нужно считать

событие, характеризующееся превышением аномалии приземной температуры воздуха величины стандартного отклонения на протяжении семи дней и более. При этом допускается отклонение аномалии не ниже половины стандартного отклонения в течение не более трех дней. В данном определении акцент сделан на трансформационный фактор формирования волны. Индексы волн тепла (WSDI) и волн холода (CSDI) также ориентированы на трансформационные процессы [21].

При длительном существовании волны тепла/холода над определенным географическим районом важной характеристикой процесса потепления/похолодания является территориальный охват. Э.В. Рочева [15] для характеристики волны тепла ввела в дополнение к интенсивности и продолжительности еще и площадную характеристику. Отметим, что площадь охвата территории положительной/отрицательной аномалией зависит от размера барического образования, формирующего волну тепла /холода.

Так как волны тепла/холода являются неблагоприятными, а нередко и опасными гидрометеорологическими явлениями не только для погодозависимых секторов экономики, но и для самочувствия и здоровья человека, то авторами публикаций [22, 23] для волны тепла предлагается ввести комплексный критерий, учитывающий суточные максимумы и минимумы температуры воздуха, а также показатели влажности. Отметим, что довольно часто волны тепла/холода сопровождаются другими опасными явлениями – сильными ливнями и снегопадами, шквалистыми усилениями ветра, формированием гололедно-изморозевых отложений. При резких волнах холода весной и осенью могут возникать заморозки.

Безусловно, что формирование волны тепла/холода зависит от характера развития синоптических процессов. В настоящем исследовании предполагается рассмотреть, при каких синоптических ситуациях формируются волны тепла/холода различной интенсивности и продолжительности, а также установить, при каких типах синоптических процессов на фоне волны выпадают осадки и в каких случаях развиваются "сухие" волны тепла /холода.

Методика исследования и исходные данные

В данном исследовании за волну тепла/холода принималось повышение/понижение средней суточной температуры воздуха на 3 °С и более от одного дня к другому, продолжающееся не менее двух дней. Случаи, когда волна тепла/холода прерывалась одним днем похолодания/потепления или изотермии, принимались за одну волну тепла/холода. Продолжительностью волны тепла считался промежуток времени (сутки) между самым низким и самым высоким значениями температуры в процессе развития волны. Продолжительностью волны холода считался промежуток времени (сутки) между самым высоким и самым низким значениями температуры в процессе развития волны.

Поскольку поставлена задача по анализу сухих и влажных волн тепла и холода, то введено понятие "сухая" волна тепла/холода и "влажная" волна тепла/холода. Сухой считалась такая волна, при развитии которой на ее фоне ни разу не наблюдались осадки и даже их следы. К влажным относились волны, при развитии которых хотя бы один день выпадали осадки суммарным количеством более 0,3 мм в месяцы теплого периода (апрель–октябрь) и более 0,1 мм в месяцы холодного периода (ноябрь–март).

Для характеристики интенсивности волны были выбраны три градации: слабые, средние и интенсивные волны. Слабыми считались волны с перепадом температур от 3,1 °С до 5 °С. Волны средней интенсивности – с перепадом температур от 5,1 °С до 8 °С. Волны с перепадом температур от 8,1 °С и выше считались интенсивными волнами.

В качестве исходных материалов для идентификации волн использовались средние суточные температуры воздуха и суточные суммы осадков, размещенные на сайте ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [<http://meteo.ru>]. Реперным пунктом для определения волны взят п. Саратов (метеостанция Саратов Юго-Восток). Для синоптического анализа применялись карты погоды за срок 00 ч по гринвичскому времени. Временным промежутком исследования выбран интервал с 2000 по 2021 год.

Исследования проведены для всех месяцев года. В настоящей работе приведены результаты синоптико-статистического анализа волн для центральных месяцев основных и переходных сезонов года – января, апреля, июля и октября.

Определение типичных синоптических ситуаций, формирующих сухие и влажные волны тепла/холода различных интенсивностей, проводилось методом эталонов. Метод эталонов и его применение при синоптическом анализе подробно описаны в публикациях [10, 11, 14].

Эталонное поле подбирается с помощью евклидова расстояния, которое в двумерном пространстве признаков определяется формулой

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{l=1}^n (a(l) - b(l))^2},$$

где d – расстояние между гидрометеорологическими полями; $a(l)$ и $b(l)$ – значения метеопараметра в l -м узле регулярной сетки сравниваемых полей; n – количество сравниваемых полей.

Выбранная мера сходства гидрометеорологических полей характеризует расстояние между ними. За эталон принимается то поле, расстояние от которого до всех остальных полей выборки наименьшее. Таким образом, эталоном является одно из фактических полей класса (выборки), которое ближе по расстоянию ко всем остальным и, следовательно, наилучшим образом описывает все поля, входящие в него.

Эталонные поля давления определялись на пространстве Атлантико-Евразийского сектора полушария, ограниченного параллелями 40° с. ш. и 70° с. ш. и меридианами 30° з. д. и 70° в. д. с шагом по широте

и долготе 5° . В качестве гидрометеорологической величины использовалось значение атмосферного давления на уровне моря. Значения давления в узлах регулярной сетки были получены из данных реанализа (<https://www.copernicus.eu/en>).

Эталонные поля давления определялись отдельно для сухих и влажных волн различных интенсивностей. При выборе эталонного поля для сухих и влажных волн придерживались следующих правил:

- при формировании выборок полей давления для сухих волн тепла/холода выбирались все барические поля дней развития волны, за исключением первого дня развития волны. Именно тех дней, с которых началось развитие процесса потепления/похолодания;

- при формировании выборок полей давления для влажных волн апробировалось два варианта. По первому варианту рабочая выборка формировалась из всех дней развития волны, за исключением самого первого дня ее развития. По второму варианту в выборку включались только те дни развития волны, в которые выпадали осадки указанных суточных сумм ($>0,3$ мм/сутки в теплый период и $>0,1$ мм/сутки в холодный период). Синоптический анализ эталонных полей давления, выбранных по первому и второму способу, не показал существенной разницы в характере барического поля, определяющего влажную волну тепла/холода. В связи с этим выбор эталонных полей давления для влажной волны тепла/холода проводился по первому способу: в рабочую выборку включались все дни влажной волны, за исключением дней начала развития потепления/похолодания.

Укажем, что статистическая характеристика сухих и влажных волн тепла/холода различных интенсивностей подробно представлена в [12]. Поэтому в настоящей статье остановимся на синоптических особенностях осуществления сухих и влажных волн тепла и холода.

Анализ результатов и их обсуждение

Прежде чем представлять результаты синоптических исследований, кратко остановимся на особенностях волн, полученных при их статистическом анализе по материалам публикации [12]. Как указывается в [12], среднегодовая повторяемость теплых и холодных волн примерно одинакова. Однако весной наблюдается преобладание теплых волн над холодными. Осенью, наоборот, повторяемость волн холода возрастает, а волн тепла уменьшается.

Интересно, что зимой и летом количество теплых и холодных волн одинаково. Зимой замечено увеличение повторяемости более интенсивных волн. В среднем и теплые, и холодные волны длятся примерно четыре дня, при этом наименьшую повторяемость имеют слабые волны. С ростом интенсивности волны увеличивается и ее продолжительность. Осадками сопровождается подавляющее большинство и теплых, и холодных волн –

85 % и 75 % соответственно. Примерно в половине дней развития волны наблюдается выпадение осадков выбранных суточных сумм (0,3 мм/сутки в теплый период и $>0,1$ мм/сутки в холодный период) [9, 12].

Выделение эталонных полей давления проводилось для всех месяцев года, однако принципиальной разницы во внутрисезонных особенностях полей-эталонов не замечено, поэтому ниже приводятся эталонные поля давления сухих и влажных волн тепла и холода различных интенсивностей только для центральных месяцев сезонов.

Зимой теплые сухие волны различных интенсивностей формируются под влиянием одного типа синоптического процесса – в результате воздействия восточного отрога субтропического антициклона. Очень часто отрог довольно далеко распространяется на восток и иногда даже может соединяться перемычкой высокого давления с зимним Азиатским антициклоном. При этом по северу Европы, над Уралом и Западной Сибирью наблюдается активная циклоническая деятельность, препятствующая перемещению холодных воздушных масс на юг. В качестве примера такого процесса можно привести эталонное поле слабой сухой волны тепла 28 января 2011 года (рис. 1). В данном случае слабая сухая волна тепла развивалась в течение четырех дней, повышение температуры произошло на четыре с половиной градуса при распространении далеко на восток отрога субтропического антициклона.

Отметим, что если среди слабых и средних по интенсивности зимних волн тепла почти половина являются сухими, то среди теплых интенсивных волн зимой сухих волн практически не встречается. Они составляют очень малую часть всех теплых интенсивных волн января [12]. Как пример сухой интенсивной теплой волны можно привести волну тепла, продолжавшуюся с 5 по 7 января 2000 года, при которой произошло повышение температуры на 10 градусов – с -12°C до -2°C . Такое резкое потепление было связано также с воздействием ядер высокого давления на Среднюю Волгу со стороны Азорского антициклона.

Влажные теплые волны всех интенсивностей зимой определяются одним и тем же синоптическим процессом – поступлением теплых воздушных масс в передней части мощных полярнофронтовых депрессий. Осадки при этом могут выпадать в зоне влияния теплых фронтов или же могут быть связаны с фронтами окклюзии в теплых секторах циклонов. В качестве примера приведем эталонное поле давления интенсивной влажной волны тепла за 9 января 2005 года (рис. 2).

Потепление начало развиваться с 6 января при поступлении теплых воздушных масс в передней части обширной и глубокой депрессии, а выпадение осадков определялось влиянием теплых фронтов, последовательно проходивших через пункт наблюдения (п. Саратов). Повышение температуры при развитии этой волны произошло с $-5,7^{\circ}\text{C}$ до $3,4^{\circ}\text{C}$.

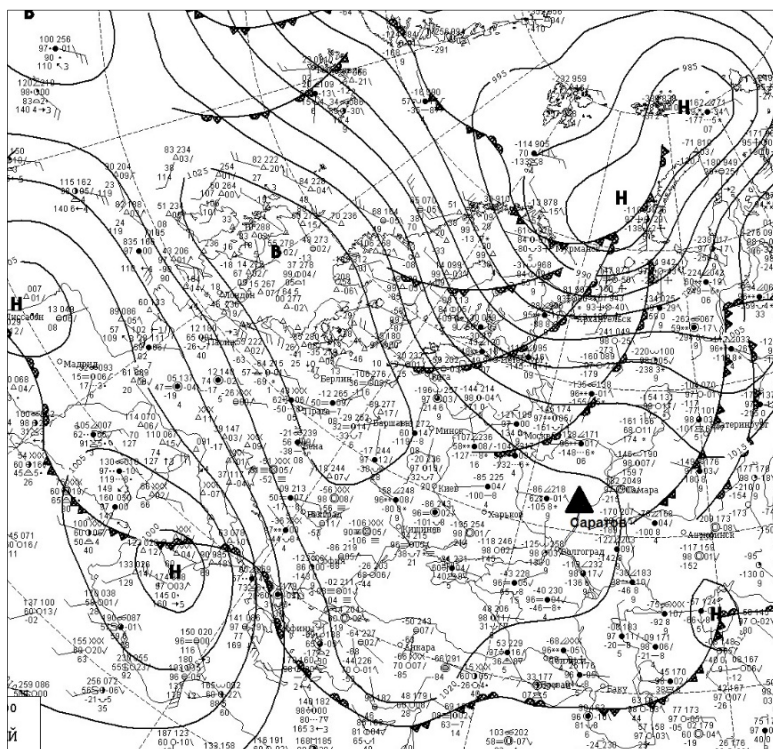


Рис. 1. Фрагмент приземной карты погоды за 28 января 2011 года.

Fig.1. Fragment of the surface weather map for January 28, 2011.

Аналогичным образом проанализированы синоптические условия формирования сухих и влажных зимних волн холода. Отметим, что, как и в случае волн тепла, среди слабых и средних по интенсивности сухих волн холода около половины, а среди интенсивных холодных волн сухих – очень мало. Холодные интенсивные волны практически всегда сопровождаются осадками.

Из синоптического анализа эталонных полей давления сухих волн холода отметим, что сухие волны холода любых интенсивностей формируются при смещении на территорию ядер арктического происхождения, которые могут объединяться с западной периферией антициклона, усиливая ее, либо завершать циклоническую серию, оформляясь в дальнейшем в самостоятельный антициклон. В качестве примера эталонного поля сухой интенсивной волны холода приведем барическое поле за 22 января 2015 года (рис. 3). Эта волна формировалась при распространении на Средней Волге арктического антициклона. Перепад температур при развитии этой волны произошел с 2 °С до 22 °С в течение шести дней.

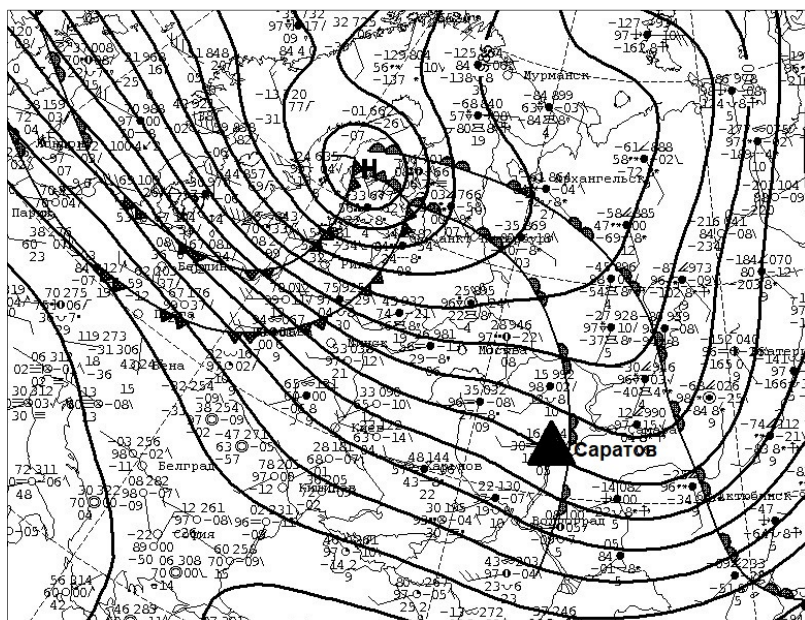


Рис. 2. Фрагмент приземной карты за 9 января 2005 года.

Fig. 2. Fragment of the surface weather map for January 9, 2005.

Анализ эталонных полей давления влажных волн холода всех интенсивностей показал, что похолодание определяется поступлением холодных воздушных масс в тылу циклона, а выпадение осадков на фоне волны холода обусловлено влиянием основных и вторичных холодных фронтов. Однако довольно часто выпадение осадков на фоне волны холода происходит под влиянием теплого участка, возникающего на холодном фронте при образовании на нем волны. При этом на общем фоне понижения температуры наблюдается ее однодневное повышение, нередко довольно существенное.

Синоптический анализ показал, что резкие однодневные повышения температуры при развитии холодных волн могут происходить не только при образовании волны на холодном фронте, но и при быстром смещении циклонической серии через пункт наблюдения. При этом в тыл очередного циклона затекает более холодная воздушная масса, а однодневные повышения возникают при прохождении теплых фронтов семейства циклонов. Такие процессы подробно описаны в монографии [9].

Наиболее редкий процесс, приводящий к однодневным незначительным повышениям температуры (на 1–3 °C) связан с волнами на малоподвижных фронтах, располагающихся на южной периферии обширных стационарирующих антициклонов.

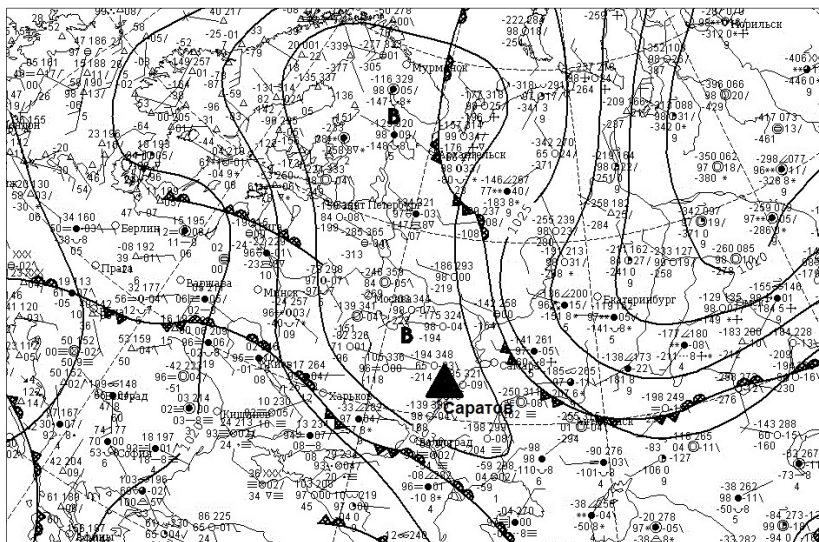


Рис. 3. Фрагмент приземной карты за 22 января 2015 года.

Fig. 3. Fragment of the surface weather map for January 22, 2015.

Примером такого процесса может стать интенсивная волна холода, продолжавшаяся с 24 по 30 января 2014 г. и перебивающаяся однодневным повышением температуры. За время развития этой волны произошло понижение средней суточной температуры более чем на 10 °С, на ее фоне наблюдалось однодневное небольшое повышение температуры на два градуса 28 января, а осадки выпадали 24–25 и 28 января.

Эта волна холода начала формироваться под влиянием тыловой части южного циклона, смещавшегося в северо-восточном направлении с Черного моря на Поволжье. Поскольку развитие волны началось под влиянием тыловой части южного циклона, то в первые два дня существования волны температура понизилась только на два градуса, и в течение этих двух суток выпадали осадки из умеренной, относительно влажной воздушной массы. Впоследствии в систему этого циклона втянулся спустившийся с севера арктический фронт, результатом чего стал прорыв арктического воздуха в тыл этому циклону, что привело к более резкому понижению температуры, примерно на 3–4 °С в сутки.

Развивающееся похолодание усиливалось прохождением нескольких вторичных холодных фронтов. При этом циклон очень быстро смещался к востоку на Северный Казахстан, а на всю Центральную Россию, Урал и Западную Сибирь распространил свое влияние опустившийся с севера антициклон, который все еще оказывался соединенным перемычкой высокого давления с Арктическим антициклоном с центром севернее Новой Земли. По южной периферии этого ставшего обширным антициклона проходила

ветвь малоподвижного полярного фронта, активизация которого 28 января в районе Нижней Волги и дала выпадение осадков с небольшим повышением температуры. Еще раз укажем, что вышеописанный процесс является довольно редким, гораздо чаще однодневные повышения температуры на фоне волны холода связаны с образованием волны на холодном фронте или очень быстро смещающейся серией циклонов.

В отличие от зимы, весной и летом сухих слабых и средних по интенсивности волн тепла очень мало. Сухих интенсивных теплых волн становится больше, они составляют около 80 % всех интенсивных теплых волн. Объяснение этому можно найти из анализа эталонных полей давления теплых сухих волн различной интенсивности в эти сезоны. Оказалось, что весной и летом теплые сухие волны любых интенсивностей определяются двумя типами процессов.

Первый тип связан с влиянием восточного отрога субтропических антициклонов, воздействие которых на Нижнее Поволжье весной, и особенно летом возрастает [2, 13]. В качестве примера на рис. 4 приведено эталонное поле давления сухой интенсивной волны тепла 12 июля 2006 года, которая была обусловлена влиянием субтропического антициклона.

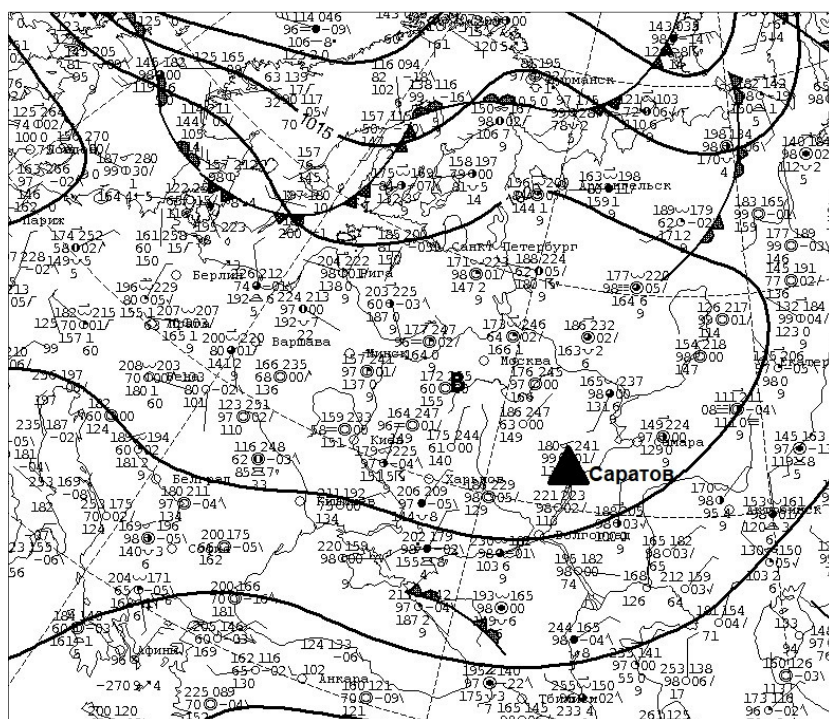


Рис. 4. Фрагмент приземной карты за 12 июля 2006 года.

Fig. 4. Fragment of the surface weather map for July 12, 2006.

При втором типе процессов сухие волны тепла весной, и гораздо реже летом могут определяться переходной зоной между теплым сектором полярнофронтового циклона и западной периферией стационарного антициклона с центром над Казахстаном или Средней Азией. При таком процессе происходит мощное поступление тепла на территорию, к чему добавляется радиационный прогрев в условиях стационарирования антициклона. Поэтому теплых сухих волн средней, и тем более малой интенсивности весной и летом практически нет.

Согласно визуальному анализу процессов потепления в апреле и июле за 2000–2021 гг., не оказалось ни одного случая формирования сухой волны любой интенсивности по второму типу процессов. В то же время в мае преобладающее число теплых сухих волн определяется поступлением тепла по западной периферии стационарного антициклона, расположенного восточнее Поволжья. По-видимому, это объясняется тем, что в июле над Сибирью, Средней Азией и Казахстаном формируется термическая депрессия, а в апреле теплые сухие волны формирует восточный отрог субтропического антициклона. В качестве примера процессов второго типа приведем эталонное поле давления сухой волны тепла мая (рис. 5).

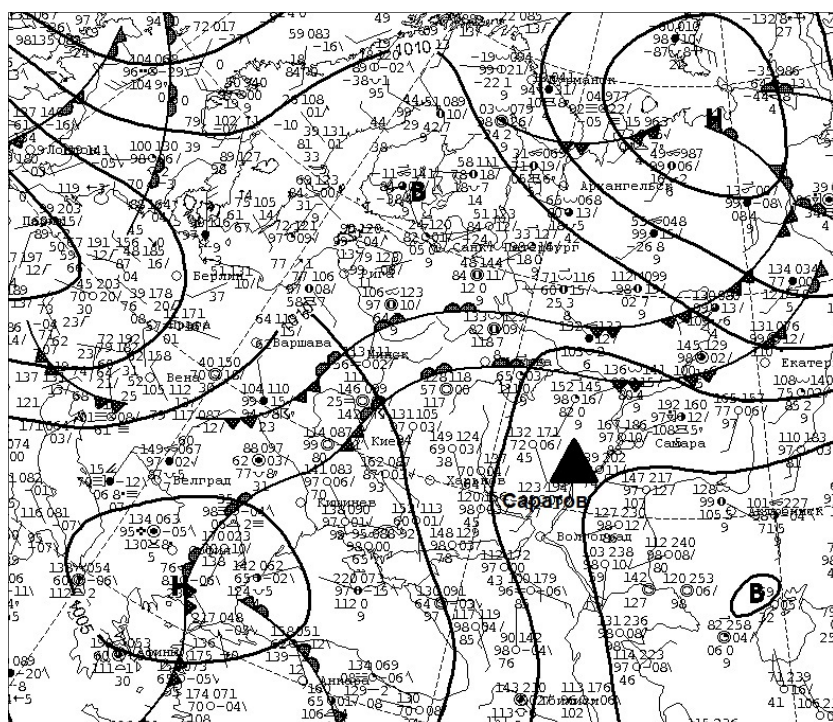


Рис. 5. Фрагмент приземной карты 18 мая 2007 года.

Fig. 5. Fragment of the surface weather map May 18, 2007.

Влажные теплые волны любой интенсивности весной и слабой и средней интенсивности летом возникают, когда теплый воздух поступает по южной или юго-восточной периферии полярнофронтовых депрессий, а осадки определяются зоной влияния либо теплого фронта, либо фронтов окклюзии в теплых секторах циклонов. В качестве примера приведем эталонное поле давления влажной интенсивной волны тепла апреля, которым, согласно объективному анализу приземных барических полей, стало поле давления за 20 апреля 2005 года (рис. 6).

Интенсивное потепление продолжалась с 18 по 23 апреля и было связано с поступлением теплой воздушной массы с юга в передней части полярнофронтового циклона, а осадки выпадали под влиянием теплого фронта и фронта окклюзии, последовательно проходящих через п. Саратов.

Напомним, что летом очень мало влажных интенсивных теплых волн. За весь рассматриваемый период 2000–2021 гг. в июле наблюдалась только одна интенсивная влажная волна тепла, которая продолжалась со 2 по 10 июля 2006 г. с перепадом температур около 11 °С. На фоне этой волны один день 4 июля выпали небольшие осадки с суточным количеством 0,5 мм. Волна тепла стала развиваться после того, как на территорию поступила холодная воздушная масса в тылу циклона. При тыловых заторах произошло выпадение небольшого количества осадков, связанных с развитием конвективной облачности.

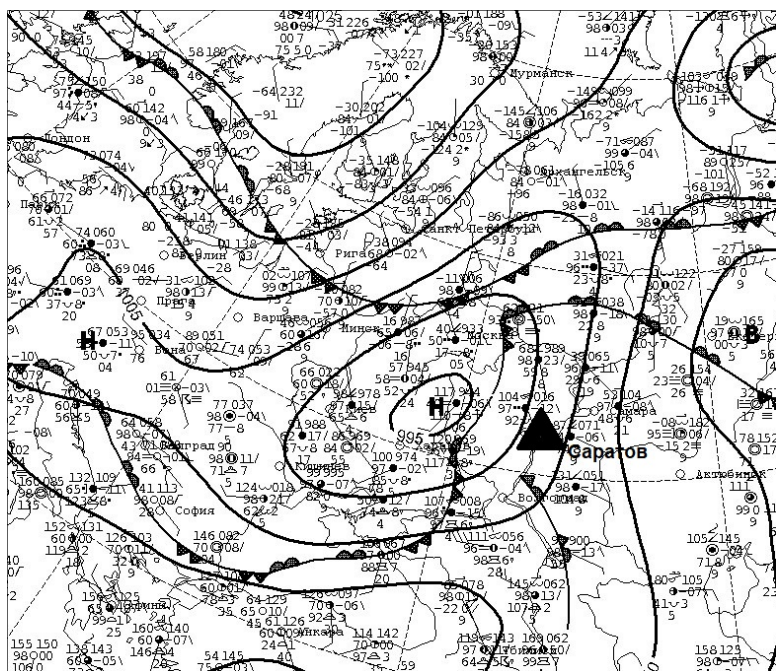


Рис. 6. Фрагмент приземной карты за 20 апреля 2005 года.

Fig. 6. Fragment of the surface weather map for April 20, 2005.

Одновременно с этим происходил трансформационный прогрев поступающей на территорию холодной воздушной массы, что способствовало повышению температурного фона и формированию продолжительной волны тепла. Отметим, что характерной особенностью летних процессов потепления является значительный вклад радиационного фактора, способствующего трансформации воздушных масс, в то время как в другие сезоны теплые волны формируются преимущественно адвективными процессами. Очень часто при таких процессах трансформации сухого арктического воздуха в местный тропический в Нижнем Поволжье развиваются сильные засухи [2, 13].

Объективный анализ (расчет евклидова расстояния) приземных барических полей и синоптический анализ эталонных полей давления сухих и влажных волн тепла и холода осенью подтвердили выявленные особенности осуществления сухих и влажных теплых и холодных волн. Как и в предыдущих случаях, сухие волны тепла осенью определяются западной или юго-западной периферией стационарного антициклона с южным выносом воздушных масс, причем это характерно для сухих теплых волн любых интенсивностей. На рис. 7 приведено эталонное поле давления волны тепла средней интенсивности.

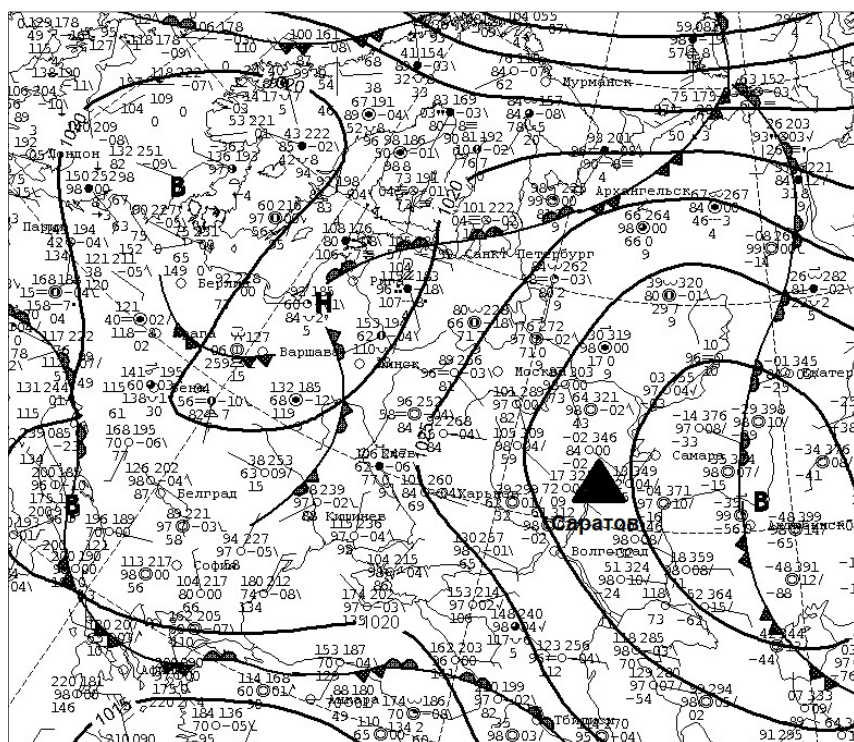


Рис. 7. Фрагмент приземной карты за 3 октября 2007 года.

Fig. 7. Fragment of the surface weather map for October 3, 2007.

Потепление на Средней и Нижней Волге развивалось при поступлении воздуха с юго-востока, по западной периферии устойчивого антициклона с центром над Казахстаном, что способствовало сохранению теплой сухой погоды.

Эталонные поля влажных теплых волн различных интенсивностей также оказались схожи между собой. Влажные волны тепла осенью, как и в другие сезоны, формируются под влиянием южных или юго-восточных частей полярнофронтовых депрессий, в ложбинах которых проходят фронтальные раздели, определяющие выпадение осадков. Сухие волны холода различной интенсивности осенью определяются влиянием арктических антициклонов, а влажные – тыловыми частями циклонов с выпадением осадков на вторичных холодных фронтах.

Заключение

В результате проведенного исследования можно заключить:

1. Во все сезоны года влажные и теплые, и холодные волны формируются в циклонических формах барического рельефа, стимулирующих образование и выпадение осадков, сухие – в условиях антициклонов, способствующих размыванию облачности.

2. Зимой практически не бывает сухих волн тепла, так как теплые волны зимой связаны с адвективными факторами – поступлением теплых воздушных масс в передней части циклонов. Летом, напротив, очень мало влажных теплых волн, так как летние волны тепла формируются в антициклональном поле: либо при распространении отрога субтропического антициклона, либо трансформационными процессами в сухих арктических ядрах высокого давления, поступивших на территорию Среднего и Нижнего Поволжья.

Список литературы

1. Адрианова Л.В. Особенности распределения волн холода и тепла в экстремально-теплых и экстремально-холодных июнях // Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья. Саратов. 1971. Вып. 7. С. 78-82.
2. Архангельский В.Л. Региональная синоптика Нижнего Поволжья. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1968. 208 с.
3. Архангельский В.Л., Никанорова Л.В. Волны холода и тепла в тропосфере и стратосфере над южным Предуральем // Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья. Саратов. 1970. Вып. 6. С. 64-74.
4. Байдал М.Х., Серебрякова А.А. Климатические особенности волн холода в Казахстане в холодное время года // Труды КазНИГМИ. 1955. Вып. 5. С. 37-43.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка возможного вклада глобального потепления и генезис аномально жарких летних сезонов на Европейской территории РФ // Известия РАН. ФАО. 2011. Т. 47, № 6. С. 717-721.
6. Дуйцева М.А., Педь Д.А. Особенности волн холода и тепла на Европейской территории СССР // Труды ЦИП. 1963. Вып. 123. С. 34-62.
7. Исаев Э.А. Исследование синоптических процессов, приводящих к резкому понижению температуры на Европейской территории СССР // Труды ЦИП. 1957. Вып. 51. С. 44-82.

8. Клещенко Л.К. Волны тепла и холода на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 175. С. 76-91.
9. Морозова С.В. Исследование синоптических процессов методом эталонов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. 164 с.
10. Морозова С.В. Прогноз волн тепла и холода для Саратовской области с использованием физико-статистического метода В.Ф. Мартазиновой «плавающий аналог» // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 138-159.
11. Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Н.А. К вопросу обобщения гидрометеорологической информации // Изв. Саратов. ун-та. 2004. Том. 4. Вып. 1-2. С. 157-161.
12. Морозова С.В., Абанников В.Н., Полянская Е.А., Алимпиева М.А. Климатология сухих и влажных волн тепла и холода различной интенсивности // Географический вестник. 2002. №4 (63). С. 80-89.
13. Полянская Е.А. Синоптические процессы и явления погоды Нижнего Поволжья. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. 208 с.
14. Полянская Е.А., Морозова С.В., Пужлякова Г.А., Фетисова Н.А. Физико-статистический метод прогноза резких колебаний температуры воздуха в течение месяца. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. 24 с.
15. Рочева Э.В., Смирнов В.Д. О тенденциях и изменениях продолжительности «волн тепла» на территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2013. Том 25. С. 94-114.
16. Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н. Вероятностный прогноз теплых и холодных зимних погодных условий на территории Беларуси // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 144-154.
17. Салихова Д.Х. О некоторых характеристиках волн тепла в свободной атмосфере над Ташкентом // Труды САНИГМИ. 1966. Вып. 25 (40). С. 18-20.
18. Срезневский Б.И. Волны холода от Новой Земли до Персии, Индии и Якутской области // Метеорологический вестник. 1899. Вып. 4. С. 107-110.
19. Храбров Ю.Б. Исследование календарных особенностей похолоданий и потеплений в Москве // Труды ЦИП. 1967. Вып. 150. 158 с.
20. Хромов С.П. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
21. CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team (ET) on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). 2002. <http://etccdi.pacificclimate.org>.
22. Changnon S.A., Kunkel K.E., Reinke B.C. Impacts and responses to the 1995 heat wave. A call to action // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 177. P. 1497-1506.
23. Robinson P.J. Definition of a Heat Wave // J. Appl. Meteorol. 2000. Vol. 40. P. 262-275.

References

1. Adrianova L.V. Osobennosti raspredeleniya voln kholoda i tepla v ekstremal'no-teplykh i ekstremal'no-kholodnykh iyunyakh. *Voprosy klimata i pogody Nizhnego Povolzh'ya*, 1971, vol. 7, pp. 78-82 [in Russ.].
2. Arkhangel'skiy V.L. Regional'naya sinoptika Nizhnego Povolzh'ya. Saratov, SSU publ., 1968, 208 p. [in Russ.].
3. Arkhangel'skiy V.L., Nikanorova L.V. Volny kholoda i tepla v troposfere i stratosfere nad yuzhnym Predural'yem. *Voprosy klimata i pogody Nizhnego Povolzh'ya*, 1970, vol. 6, pp. 64-74 [in Russ.].
4. Baydal M.Kh., Serebryakova A.A. Klimaticheskiye osobennosti voln kholoda v Kazakhstane v kholodnoye vremya goda. *Trudy Kazakhskogo nauchno-issledovatel'skogo geologorazvedochnogo neftyanogo instituta*, 1955, vol. 5, pp. 37-43 [in Russ.].
5. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Otsenka vozmozhnogo vklada global'nogo potepleniya i genezis anomal'no zharkikh letnikh sezonov na Yevropeyskoy territorii RF. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 717-721 [in Russ.].

6. Duytseva M.A., Ped' D.A. Osobennosti voln kholoda i tepla na Yevropeyskoy territorii SSSR. *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov*, 1963, vol. 123, pp. 34-62 [in Russ.].
7. Isayev E.A. Issledovaniye sinopticheskikh protsessov, privodyashchikh k rezkomu ponizheniyu temperatury na Yevropeyskoy territorii SSSR. *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov*, 1957, vol. 51, pp. 44-82 [in Russ.].
8. Kleshchenko L.K. Volny tepla i kholoda na territorii Rossii. *Sbornik trudov FGBU «VNI-IGMI-MTSD»*, 2010, vol. 175, pp.76-91 [in Russ.].
9. Morozova S.V. Issledovaniye sinopticheskikh protsessov metodom etalonov. Saratov, SSU publ., 2013, 164 p. [in Russ.].
10. Morozova S.V. Prognoz voln tepla i kholoda dlya Saratovskoy oblasti s ispol'zovaniyem fiziko-statisticheskogo metoda V.F. Martazinovoy «Plavayushchiy analog» [Forecast of waves of warmth and cold for the Saratov region using physic-statistical method of V.F. Martazinova "floating analog"]. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 138-159 [in Russ.].
11. Morozova S.V., Polyanskaya E.A., Puzhlyakova G.A., Fetisova N.A. K voprosu obobshcheniya gidrometeorologicheskoy informatsii. SSU publ., 2004, vol. 4, pp. 157-161 [in Russ.].
12. Morozova S.V., Abannikov V.N., Polyanskaya E.A., Alimpieva M.A. Klimatologiya sukhikh i vlazhnykh voln tepla i kholoda razlichnoy intensivnosti. *Geograficheskiy vestnik*, 2002, no. 4 (63), pp. 80-89 [in Russ.].
13. Polyanskaya E.A. Sinopticheskiye protsessy i yavleniya pogody Nizhnego Povolzh'ya. Saratov, SSU publ., 1986, 208 p. [in Russ.].
14. Polyanskaya E.A., Morozova S.V., Puzhlyakova G.A., Fetisova N.A. Fiziko-statisticheskii metod prognoza rezkikh kolebaniy temperatury vozdukh v techeniye mesyatsa. Saratov, SSU publ., 2002, 24 p. [in Russ.].
15. Rocheva E.V. Smirnov V.D. O tendentsiyakh i izmeneniyakh prodolzhitel'nosti «voln tepla» na territorii Rossii. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2013, vol. 25, pp. 94-114 [in Russ.].
16. Sadokov V.P., Kozel'tseva V.F., Kuznetsova N.N. Veroyatnostnyy prognost teplykh i kholodnykh zimnikh pogodnykh usloviy na territorii Belarusi. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of Hydrometcenter of Russia]*, 2011, vol. 345, pp. 144-154 [in Russ.].
17. Salikhova D.Kh. O nekotorykh kharakteristikakh voln tepla v svobodnoy atmosfere nad Tashkentom. *Trudy Sredneaziatskogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta*, 1966, vol. 25 (40), pp. 18-20 [in Russ.].
18. Sreznevskiy B.I. Volny kholoda ot Novoy Zemli do Persii, Indii i Yakutskoy oblasti. *Meteorologicheskii vestnik*, 1899, vol. 4, pp. 107-110 [in Russ.].
19. Khrabrov Yu.B. Issledovaniye kalendarnykh osobennostey pokholodaniy i potepleny v Moskve. *Trudy Tsentral'nogo instituta prognozov*, 1967, vol. 150, 158 p. [in Russ.].
20. Khromov S.P. Meteorologicheskii slovar. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1974, 568 p. [in Russ.].
21. CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team (ET) on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Available at: <http://etccdi.pacificclimate.org>.
22. Changnon S.A., Kunkel K.E., Reinke B.C. Impacts and responses to the 1995 heat wave. A call to action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 177, pp.1497-1506.
23. Robimson P.J. Definition of a Heat Wave. *J. Appl. Meteorol.*, 2000, vol. 40, pp. 262-775.

Поступила 23.03.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 23.03.2023; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-93-113>

УДК 551.515.3

Анализ синоптических процессов возникновения смерчей в Курской области и близлежащих районах

Г.В. Санникова

*Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды, г. Курск, Россия
gasannik@mail.ru*

Рассмотрены случаи возникновения смерчей в Курской области и близлежащих районах Белгородской, Орловской областей и Сумской области Украины в 2003 и в 2019–2022 гг. Проанализированы условия возникновения рассматриваемого опасного явления на основе данных приземных, аэрологических и спутниковых наблюдений. Выделены случаи мезоциклонных смерчей, вызвавших наиболее разрушительные последствия и гибель людей. Систематизированы параметры облачности, типы воздушных масс и варианты синоптической ситуации, сопутствующие смерчам. Показана необходимость использования данных численных мезомодельных расчетов для распознавания смерча с помощью ДМРЛ-С.

Ключевые слова: смерч, суперячейка, Черноземье, Курская область, ДМРЛ-С

Analysis of the synoptic processes leading to the occurrence of tornadoes in the Kursk region and nearby areas

G.V. Sannikova

*Central Chernozem Administration for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring, Kursk, Russia
gasannik@mail.ru*

The cases of tornado occurrence in the Kursk region and the nearest areas of the Belgorod and Orel regions in 2003 and 2019–2022 are considered. The conditions for the occurrence of the analyzed severe weather event are analyzed on the basis of surface, aerological, and satellite observations. The cases of mesocyclone tornadoes that led to the most devastating consequences, including death of people, are identified. The cloudiness parameters, air mass types, and variants of synoptic conditions accompanying tornadoes are systematized. The necessity of using the data of numerical simulations with mesoscale models for tornado detection using DMRL-C radars is demonstrated.

Keywords: tornado, supercell, Chernozem region, Kursk region, DMRL-C

Введение

Смерчем (тромбом или торнадо) называют вихрь с вертикальной осью вращения, диаметр которого обычно составляет от нескольких десятков

до сотен метров. По косвенным оценкам, максимальные скорости ветра в смерче могут превышать 100 м/с и достигать 200–300 м/с [7, 11].

Одной из причин роста общего числа конвективных явлений рассматривается быстрое повышение приповерхностной температуры [10], а вместе с ней и влагосодержания атмосферы. За последние 30 лет среднегодовая температура повысилась на 1,3 °C ($N_{1961-1990\text{гг.}} = 5,7$ °C, $N_{1991-2020\text{гг.}} = 7,0$ °C).

По обобщенным данным наблюдений, в советский период наибольшее число смерчей в России наблюдалось в Центрально-Черноземном и Центральном районах, а также у побережья Черного моря. Вероятность смерчей на единицу площади в Центрально-Черноземном районе наибольшая – 0,16/1000 км² [8]. В период 2009–2018 гг. в Центральном федеральном округе также наибольшая плотность смерчей – 3,8 за 10 лет на 10000 км² [11].

От года к году из-за особенностей циркуляции число смерчей может заметно меняться, однако главная причина увеличения их количества состоит в большем интересе общества к этому стихийному явлению. Стоит отметить, что наблюдательными подразделениями Росгидромета за последние 20 лет на территории деятельности Центрально-Черноземного УГМС (далее – УГМС) ни разу не фиксировались смерчи, но их возникновение отмечалось сторонними наблюдателями (благодаря доступности фото- и видеосъемки и наличию Интернета) и подтверждалось результатами обследований территории.

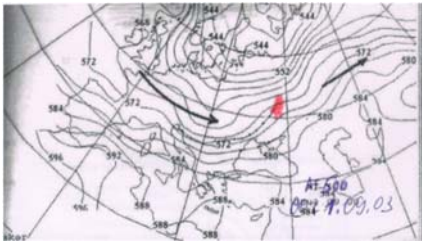
Учитывая, что Черноземье относится к территории с небольшим уровнем лесистости (по данным Большой российской энциклопедии 2004–2017 гг., леса занимают 7,9 % территории, с неравномерным распространением от 1,5–3,5 % на юго-востоке до 17–20 % на северо-западе), оценивать вероятность прохождения смерча по спутниковым снимкам ветровалов не представляется возможным, и тем актуальней становится возможность маршрутных обследований, проводимых после случаев возникновения таких явлений для подтверждения факта данного события. С установкой 20 октября 2015 г. в Курске в рамках программы модернизации Росгидромета доплеровского метеорологического радиолокатора (далее ДМРЛ-С), появилась возможность более тщательно отслеживать параметры облачности, сопутствующие опасным конвективным явлениям, в том числе смерчам.

Целью данного исследования является детальное рассмотрение и анализ условий возникновения торнадо в 2003 и 2019–2022 гг. в Курской области и близлежащих районах Белгородской и Орловской областей, а также в Сумской области Украины, и попытка систематизировать параметры облачности, сопутствующие смерчам, по данным ДМРЛ-С Курск.

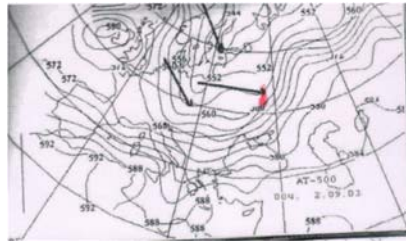
**Анализ случаев наиболее разрушительных смерчей,
отмеченных в Курской области 1 сентября 2003 года (15–16 ч ВСВ)
и 18 сентября 2022 года (15–17 ч ВСВ)**

Синоптические условия

При исследовании синоптических условий, приведших к формированию самых разрушительных смерчей в Курской области и близлежащих районах, выяснилось, что они были практически идентичны. На картах барической топографии и приземного давления за 1.09.2003 и 18.09.2022 видно (рис. 1, 2), что в обоих случаях в средней тропосфере над Центральной Европой располагается обширная высотная ложбина с осью, проходящей через Польшу и запад Балканского полуострова, над Черноземьем – ВФЗ, огибающая эту ложбину (изогипса, близкая к осевой).



АТ-500 за 00 ч 01.09.2003



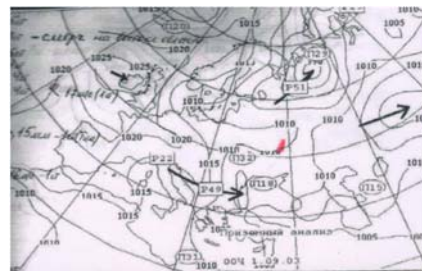
АТ-500 за 00 ч 02.09.2003



АТ-850 за 00 ч 01.09.2003



АТ-850 за 00 ч 02.09.2003



Приземный анализ за 00 ч 01.09.2003



Приземный анализ за 00 ч 02.09.2003

Рис. 1. Карты барической топографии и приземного давления за 00 ч 01.09.2003, 00 ч 02.09.2003.

Fig. 1. Maps of baric topography and surface pressure at 00 UTS 01.09.2003, 00 UTS 02.09.2003.

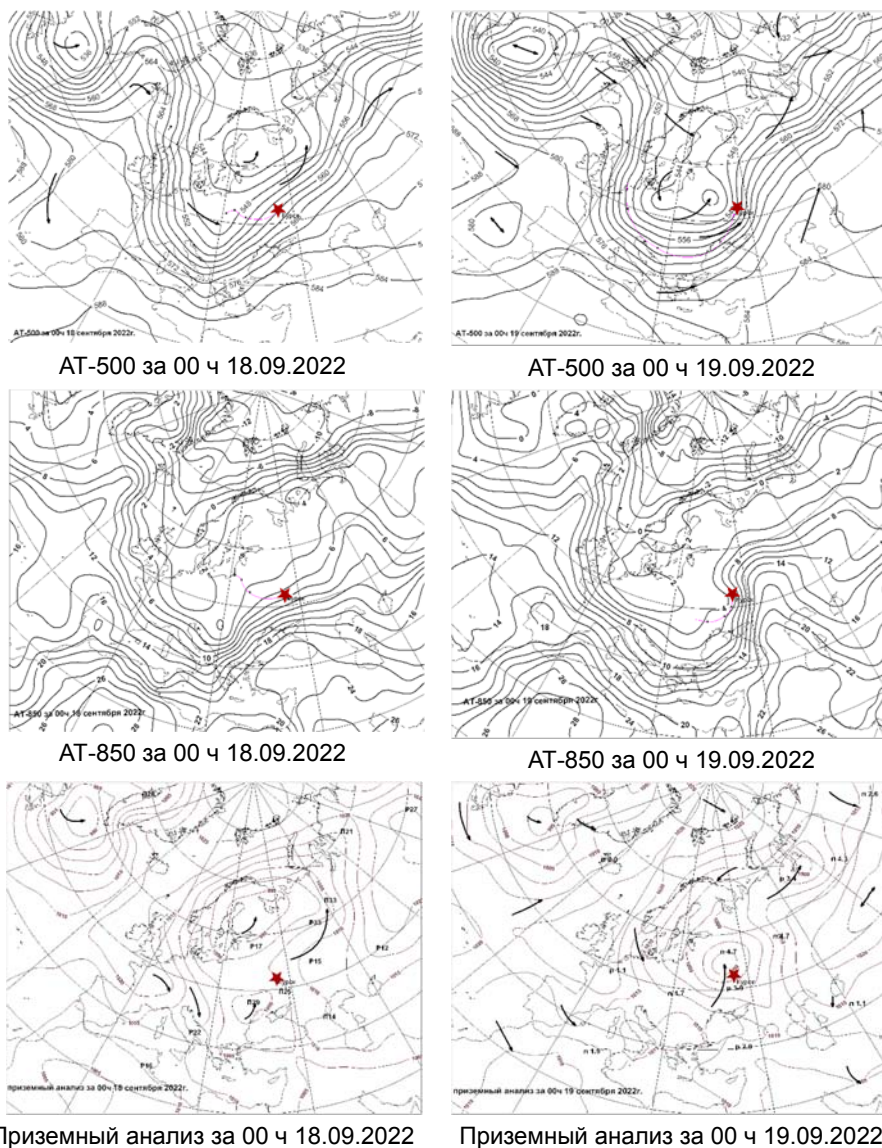


Рис. 2. Карты барической топографии и приземного давления за 00 ч 18.09.2022, 00 ч 19.09.2022.

Fig. 2. Maps of baric topography and surface pressure at 00 UTS 18.09.2022, 19.09.2022.

Ось ложбины на АТ-500 в течение суток смещается на восток и к 00 ч следующих суток располагается над центральными (02.09.2003) или западными (19.09.2022) районами УГМС, оставляя регион на циклонической периферии ВФЗ, причем в последнем случае в ложбине над югом Белоруссии – северо-востоком Украины изолируется маломасштабный

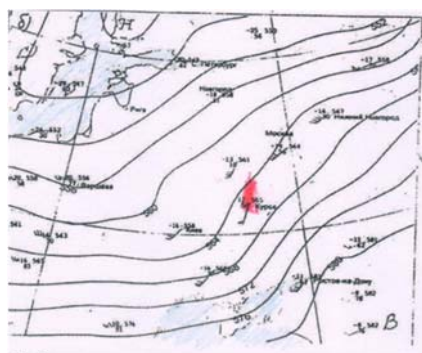
циклонический вихрь. В нижней тропосфере в это же время увеличивается градиент температуры, изотермы на АТ-850 приобретают более меридиональное направление. На восток Черноземья активно выносятся тепло ($13-17^{\circ}$), на центральные районы Украины и юго-запад ЦФО распространяется холодная воздушная масса ($4-5^{\circ}$). У поверхности земли в 00 ч 01.09.2003 и 00 ч 18.09.2022 в области депрессии, очерчиваемой одной изобарой, расположенной над Молдавией и западом Черного моря, углубляется активный черноморский циклон, выходящий в 00 ч 02.09.2003 на северо-восток, в 00 ч 19.09.2022 – на северо-запад УГМС.

Днем 01.09.2003 и 18.09.2022, в период максимального развития конвекции, на АТ-500 над УГМС наблюдаются юго-юго-западные ветры до 25–28 м/с, в нижней тропосфере (АТ-850) в передней части циклонического вихря, образовавшегося над Черниговской и Киевской областями, над центральными районами Украины и юго-западом Черноземья градиент температуры составляет $13-18^{\circ}/1000$ км, у земли на волнах холодного фронта формируются молодые циклоны (рис. 3).

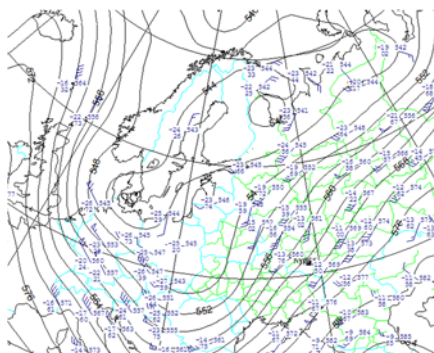
По данным зондирования, воздушная масса в обоих случаях имеет общие признаки: юго-восточный и юго-юго-восточный ветер в нижнем слое тропосферы (на АТ-850 или АТ-925), юго-западный ветер на вышележащих слоях, усиление ветра с высотой с 5–15 м/с на АТ-850 и АТ-925 до 25–29 м/с на АТ-500, что способствует наклону растущего облака и наложению горизонтальной завихренности на конвективное движение вверх [9]. При этом неустойчивость в атмосфере в конкретное время выпуска радиозонда – в 12 ч 01.09.2003 (рис. 4), 12 ч 18.09.2022 (рис. 5) – незначительна, вертикальный градиент температуры в слое земля – 700 гПа составляет $0,47^{\circ}/100$ м, что немного превышает влажноадиабатический градиент ($0,44^{\circ}/100$ м при температуре 20° [4]). Температура у земли не превышает $18-20^{\circ}$, при этом в слое 0–3 км средняя температура очень высокая – $10-12^{\circ}$.

Распределение влажности с высотой отличается в рассматриваемых случаях. Это объясняется тем, что в 12 ч 01.09.2003 точка зондирования (АЭ Курск) оказалась непосредственно на линии фронта, а в 12 ч 18.09.2022 – между линиями фронта в двойной системе в теплом секторе полярного фронта.

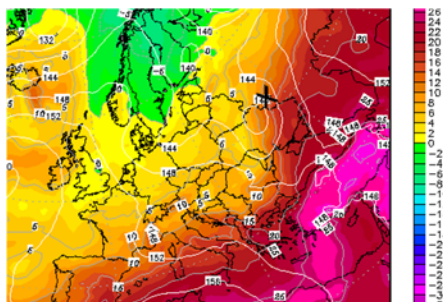
По графику Решетова [4] для альтернативного прогноза шквала (по фактическому радиозонду) днем 01.09.2003 шквал был вероятен с максимально возможной скоростью до 32 м/с, днем 18.09.2022 – шквал не ожидался, так как кривая стратификации и кривая состояния практически совпадали (сумма отклонений кривой стратификации от кривой состояния всего $1,8^{\circ}$), что в графике для альтернативного прогноза шквала определялось "без шквала". Но по методу Пескова – Снитковского [4], заложенному в компоненте "прогностический зонд" ПО Гисметео и рассчитанному от 00 ч 18.09.2022 с заблаговременностью 12 часов, в Курске прогнозировался шквал 34 м/с.



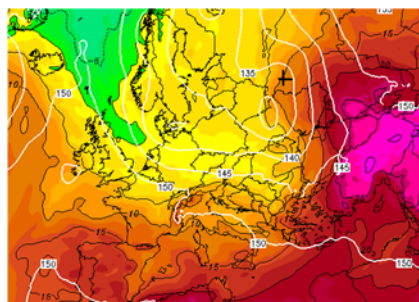
AT-500 за 12 ч 01.09.2003



AT-500 за 12 ч 18.09.2022



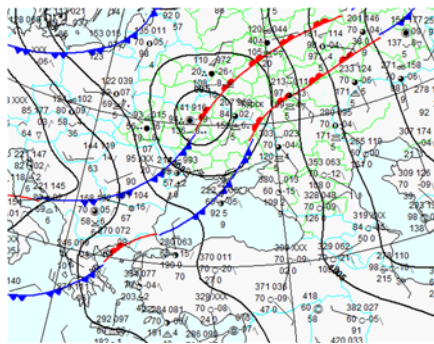
AT-850 за 12 ч 01.09.2003



AT-850 за 12 ч 18.09.2022



Приземный анализ за 12 ч 01.09.2003



Приземный анализ за 12 ч 18.09.2022

Рис. 3. Карты барической топографии и приземного давления за 12 ч 01.09.2003, 12 ч 18.09.2022.

Fig. 3. Maps of baric topography and surface pressure at 12 UTS 01.09.2003, 12 UTS 18.09.2022.

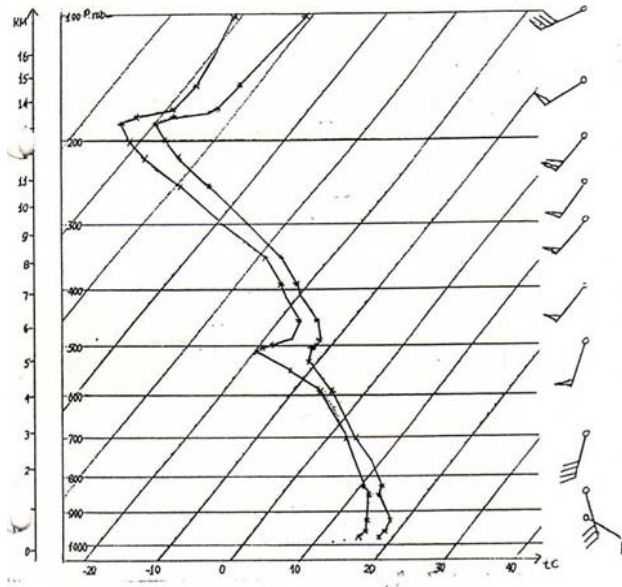


Рис. 4. Вертикальный профиль атмосферы в районе МС Курск в 12 ч 01.09.2003.

Fig. 4. Vertical profiles of the atmosphere in the area of MS Kursk at 12 UTS 01.09.2003.

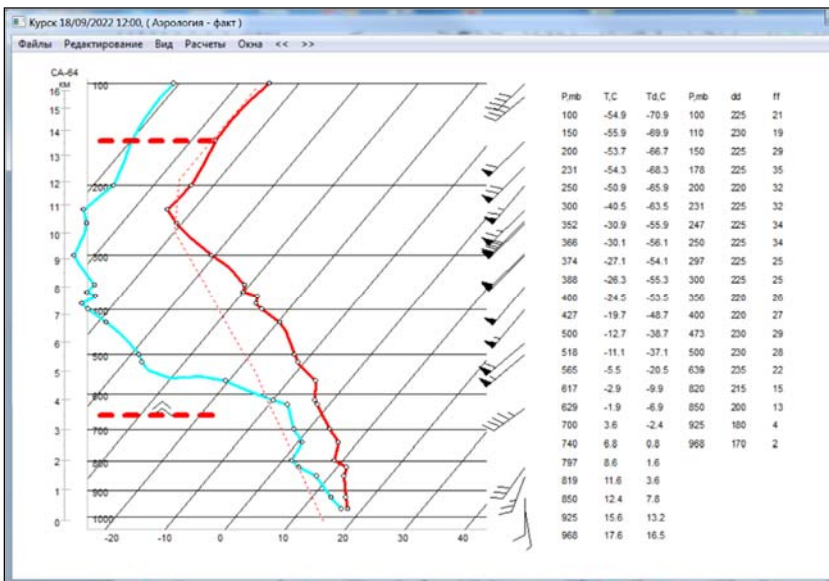


Рис. 5. Вертикальный профиль атмосферы в районе МС Курск в 12 ч 18.09.2022.

Fig. 5. Vertical profiles of the atmosphere in the area of MS Kursk at 12 UTS 18.09.2022.

Небольшая разница в траекториях смещения южного циклона обусловила траекторию смещения смерчей по востоку или по западной половине области (рис. 6а, б).

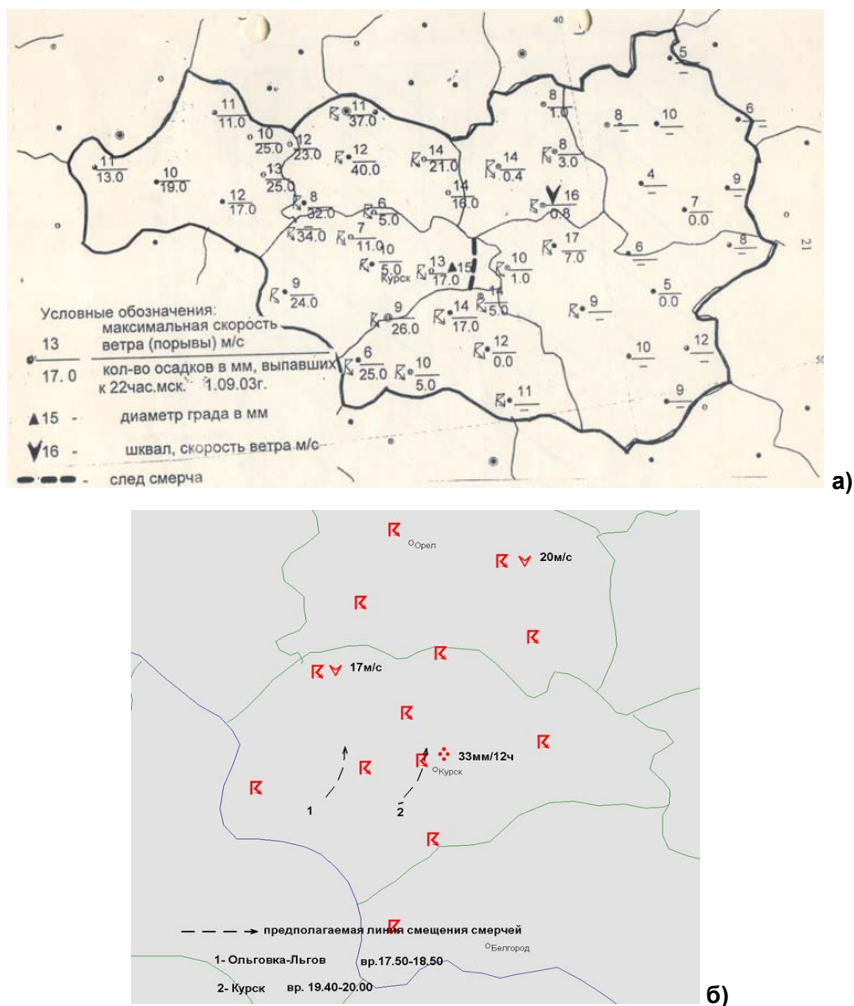


Рис. 6. Траектория смерча 01.09.2003 (а), 18.09.2022 (б).

Fig. 6. Tornadoes trajectory 01.09.2003 (a), 18.09.2022 (б).

Фактические данные и последствия

Рассмотрим случаи возникновения смерчей, которые привели к значительным разрушениям и человеческим жертвам.

01.09.2003 по базе данных ESWD отмечались три случая смерча: один – в Белгородской области (Кочетовка), два – в Курской области (Мантурово и Касторное). Итенсивность первых двух по шкале Фудзиты (Fujita)

оценивалась как F1, последнего – как F3 (ущерб от него составил 170 млн рублей, жертвами стихии стали четыре человека).

18.09.2022 на юго-западе России и северо-востоке Украины наблюдалась "вспышка смерчей", которые можно объединить в "семейства торнадо" [11]. Разница по времени между ними составляла около 1 часа: 13.30–13.50 ч ВСВ в Сумской области (Шурово и Бурын, F1 и F3) – база данных ESWD, 14.50–15.40 ч ВСВ на западе Курской области (Ольговка и Льгов, F1 и F2), 16.40–17.00 ч ВСВ в центре Курской области (Курск, F1). В Сумской области погиб человек, в Курской области были повреждены более 200 зданий, в том числе социально значимых объектов, 17 жилых домов практически полностью разрушены, повреждены 40 автомобилей, погибли два человека, в 10 районах области было нарушено электроснабжение, в том числе из-за падения высоковольтных ЛЭП (рис. 7).



Рис. 7. Смерч (д. Ольговка) 14.50–15.10 ч ВСВ 18.09.2022.

Fig. 7. Tornado (v. Olgovka) 14.50–15.10 UTS 18.09.2022.

Если в Сумской области Украины и в западных районах Курской области смерч прошел в конце светового дня и в сумерках, что визуально позволило определить явление однозначно, то через Курск смерч проходил уже с наступлением темноты (заход Солнца в 15.44 ч ВСВ, наступление темноты в 16.24 ч ВСВ), что не позволило сделать качественное фото. На имеющихся видео во вспышках молний хорошо видны предметы, несущиеся в воздушном вихре, и актом обследования было подтверждено прохождение смерча.

Из Акта обследования №2 от 19.09.2022: «Координаты: 51,67° с. ш.; 36,08° в. д.; время начала обследования 11.50 ч ВСВ; радиус обследования 1 км. Тип местности – равнина, непосредственно прилегающая к низкой, пойменной долине р. Сейм. Абсолютная высота 165–168 м. Застройка городского района неоднородная, смешанная (комбинированная): парковая зона, многоэтажные и малоэтажные здания, между ними улицы различной ширины, небольшие площади и общественные территории. Зона повреждений расположена в основном между проспектом Ленинского Комсомола и улицей Присеймской. Имеются повреждения крыш зданий, ограждений, множество сломанных и вывороченных с корнем деревьев, разбитых машин. Все признаки указывают на прохождение смерча. В условиях городской застройки его диаметр определить невозможно» [2].

По свидетельству очевидцев, львовский смерч сформировался в южной части города (район Автоколонны), примыкающей к привокзальному району, затем, пройдя через пойму р. Сейм, усилился. В Пригородной Слободке г. Львова смерч достиг наибольшей интенсивности F2, был отмечен случай с коровой, унесенной торнадо, которую впоследствии так и не нашли, на фотографиях из Львовского района видны легковые машины, брошенные на рельсы на значительном расстоянии от автодороги, некоторые частные жилые дома практически полностью разрушены. Время прохождения смерча через Пригородную Слободку (Льгов) известно точно – 15.36 ч ВСВ (время падения опоры ЛЭП, зафиксированное филиалом ПАО «ФСК ЕЭС» Черноземное предприятие магистральных электрических сетей). Окончательная оценка ущерба, причиненного объектам инфраструктуры, жилым домам и объектам социального назначения, была подготовлена только в марте 2023 года.

Данные ИСЗ и параметры облачности по ДМРЛ-С Курск

На ИК-снимках линии холодного фронта, с которыми были связаны смерчи, с характерной облачностью Сb округлой формы, во всех случаях выглядят практически идентично (рис. 8).

Смерчи, отмеченные в Курской области 18.09.2022, были изучены более тщательно благодаря данным ДМРЛ-С и возможностям современных средств привязки к определенному району. Смерчеобразующие облака, прошедшие в тот же день по Сумской области Украины (координаты торнадо из базы данных ESWD), также видны на обзорах ДМРЛ-С Курск,

но только в режиме отражаемости, так как расстояние до этих районов от места установки локатора больше 200 км, что не позволило отследить некоторые параметры воздушной среды.



а) 14.52 ч 01.09.2003



б) 15.00 ч 18.09.2022



в) 17.00ч 18.09.2022

Рис. 8. ИК-снимок NOAA: смерч в Касторенском районе в 14.52 ч ВСВ 01.09.2003 (а); ИК-снимок Meteosat смерч в Львовском и Кореневском районах в 15.00 ч ВСВ 18.09.2022 (б); смерч в Курске в 17.00 ч ВСВ 18.09.2022 (в).

Рис. 8. IR image NOAA :at 14.52 UTS 01.09.2003 (а); IR image Meteosat for 15.00 UTS 18.09.2022 (б); IR image Meteosat for 17.00 UTS 18.09.2022 (в).

В 13.30 в районе Шурово, в 13.40 в районе Бурыни отмечались МКК с явлением "шквал слабый", с высотой Нвго 13,3–14,7 км, максимальной отражаемостью $Z_{\max}$ 61 dBz и максимальными обнаруженными неоднородностями доплеровской скорости на высоте 4–5 км $-23/+17$ м/с и $-25/+19,5$ м/с, что, учитывая значительно больший объем воздуха для осреднения на таком расстоянии (от ДМРЛ-С), можно оценить как очень интенсивный разнонаправленный поток [6]. При развитии конвекции над Курской областью (на меньшем удалении от локатора с возможностью просмотра изображений в режиме "скорость") на обзорах ДМРЛ-С диагностировались

только грозы и град умеренный, но горизонтальный ветер в соседних узлах сетки при прохождении д. Ольговка имеет встречное направление и скорость 35–65 м/с. По базе данных ESWD в Льгове отмечался уже другой смерч, что согласуется с данными лоатора, так как по последовательным 10-минутным обзорам и вертикальным разрезам постоянно идет рост и размывание Сб, смещающихся друг за другом (рис. 9а), – вертикальный разрез за 15.30 ч ВСВ 18.09.2022, сделанный по ходу движения МКС (мезомасштабной конвективной системы).

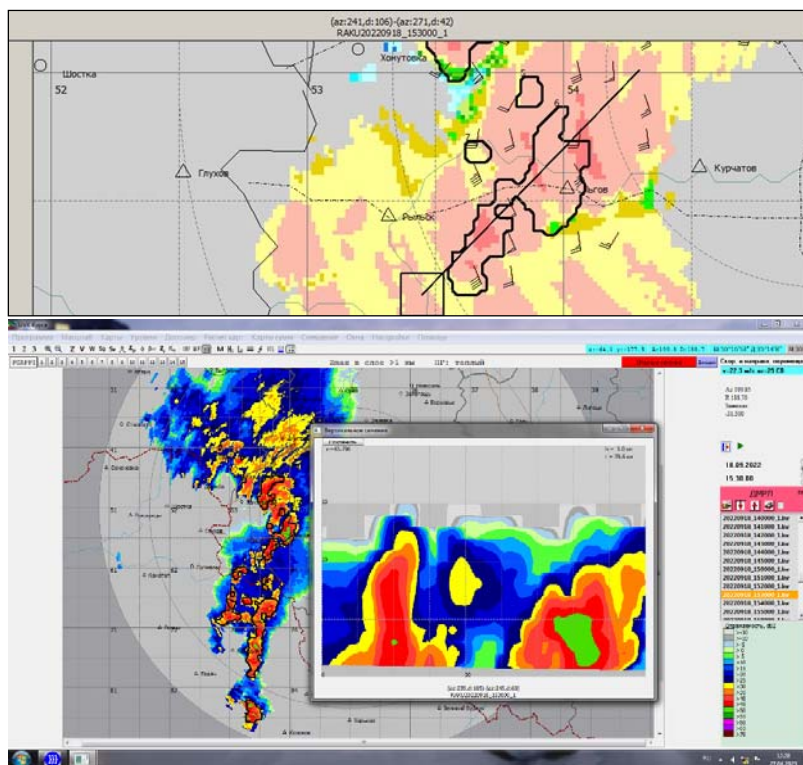


Рис. 9. Вертикальный разрез за 15.30 ч ВСВ 18.09.2022, проведенный по направлению ведущего потока (смерч в Льгове).

Fig. 9. Vertical section for 15:30 UTC 18.09.2022, taken in the direction of the leading stream (tornado in Lgov).

В 15.30 ч ВСВ вблизи Льгова отмечались множественные очаги со значительной горизонтальной неоднородностью скоростей (до $-17/+28$ м/с) на высотах от 1 до 5 км, в 16.50 ч ВСВ на юго-западе Курска – до $-23,5/+26$ м/с. В Ольговке верхняя граница Сб была 13.0–13.2 км, в Льгове в период с 15.30 до 15.40 ч ВСВ увеличилась на 2.3 км: с 14.1 до 16.4 км.

В Курске (юго-запад города) смерч был отмечен в 16.50–17.00 ч ВСВ и сформирован он был другой облачной системой. Но также, как и во Льгове,

локатором определялся только умеренный град с грозой. В целом, параметры облачности не достигали значений, принятых за критерий распознавания смерча в ПО Гимет-2010 [6].

Анализ синоптических условий возникновения смерчей в Курской области и ближайших районах Черноземья

Помимо уже рассмотренных случаев, в период 2019–2022 гг. в Черноземье отмечались локальные смерчи, не приведшие к катастрофическим последствиям, но с вероятной скоростью в "стенках" смерчевой воронки более 30 м/с. Частота их появления сопоставима с частотой случаев очень сильного ветра ≥ 25 м/с (ОЯ) в регионе УГМС (табл. 1), что требует разработки алгоритма их прогнозирования.

Таблица 1. Частота появления случаев ОЯ "очень сильный ветер (≥ 25 м/с), в т. ч. шквал" и смерчей на территории деятельности Центрально-Черноземного УГМС

Table 1. Distribution of weather phenomenon "very strong wind" (≥ 25 m/s) and tornado in the Central Chernozem region

	2019	2020	2021	2022
ОЯ (≥ 25 м/с)	–	–	–	3 (25–29 м/с)
Смерч	1	2	–	2

Конечно, на частоту зафиксированных ОЯ "очень сильный ветер, в т. ч. шквал" влияет редкая сеть наблюдательных постов, в то время как для фиксации смерча достаточно фото, видеоматериалов и результатов обследования. Но обследование территории по факту предполагаемого смерча тоже производится далеко не всегда, а значит и их количество может быть занижено.

В табл. 2 представлены данные о синоптических ситуациях при возникновении смерчей в Курской, Орловской и Белгородской областях в 2003 и в 2019–2022 гг., подтвержденных обследованиями пострадавших территорий с привлечением специалистов гидрометслужбы или фото- и видеоматериалами сторонних наблюдателей, в том числе представителей МЧС.

Для смерчей, отмеченных в Курской области, в табл. 3 приведены данные о соответствии фактических синоптических условий признакам, характерным для интенсивной конвекции, в том числе при возникновении смерча [3].

Таблица 2. Синоптические ситуации при возникновении смерчей на территории деятельности Центрально-Черноземного УГМС
Table 2. Comparative characteristics of the synoptic conditions for the appearance of tornadoes in the Central Black Earth UGMS

Синоптическая ситуация	Дата / время ВСВ / район					
	1.09.2003/ 15.00-16.00/ Касторное (Ку)	9.05.2019/ 11.20-11.50/ Рыльск (Ку)	29.05.2020/ 14.20-14.40/ Верховье (Ор)	1.06.2020/ 9.50-10.00/ Белгород (Бе)	15.07.2022/ 13.20/ Коньшевский р-он (Ку)	18.09.22/ 14.50-17.00/ Льгов (Ку)
Барическое поле АТ-500, V500гПа, м/с	ВФЗ, передняя часть обширной ложбины, юго-западный перенос 25 м/с	ВФЗ, передняя часть обширной ложбины, юго-восточный перенос 20 м/с	ВФЗ, западная периферия высотного гребня, южный, юго-восточный перенос 20-25 м/с	в глубокой и узкой ложбине начал изолироваться высотный циклон над Киевской обл.	ВФЗ, передняя часть обширной ложбины, юго-западный перенос 20 м/с	ВФЗ, передняя часть ложбины, юго-западный перенос 28 м/с
Барическое поле АТ-850, градиент температуры °/1000км	передняя часть циклона над Черниговской, Киевской обл., 13-15°/1000км	передняя часть циклона над Германией, 14°/1000км	ложбина от циклона над Одессой, 14°/1000км	передняя часть циклона над центр. Украиной, 12-14°/1000км	передняя часть слабо выраженной ложбины в фр. зоне, 11°/1000км	передняя часть циклона над Черниговской, Киевской обл., 18°/1000км
Приземное барическое поле	волна с юга на ХФ, двойная система фронтов	молодой циклон на волне ХФ	волна с юга на ХФ, двойная система фронтов	молодой циклон на волне ХФ	Волна на холодном фронте	Молодой циклон на волне ХФ (двойная система)
Т / Тd у земли, °С	20-23 / 18-19	18 / 14-15	22-23 / 16-17	13-14 / 11	26-27 / 16	20-21 / 17
Сопутствующие явления	грозы, дождь 17-26 мм/12ч, град 15мм (Тим)	грозы, дождь 14мм/12ч	грозы, дождь 12-27 мм/12ч, шквал 18м/с, град 22мм	грозы, дождь 12 мм/12ч, шквал 18м/с, град 12мм	грозы, дождь 9-12 мм/12ч, ветер 17м/с	грозы, дождь 26-33 мм/12ч, шквал 17-20м/с (20 - Орл. обл.)

Таблица 3. Соответствие фактических синоптических условий признакам, характерным для интенсивной конвекции, в том числе при возникновении смерчей в Курской области
Table 3. The presence of signs accompanying the formation of a tornado during the actual appearance of a tornado in the Kursk region

Синоптические признаки (наличие)	1.09.2003	9.05.2019	15.07.2022	18.09.2022
Динамический фактор (в волновых возмущениях, циклонах, на фронтах и на разделах воздушных масс с различной влажностью)	Волна на ХФ (двойная система)	Молодой циклон на волне ХФ	Волна на ХФ	Молодой циклон на волне ХФ (двойная система)
Большая конв. неустойчивость в атмосфере с верт. градиент. темпер. значительно больше вл. адиабатических	0,47°/100м	0,6°/100м	0,7°/100м	0,47°/100м
Сильные, с большим верт. сдвигом юз ветры в средней и верхн. тропосфере (наличие мощного СТ) и существование в погр. слое атмосферы СТ нижних уровней, имеющего юв или ю напр.	На Н > 5 км Vюз=25-30 м/с СТ на Н=12,5 км (V=30м/с) На Н=0,5-2 км Vюв=10-15 м/с	На Н > 5 км Vюв=20- 25 м/с СТ на Н=11,5 км (V=25м/с) На Н=1,0-1,5 км Vюв=17 м/с	На Н > 7,5 км Vюз ≥ 30 м/с На Н=0,5-2 км Vюз=8- 10 м/с	На Н > 5 км Vюз=25-35 м/с СТ на Н=10,5-14 км (V>30м/с) на Н=0,5-2 км Vюв,ю=5-15м/с
Подток с ю и юв влажного воздуха в слое земля-1000 м и сухого воздуха с юз в средней тропосфере	Дефицит т.р. в слое ΔТземля-850мб=1-4° ΔТ600-300мб=1,5-8°	Дефицит т.р. ΔТземля-850мб=0,7- 6° ΔТ500-300мб=7-9°	Дефицит т.р. ΔТземля-850мб=6-11° ΔТ500-300мб=8-11°	Дефицит т.р. ΔТземля-925мб=1,1- 2,4° ΔТ500-300мб=23-30°
Наличие задерживающего слоя выше погр. слоя, вследствие чего образование мощных Сб происходит взрывным образом	На Н=1,5км задерж. слой с верт. гр. т-ры 0,2°/100м< ВА На Н=5,5км слой с изотермией	На Н=3,5км задерж. слой с инверсией - 0,1°/100м	На Н=5,5км задерж. слой с инверсией - 1,0°/100м	На Н=1,5-2км задерживающие слои с верт. гр. т-ры 0,3°/100м< ВА.

Во всех случаях отмечено наличие следующих параметров: 1) динамического фактора, обеспечивающего подъем теплого и влажного воздуха нижней тропосферы вверх, что имеет место в волновых возмущениях, циклонах, на фронтах и на разделах воздушных масс с различной влажностью; 2) задерживающего слоя выше пограничного слоя, вследствие чего образование мощных кучево-дождевых облаков происходит взрывным образом.

В реальных условиях это неполное соответствие параметров может быть связано с редкостью аэрологических наблюдений на фоне быстрого смещения смерчеобразующих облаков, из-за чего для анализа условий приходится совмещать приземные и высотные данные за разные сроки наблюдений, что является некорректным.

Более объективными для сравнения параметров облачности являются данные ДМРЛ-С Курск. В табл. 4 представлены характеристики Сб во время прохождения смерчей. Необходимо отметить, что детализированный анализ данных в оперативном режиме проводить проблематично из-за большой неоднородности облачных полей и хаотичности распределения ячеек (пикселей) с разнонаправленными величинами, а также частого появления подобных конвективных ячеек на обзорах ДМРЛ-С Курск.

Из общего ряда случаев торнадо, отмеченных в Курской области, по синоптической ситуации и характеру повреждений выбивается смерч, прошедший 15.07.2022 в Коньшевском районе, который не занесен в базу данных ESWD. В данном случае перенос воздушных масс в средней тропосфере был близок к зональному (в передней части ложбины), а также отмечалась самая высокая из рассмотренных случаев температура приземного воздуха ($26\text{--}27^\circ$) и минимальный градиент температуры в нижней тропосфере ($11^\circ/1000\text{ км}$). В связи с падением опоры ЛЭП 750 кВ в 13.20 ч ВСВ 15.07.2022, 18.07.2022 было организовано маршрутное обследование данного района и выявлены признаки прохождения смерча [1]. Из Акта №1 маршрутного обследования района распространения опасного явления от 18.07.2022 г. в Коньшевском районе Курской области: «Координаты $51,57^\circ$ с. ш.; $36,02^\circ$ в. д.; время начала обследования 12.40 ч.; радиус обследования 3 км. Тип местности – слабохолмистая равнина, поля, перемежающиеся лесопосадками шириной 10–30 м из деревьев смешанных пород. Сплошная полоса повреждений, характерная для шквалов, на поверхности земли не наблюдается. Повреждения имеют очаговый характер, что указывает на прохождение смерча. Очаги касания смерча земной поверхности с шагом около 200 м четко прослеживаются и имеют закругленные, частично срезанные контуры. Их радиус можно определить только ориентировочно как 20–30 м в связи с прохождением интенсивных осадков и ветровых нагрузок до и после прохождения смерча. На полях зерновые культуры внутри очагов уложены по спирали у центра и хаотично по краям. В лесопосадках деревья выворочены с корнем, с высоты 12–15 м стволы срезаны и уложены от центра очага.

Таблица 4. Радиолокационные параметры для случаев смерчей в радиусе действия ДМРЛ-С Курск
Table 4. Comparative characteristics of DMRL parameters for cases of noted tornadoes within the range of DMRL-S Kursk for the period 2019-2022

Радиолокационные параметры	Дата / время ВСВ / район					
	9.05.2019 11.20-11.50 Рыльск (Ку)	29.05.2020 14.20-14.40 Верховье (Ор)	1.06.2020 9.50-10.00 Белгород	15.07.2022 13.20 Коньшевский р-он (Ку)	18.09.2022 14.50-15.40 Ольг-Льгов (Ку)	18.09.2022 16.40-17.00 Курск
Zмакс dBz	50-52.5	65-67	53.5	54-57	52-57	54
Zдиффер	4,4	>5	4,7	>6	5,3	5
Нвго км	11,7	14-15,3	13-15	11-14	13-16,4	13-14
ΔH (над обл) км	5	2-3	3-5	2	1-1,5	1-1,5
dH/dt км/10мин	3,3	5,4	10?	3,2	2,3	-
$-V/+V$ м/с на выс. 1-5км	-22,5/10,5	-16,5/23	-22,5/9,5	-10/22,5 обособлен	-16/28,5	-17/15,5
Vгор на выс. 1-5км	15-65м/с	22-27м/с	12м/с	17-65м/с	25-65м/с	15-20м/с
Общая Vсмещ.	14-15 м/с	15-16м/с	12м/с	21м/с	21-22м/с	24-25м/с
Диагн. явл.	Гроза>90%	Шкв ум	Град ум	Град ум	Град ум	Град ум

Примечание. Zмакс – максимальная отражаемость; Zдиффер – дифференциальная отражаемость; Нвго – высота верхней границы облачности; ΔH (над обл.) – превышение вершины Св над окружающим основным массивом; dH/dt км/10 мин – прирост высоты облачности, отмеченный за короткий промежуток времени; $-V/+V$ м/с на выс. 1-5 км – максимальные обнаруженные неоднородности доплеровской скорости в соседних пикселях в районе прохождения смерча на высотах 1-5 км; Vгор на выс. 1-5 км – скорость горизонтального ветра в районе прохождения смерча на высотах 1-5 км; общ Vсмещ. – скорость фактического смещения облачных полей; Диагн. явл. – явления, расшифрованные ПО Гимет-2010 во время прохождения смерча.

Опора ЛЭП сорвана с оттяжек, лежит на земле, ее металлические конструкции имеют характерные спиралеобразные деформации. В радиусе 20 м от ее основания имеются повреждения зерновых культур от центра к краям очага». Упавшая опора ЛЭП №83 ВЛ-750 кВ по нормативам должна выдерживать ветер до 30 м/с, что говорит об усилении ветра больше этого значения. Кроме того, из-за выкорчеванного с корнями старого дуба было частично разрушено деревенское кладбище, расположенное в 1 км от опоры.

На обзоре локатора с доплеровской скоростью за 13.20 ч ВСВ 15.07.2022 видно множество ячеек, потенциально способных создать необходимую завихренность. Судя по данным обследования, в этом случае имел место "прыгающий торнадо" [11], когда "хобот", опускающийся из материнского облака, лишь на короткое время (практически одномоментно) достигал поверхности земли.

Помимо смерчей, оставивших следы на поверхности земли (сплошной полосой или отдельными очагами касания, как в случае 15.07.2022), в Курской области в теплый период 2022 г. метеорологами-любителями были запечатлены смерчевые воронки, спускающиеся из Сб, но не достигшие земли (3.07.2022 и 21.09.2022).

Весь набор информации, собранный в отделе метеопрогнозов ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» за последние 5 лет, позволяет предположить, что смерчи (или торнадо) образуются в средней полосе России гораздо чаще, чем отражено в действующем Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды (1986 г.) [7]. В большинстве случаев они или не получают должного развития, так и оставаясь всего лишь "зародышами" торнадо, или их образованию не предшествует формирование мезоциклона [14], из-за чего разрушения прослеживаются на очень ограниченной территории и не всегда попадают в поле зрения официальных структур (немезоциклонные торнадо [15]). Но периодически (в Курской области примерно 1 раз в 20 лет) при максимальном наложении благоприятных факторов, описанных в первой части статьи, в том числе при образовании мезоциклона, торнадо может нанести огромный ущерб населению и экономике региона.

Выводы

Смерчи в Курской области могут отмечаться при довольно разнообразных синоптических ситуациях, общих для большинства опасных конвективных явлений, но наиболее разрушительными они бывают при вполне определенных условиях, аналогичных случаям 01.09.2003 и 18.09.2022 и соответствующих 1 и 2 типу (по Снитковскому) [8]. Для возникновения смерча, по мнению автора, необязателен значительный прогрев приземного слоя воздуха. Более весомый вклад в формирование смерча вносит распределение скорости и направления ветра по высоте, создающее условия для завихренности [5, 13]. В Рыльске, Льгове и Курске смерчи усиливались после прохождения через пойму р. Сейм, но

в Конышевском и Касторенском районах вблизи следов прохождения смерча значительных водных объектов нет, поэтому их наличие не является определяющим фактором.

Существующее ПО Гимет-2010 ДМРЛ-С не обеспечивает корректную диагностику смерчей, возможно, из-за довольно грубого осреднения по анализируемым объемам или из-за меньших значений параметров облачности по сравнению с США, где торнадо изучают уже много лет и чьи данные в основном используются. Но понятно, что просто снизить пороговые значения параметров облачности – не выход, так как это приведет к большому числу "ложных тревог". Общий признак во всех изученных случаях – резкий рост высоты облачности в момент, близкий ко времени формирования торнадо (до 2.3–5.4 (10) км за 10–20 мин), и который, возможно, стоит включить в алгоритм их распознавания. Наблюдаемое увеличение высоты облака на 10 км за 10 мин 01.06.2020 в Белгородском районе мы посчитали программной ошибкой, но это не отменяет самого факта "взрывного" роста Сб.

По мнению автора, необходимо в программном обеспечении диагноза "вторичных" продуктов ДМРЛ-С "встраивать" данные численной модели, при этом на реальные облачные параметры, диагностированные локатором, будут накладываться данные численной модели, рассчитывающей значимые для смерча индексы конвективной неустойчивости [12] – комплексный показатель риска развития суперячеек (Supercell Composite Parameter, SCP), индекс обнаружения суперячеек (Supercell Detection Index, SDI), параметр значительного торнадо (Significant Tornado Parameter, STP) и др.

Производить расчет необходимо только при наличии определенного достигнутого критерия развития конвекции, но это должен быть критерий распознавания гроз не выше "R 30–70%", а может и ниже, так как 09.05.2019 в Рыльске визуально смерч был отмечен в срок 11.45 ч ВСВ, когда в 11.40 ч ВСВ в этом районе был отмечен только ливневый дождь. Или, наоборот, необходимость запуска дополнительного расчета определять прогностическими параметрами (CAPE, SCP, SDI, STP).

Учитывая, что на Европейской территории России (включая Курскую область) чаще всего в нашей стране отмечаются смерчи [8, 9, 11], и эта же территория сейчас наиболее полно освещается радиолокационными данными, необходимо создание базы отмеченных явлений (торнадо) для последующего обобщения и анализа. Это поможет выработать более совершенные инструменты для обнаружения смерчей, что, учитывая нежелание государственных органов переходить на вероятностный прогноз ОЯ (из-за необходимости принимать решение о порядке действий на предупреждение), представляется задачей первостепенной важности.

Список литературы

1. Акт № 1 маршрутного обследования района распространения опасного природного явления (от 18.07.2022). Курск: Центрально-Черноземное УГМС, 2022. 2 с.

2. Акт № 2 маршрутного обследования района распространения опасного природного явления (от 19.09.2022). Курск: Центрально-Черноземное УГМС, 2022. 2 с.
3. Васильев А.А., Песков Б.Е., Снитковский А.И. Смерчи, шквалы и град 8–9 июня 1984 г. // *Метеорология и гидрология*. 1985. № 8. С. 3-15.
4. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
5. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне европейской части России и Урала // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 2. С. 35-49.
6. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М.: Росгидромет, 2019. 126 с.
7. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 702 с.
8. Снитковский А.И. Смерчи на территории СССР // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 9. С. 12-25.
9. Чернокульский А.В. Смерчи в России: реальная угроза? // Троицкий вариант. Наука. 2021. № 10 (329).
10. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коришанова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 5. С. 27-41.
11. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Кюне Т. Смерчи в российских регионах // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 2. С. 17-34.
12. Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Ерошкина Н.А., Коренев Д.П., Быков А.В., Калинин Н.А., Курганский М.В., Павлюк Ю.Б., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Шквалы и смерчи на европейской территории России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 11. С. 71-90.
13. Charles A. Doswell III, Donald Burgess Tornadoes and Tornadic Storms: A Review of Conceptual Models.
14. Davies-Jones R. Tornadogenesis in Supercell Storms – what we know and what we don't know: National Severe Storms Laboratory, NOAA Norman, Oklahoma.
15. Wakimoto Roger M., Wilson James W. Non-supercell Tornadoes // *Monthly Weather Review*. 1989. Vol. 117, is. 6. P. 1113.

References

1. Акт № 1 маршрутного обследования района распространения опасного природного явления (от 18.07.2022). Kursk, Central'no-CHernozemnoe UGMS, 2022, 2 p.
2. Акт № 2 маршрутного обследования района распространения опасного природного явления (от 19.09.2022). - Kursk, FGBU «Central'no-CHernozemnoe UGMS», 2022, 2 p.
3. Vasil'ev A.A., Peskov B.E., Snitkovskiy A.I. Smerchi, shkvaly i grad 8-9 iyunya 1984 g. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1985, no. 8, pp. 3-15 [in Russ.].
4. Vorob'ev V.I. Sinopticheskaya meteorologiya [Synoptic meteorology], Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1991, 616 p. [in Russ.].
5. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Chernokul'sky A.V., Kostarev S.V., Bykov A.V. Environments of Formation of Severe Squalls and Tornadoes Causing Large-scale Windthrows in the Forest Zone of European Russia and the Ural. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2021, vol. 46, pp. 83-93. DOI: 10.3103/S1068373921020035.
6. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinoticheskoy praktike: Tret'ya redaktsiya. Moscow: Gidrometeoizdat publ., 2019, 126 p. [in Russ.].
7. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' I. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

8. Snitkovskiy A.I. Smerchi na territorii SSSR [Tornadoes on the territory of the USSR]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1987, no. 9, pp. 12-25 [in Russ.].
9. Chernokul'skiy A.V. Smerchi v Rossii: real'naya ugroza? *Troickiy variant. Nauka*, 2021, vol. 329, no. 10, pp. 6-7 [in Russ.].
10. Chernokul'skiy A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A., Korshunova N.N., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Shvets' N.V., Shikhov A.N., Yarinich Yu.I. Atmospheric Severe Convective Events in Russia: Changes Observed from Different Data. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2022, vol. 47, pp. 343-354. DOI: 10.3103/S1068373921020035.
11. Chernokul'skiy A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Shikhov A.N., Azhigov I.O., Selezneva E.V., Zakharchenko D.I., Antonescu B., Kuhne T. Tornadoes in the Russian Regions. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2021, vol. 46, no. 2, pp. 69-82. DOI: 10.3103/S1068373921020023
12. Chernokul'skiy A.V., Shikhov A.N., Azhigov I.O., Eroshkina N.A., Korenev D.P., Bykov A.V., Kalinin N.A., Kurgansky M.V., Pavlyukov Yu.B., Sprygin A.A., Yarinich Yu.I. Squalls and Tornadoes over the European Territory of Russia on May 15, 2021: Diagnosis and Modeling. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2022, vol. 47, no. 11, pp. 867-881. DOI: 10.3103/S1068373922110073
13. Charles A. Doswell III, Donald Burgess. Tornadoes and Tornadic Storms: A Review of Conceptual Models.
14. Davies-Jones R. Tornadogenesis in Supercell Storms – what we know and what we don't know: National Severe Storms Laboratory, NOAA Norman, Oklahoma.
15. Wakimoto Roger M., Wilson James W. Non-supercell Tornadoes. *Monthly Weather Review*, 1989, vol. 117, no. 6, pp. 1113.

Поступила 05.10.2022; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 05.10.2022; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-114-127>

УДК 551.501.81

Диагностика града на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования

А.А. Алексеева, В.М. Бухаров, В.М. Лосев

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
alekseeva@mecom.ru*

Приводятся результаты усовершенствования алгоритмов диагностики выпадения града на поверхность земли и его размера на основе данных сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования. Алгоритмы реализованы в рамках автоматизированной технологии, функционирующей в режиме реального времени, с представлением результатов в базе данных и в виде карт. Предусмотрена двухчасовая, относительно срока наблюдений, анимация диагностированных зон с градом. Реализован алгоритм распознавания фазового состояния осадков в облаке, что позволило уточнить диагностику града поздней весной и ранней осенью, отсеив случаи с снежной и ледяной крупой. Приведены результаты верификации о предупрежденности случаев с градом. Сделан вывод, что полученные результаты усовершенствования диагностики града по радиолокационной информации позволят уточнить на Европейской территории России данные о случаях выпадения града на поверхность земли, дополнив уже имеющиеся, по информации сети метеорологических и дистанционных наблюдений, что имеет и практическое значение для формирования более точных штормовых предупреждений об возникновении явления.

Ключевые слова: град, диагностика, фазовое состояние осадков в облаке, радиолокационные данные, сеть ДМРЛ-С, автоматизированная технология

Diagnosis of hail based on DMRL-C and numerical modeling data

A.A. Alekseeva, V.M. Bukharov, V.M. Losev

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
alekseeva@mecom.ru*

The results of improving the algorithms for diagnosing hail on the Earth surface and its size based on the DMRL-C network and numerical prediction data are presented. The algorithms are implemented as part of an automated technology that operates in real time, with the presentation of results in a database and in the form of maps. A two-hour (relative to the observation period) animation of the diagnosed hail zones is provided. An algorithm for identifying the phase state of precipitation in a cloud is implemented, which made it possible to refine the diagnosis of hail in late spring and early autumn, rejecting cases with snow and ice pellets. The results of verifying the probability of detection of hail are given. It is concluded that the results of improving hail diagnosis using radar data will make it possible to refine data on cases of hail reaching the Earth surface in the European

part of Russia, supplementing the already existing ones, according to the information of the network of meteorological and remote observations, which is also of practical importance for producing more accurate storm warnings about the occurrence of the phenomenon.

Keywords: hail, diagnostics, phase state of precipitation in a cloud, radar data, DMRL-S network, automated technology

Введение

Град приводит к большим бедствиям. В России особенно страдают от града южные районы, где и повторяемость случаев с градом, и его интенсивность выше в сравнении с другими регионами. Усилия ученых разных стран направлены на изучение градовых процессов, а также на предотвращение опасных ситуаций с градобитием. На юге нашей страны развернута служба искусственных воздействий на атмосферные процессы с целью предотвращения ущерба, особенно сельскому хозяйству. Ущерб в результате градобитий по сравнению с ущербом от других опасных явлений, даже конвективного характера, например, шквалов, носит локальный характер. Но бывают, хотя и редко, случаи выпадения крупного града, когда ущерб наносится не только сельскому хозяйству, но и инфраструктуре, получают ранения люди и животные.

До конца не решенная проблема исследования градовых процессов объясняется в том числе редкой сетью метеорологических наблюдений, да и для самого града не исключен элемент неожиданности, неравномерность распределения по площади, малая продолжительность выпадения и быстрота таяния. За рубежом более обстоятельно площади градобитий выявляются по данным страховых компаний, в России такая практика не развита. В последнее время, благодаря интернету, о таких случаях сообщают жители, нередко сопровождая сведения фото- и видеосъемками. Уже давно ученые возлагают надежду на достоверную диагностику града по данным радиолокаторов, но даже создание сети ДМРЛ-С в России пока не позволяет говорить утвердительно об этом.

Цель точной диагностики градобитий у поверхности земли пока остается не достигнутой, поэтому предлагаемые результаты исследований обладают актуальностью. Стоит также отметить, что активность публикаций по исследованию градовых процессов в настоящее время, по крайней мере в России, намного отстает от 50–60-х гг. прошлого века. Именно тогда в Высокогорном геофизическом научно-исследовательском институте была разработана модель градового облака [10, 11], а чуть позже – и серия методов прогноза [3, 9, 12–14].

Обсуждение результатов исследования

В настоящее время в рамках НИТР Росгидромета разрабатываются алгоритмы диагноза выпадения града на поверхность земли, в основу

которых положены методы, представленные в Руководстве [7], отличающиеся от алгоритмов, использующихся при оперативной работе сети ДМРЛ-С [6]. Точная радиолокационная диагностика града позволила бы иметь дополнительные к наблюдениям на метеостанциях данные о градобитиях. Более подробно с предлагаемым подходом к диагнозу града на основе данных ДМРЛ-С и численного прогнозирования можно ознакомиться в [2]. Разработанные алгоритмы реализованы в ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках автоматизированной технологии диагноза опасных и неблагоприятных конвективных явлений погоды по данным сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования, функционирующей в режиме реального времени. Возможность диагностирования выпадения града вычисляется по зависимости:

$$L = 0,004 Hm(dBZm - 18.0) - H_0 + 1,7, \quad (1)$$

где Hm – высота верхней границы облачности (км) по данным ДМРЛ-С; $dBZm$ – максимальная в «столбе» горизонтальная отражаемость (dbz); H_0 – высота изотермы 0°C (км).

Важной характеристикой выпадающего на подстилающую поверхность града является его размер, так как от него зависит возможный ущерб. Радиус града (см) в облаке рассчитывается по формуле:

$$r_0 = \frac{Wm^2 \cdot 10^4}{\gamma^2}, \quad (2)$$

где Wm – максимальная конвективная скорость, м/с; γ – коэффициент, зависящий от лобового сопротивления градины: при $5 \leq Wm < 10$ $\gamma = 1,33 \cdot 10^3 \sqrt{\text{см/с}}$, при $Wm \geq 10$ $\gamma = 2,3 \cdot 10^3 \sqrt{\text{см/с}}$.

Радиус града (см) в облаке по данным ДМРЛ-С:

$$r_0 = \frac{[1,33 (0,038 Hm (dBZm - 18) + 3,52) + 4]^2 \cdot 10^4}{\gamma^2}. \quad (3)$$

Экспериментально выяснено [10, 11], что градины диаметром 3 см и более, падая через теплую (ниже высоты нулевой изотермы) часть атмосферы, тают незначительно, т. е. при максимальной скорости конвективного потока в облаке более 30 м/с размер града можно определять непосредственно из уравнений (2) и (3). Если диаметр градин в облаке менее 3 см, то они заметно тают при падении через теплые слои атмосферы. Поэтому радиус града, выпадающего на подстилающую поверхность, зависит от высоты изотермы 0°C (H_0 , км). Согласно [3, 11, 12], уменьшение радиуса образовавшегося в облаке града за счет таяния при падении определяется соотношением:

$$r_{\text{расп}} = 0,13 H_0. \quad (4)$$

Таким образом, радиус града, выпадающего на подстилающую поверхность, можно рассчитать:

$$R_{\text{земля}} = r_0 - r_{\text{раст}}. \quad (5)$$

Исходные данные

Исследование по диагностированию града и его размера проводилось на основе базы данных сети доплеровских локаторов, созданной в ФГБУ «Гидрометцентр России», для территории ЕТР. Используется информация о горизонтальной отражаемости на 11 уровнях, высоте верхней границы облачности в узлах сетки $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Кроме того, используется прогностическая информация о высоте нулевой изотермы – прогнозы Региональной модели ФГБУ «Гидрометцентр России», интерполированные в расчетную сетку $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ с временным интервалом 10 минут, т. е. привязанные синхронно к информации сети ДМРЛ-С.

Реализация диагностирования града

Запуск технологии происходит автоматически по расписанию на ЭВМ Asoi46a. Из циркулярной базы данных DMRL считываются имеющиеся через каждые 10 минут поля горизонтальной отражаемости (R11R000P, значения на 11 уровнях, среди которых затем находится максимальное значение из всех уровней) и высоты верхней границы облачности (Z77R000P) для каждой точки. Также используются прогностические поля высоты нулевой изотермы, которые рассчитываются по Региональной модели Гидрометцентра России на ЭВМ Asoi46a оперативно 2 раза в сутки (при старте расчета в 0 ч ВСВ – для сроков диагностирования 06.00 – 17.50, при старте в 12 ч ВСВ – для сроков диагностирования 18.00 – 5.50 через каждые 10 минут) и записываются в файлы. При запуске программы диагностирования града происходит считывание данных H_0 из соответствующих сроков файлов. Затем выполняется расчет величин L . Далее по этим значениям по заданным условиям формируется массив с индексами 1 (град) или 0 (без града). В случае индекса 1 в расчетной точке вычисляется по данным ДМРЛ-С максимальная конвективная скорость [2]. Затем в зависимости от ее величины выполняется расчет радиуса града сначала в облаке, а потом на земле. По значению радиуса града у поверхности земли в каждый узел сетки заносится одно из значений индекса: 13, 14 или 15, соответствующих аналогичным цифрам кода при оперативной работе ДМРЛ-С [6] при диагностировании града. После этого полученные результаты расчета для града, выпадающего на поверхность земли, записываются в оперативную базу данных DWxx (поле G93R000P), последние цифры в имени базы (xx) указывают год (например, для 2023 г. – DW23). Диагностированный град представляется в виде карт в трех градациях интенсивности (слабый – диаметр менее 5 мм, умеренный – диаметр 5–20 мм, сильный – диаметр более 20 мм). Реализована также анимация карт диагностированного града за последние 2 часа.

Пример диагностики града в рамках технологии

Рассмотрим для примера случай градового шторма 18 июля 2022 г. По территории ЕТР перемещались активные атмосферные фронты. Наиболее ярко они проявили себя в Черноземье и Поволжье. Повсеместно отмечались грозы с сильными ливнями, которые местами сопровождал град и сильный порывистый ветер. На некоторые районы Воронежской области обрушился градовый шторм. Эпицентр разрушительного града пришелся на поселок Ольховатка (рис. 1). Град, достигавший размера крупной сливы, около полудня выпадал приблизительно 30 минут и сопровождался шквалистым ветром. Такого града, по мнению жителей, здесь не было лет 20, а если и был, то кратковременный, не с таким масштабом повреждений. В других пунктах Рамонского и Семилукского районов также наблюдалось выпадение града. Очевидцы отмечали выпадение града и на северо-западе от столицы Черноземья. Ущерб подсчитывали и фермеры. Погибли не только овощи и зелень, были сбиты яблоки. Образовались сугробы из градин высотой до 10 см. Даже на следующий день при температуре 25 °С на земле лежали градины. Не выстояли теплицы. На полях пострадала кукуруза, за несколько минут – около ста гектаров подсолнухов, на значительной площади выбито зерно из озимой пшеницы. Погибла домашняя птица.

Кроме Ольховатки град прошел в деревне Вериловка, с. Новоживотинное Рамонского района, на юго-западе Воронежа, в Тепличном районе, в д. Репное (рис. 1). В Семилукском районе размер градин достигал 20 мм. Пострадали и северо-западные районы Воронежской области. Очевидцы засняли град также в Липецкой области. Можно было видеть потоки ливневой воды с льдинами из спрессованного града, уровень ледяных осадков в некоторых районах достигал 30 см.



Рис. 1. Град в райцентре Ольховатка, Репное (фото: соц. сети https://www.m24.ru/videos/regiony/19072022/482798?utm_source=CopyBuf).

Fig. 1. Hail in the regional center of Olkhovatka, Repnoe (photo: social networks https://www.m24.ru/videos/regiony/19072022/482798?utm_source=CopyBuf).

Сеть метеостанций настолько редка, что град на метеостанциях не был зафиксирован. Дежурный синоптик Воронежского центра гидрометеорологии Г. Губинская отметила, что град прошел в ряде районов вокруг Воронежа, преимущественно по северу-западу области, в Рамонском, Семилукском, Ольховатском, Репьевском районах.

В Московской области в Волоколамске и Истре тоже прошел сильный град. На рис. 2 представлены для примера карты радиолокационной диагностики града предлагаемым подходом в рамках технологии в дневное время 18.07.2022.

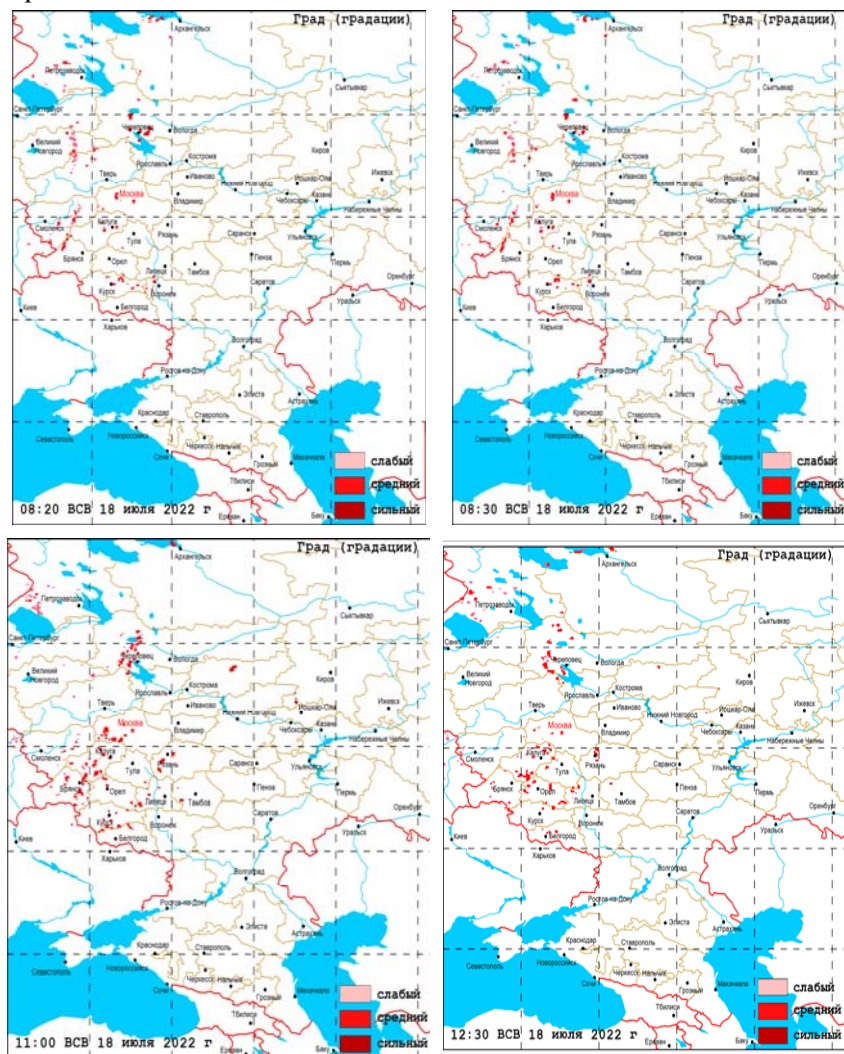


Рис. 2. Карты радиолокационного диагноза града за сроки 08.20, 08.30, 11.00, 12.30 ч ВСВ 18.07.2022, полученные в рамках автоматизированной технологии по рассматриваемому в статье алгоритму.

Fig. 2. Maps of radar diagnosis of hail for 08:20, 08:30, 11:00, 12:30 UTC on July 18, 2022 as a part of an automated technology.

Результаты верификации диагностики града

Верификация как прогноза явлений, так и их диагноза – важная задача. Относительно конвективных явлений – это еще и трудная задача, так как для таких явлений характерна локальность возникновения как по территории, так и во времени. Сеть наблюдений для обнаружения таких явлений недостаточна. Раньше для получения выводов о точности прогнозирования или диагностирования конвективных явлений использовались специально оборудованные полигоны, которых сейчас в России нет.

Трудность в определении оправдываемости [8] случаев с градом, диагностированных в узлах сетки, заключается в том, что, возможно, в выбранном радиусе вокруг узлов сетки может не оказаться пунктов наблюдения, что повлечет необоснованное увеличение ложных тревог диагностирования. Поэтому в данном исследовании оценена предупредительность диагностированных случаев выпадения града на поверхность земли. Исходными данными для проведенной верификации послужили данные метеорологических станций, передаваемые по коду WAREP, а также информация из журнала опасных явлений погоды, сформированного в ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе донесений с мест, и сообщения очевидцев, доступные в Интернете.

Для анализа рассмотрены 127 случаев (WAREP) и 18 случаев (журнал, Интернет) в мае; 28 случаев (WAREP) и 51 случай (журнал, Интернет) в июне; 20 случаев (WAREP) и 53 случая (журнал, Интернет) в июле; 5 случаев (WAREP) и 22 случая (журнал, Интернет) в августе; 13 случаев (WAREP) и 7 случаев (журнал, Интернет) в сентябре 2022 г. Итого за летний период 2022 г. на территории ЕТР рассмотрены 193 случая с градом (WAREP) и 151 случай (журнал, Интернет), что в сумме составляет 344 случая. Данные о градобитии по разным видам информации сравнивались. Если они дублировались, то такой случай принимался за один случай. За случай брался факт выпадения града на станции. При этом в один случай попадало, как правило, несколько 10-минутных сроков диагностирования, т. е. анализировались все сроки диагностирования, попавшие в указанный в коде WAREP период выпадения града в радиусе 10 км от станции. Если время выпадения града для одной станции указывалось дважды (два раза зафиксировано выпадение града), то считалось, что это два случая.

Предупредительность выпадения града при диагностировании (только случаи по коду WAREP) составила 91.2 %, для всех случаев (WAREP и журнал, Интернет) – 94.7 %. При этом не анализировались причины не диагностирования случаев, к которым можно отнести следующие: алгоритм не позволил диагностировать явление; не работал по какой-либо причине локатор. Все такие случаи отнесены к пропуску явления (из выборки в 344 случаев пропуски составили 25 случаев: 17 случаев согласно WAREP и 8 случаев согласно данным журнала и Интернета). Таким образом, можно сделать вывод, что диагностирование данным подходом

града, выпадающего на поверхность земли, происходит с высокой точностью. На качественном уровне (на основе анализа карт с диагностикой града) можно отметить, что диагностированные зоны хорошо согласуются с зонами высоких значений максимальной конвективной скорости.

Анализ случаев града по интенсивности показал, что в большинстве случаев размер града совпадает с указанным в донесениях (WAREP, журнал, Интернет; в случаях, где размер был определен), но наблюдается тенденция к диагностике града большего размера в сравнении с измеренным размером. Вывод о точности диагностирования града по размеру на данный момент сложно сделать, так как случаи диагностирования его выпадения относятся к узлу сетки, что означает, что размер относится к размеру града, выпадающего в некотором радиусе. При данной верификации – в радиусе 10 км от станции. Сравнение с данными локаторов, функционирующих в оперативном режиме, запланировано на следующем этапе исследований после создания базы данных о случаях с градом в той же сетке. Но анализ отдельных случаев показывает, что зоны, диагностированные данным подходом и в оперативном режиме работы сети ДМРЛ-С, различаются как по размеру, так и расположению на площади.

Для примера (рис. 3) рассмотрим случай, приведенный в [1]. Днем 30 июня 2017 г. Центральный федеральный округ находился под влиянием атмосферного фронта атлантического циклона, в зоне которого выпали настоящие тропические ливни с грозами, градом и шквалом. В Московском регионе стихия отметилась в виде двух волн, первая – после полудня, вторая – в районе 18 ч. В Москве и Подмосковье наблюдался комплекс опасных метеорологических явлений. Погибли три человека, несколько пострадали. Во время первой волны прошел очень сильный дождь на севере Москвы, по данным метеостанции ВДНХ к 18 ч выпало 53 мм, это рекордное количество с 1923 г. Была подтоплена взлетная полоса аэропорта Шереметьево. Сильные ливни прошли и в других районах, так, в Тушино выпало 27 мм, во Внуково 21 мм, в Немчиновке 44 мм, в Электроуглях 21 мм, в Ново-Иерусалиме 37 мм, в Зарайске 21 мм, дожди продолжались и после 18 ч. В Одинцово и на других территориях Подмосковья отмечен местами град со шквалистым ветром.

Анализ всех случаев диагностирования выпадения града на поверхность земли с 10-минутной детализацией в летний период 2022 г. показал, что в мае и сентябре были случаи с диагностированными зонами града, занимавшими довольно обширные площади, что не характерно для града. Град очень сложно отличить от ледяной крупы, часто смешивают его и со снежной крупой. На практике руководствуются в таких случаях климатологическими данными, так как существует ярко выраженный сезонный ход этих видов осадков. Но в переходные периоды (поздняя весна и ранняя осень) это сделать бывает затруднительно, особенно при заторах холодных воздушных масс. Также трудности возникают в горных районах, отличающихся разнообразием твердых осадков.

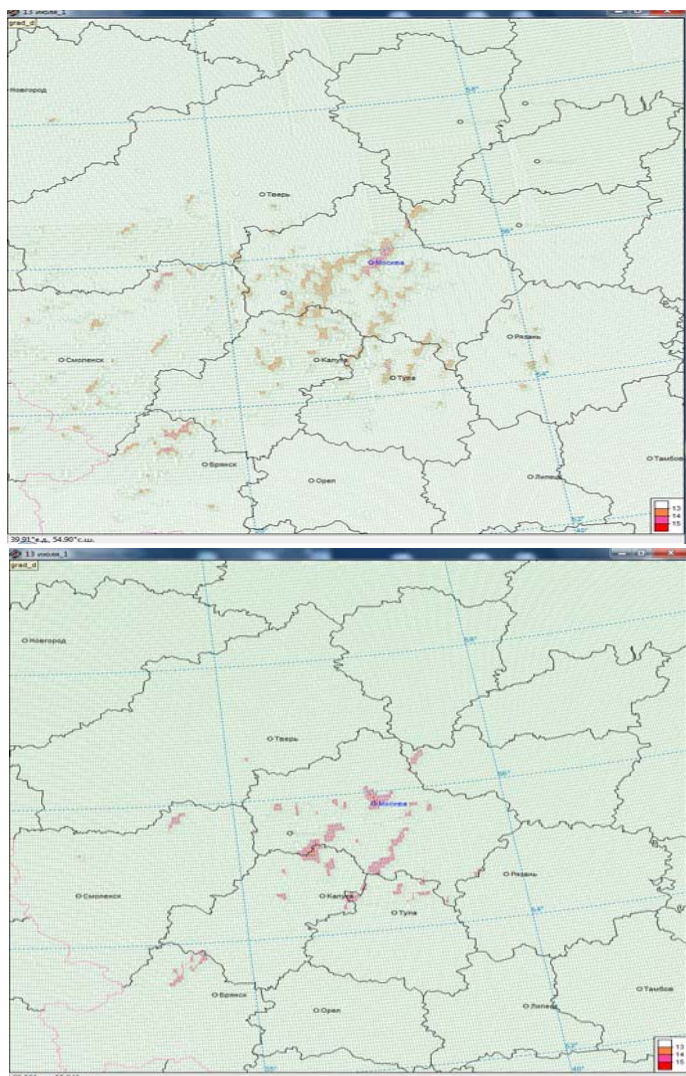


Рис. 3. Диагностированные зоны с градом за дневное время (на срок 18 ч ВСВ) 30.06.2017г. по существующему программному обеспечению работы ДМРЛ-С (верхняя панель) и предлагаемому подходу (нижняя панель).
Fig. 3. Diagnosed hail zones for the daytime (18:00 UTC) on June 30, 2017 according to the existing DMRL-C software (upper panel) and the proposed approach (lower panel).

Для наблюдателей метеостанций именно размер выпавших крупинок является наиболее удобным в практическом отношении критерием различия крупы и града (град от 5 до 50 мм; снежная крупа от 2 до 5 мм). Если обратиться к кодам для передачи данных наблюдений, то и в них нередко объединяются данные явления. Так, например, при передаче погоды в последний час по КН-01 SYNOP кодовая цифра 27 отведена для «града,

крупы (ледяная или снежная), с дождем или без дождя». Ранее [4] эту проблему пытались решить, исследовав зависимость фазового состояния осадков в облаке от максимальной скорости восходящего потока и температуры на уровне максимальной скорости (рис. 4).

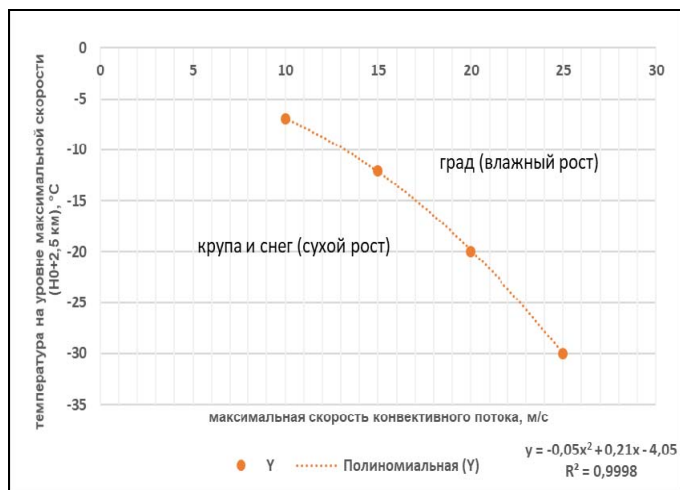


Рис. 4. Зависимость фазового состояния осадков в облаке от максимальной скорости восходящего потока и температуры на уровне максимальной скорости.

Fig. 4. The dependence of the phase state of precipitation in a cloud on the maximum speed of the updraft and temperature at the level of the maximum speed.

В нашем исследовании определялась прогностическая температура воздуха на уровне ($H_0 + 2.5$ км), максимальная конвективная скорость рассчитывалась по данным ДМРЛ-С [2]. Алгоритм уточняется для мая и сентября месяцев. Как видно из рис. 4, линия разделяет зоны града (влажный рост) и крупы и снега (сухой рост). Таким образом, при диагностике града в облаке уточняется в таких случаях – град образуется или крупы.

На рис. 5 показано применение уточненного алгоритма для случая диагностирования града 24 сентября 2022 года. Как видно из рисунка, без учета фазового состояния осадков в облаке зоны диагностирования града занимают довольно обширные области, с учетом – зоны локальны. Известно, что 24 сентября в Белгородской области ближе к вечеру погода испортилась, прошел дождь, о котором предупреждали синоптики. Однако град, кадрами о котором стали делиться в соцсетях, стал для белгородцев неожиданностью. Таким образом, применяя усовершенствованный алгоритм к диагностированию града весной и осенью, по нашему мнению, удастся отделить град от снежной и ледяной крупы, сохраняя случаи с выпадением града. В 2023 г. будет проведена проверка алгоритма в режиме реального времени.

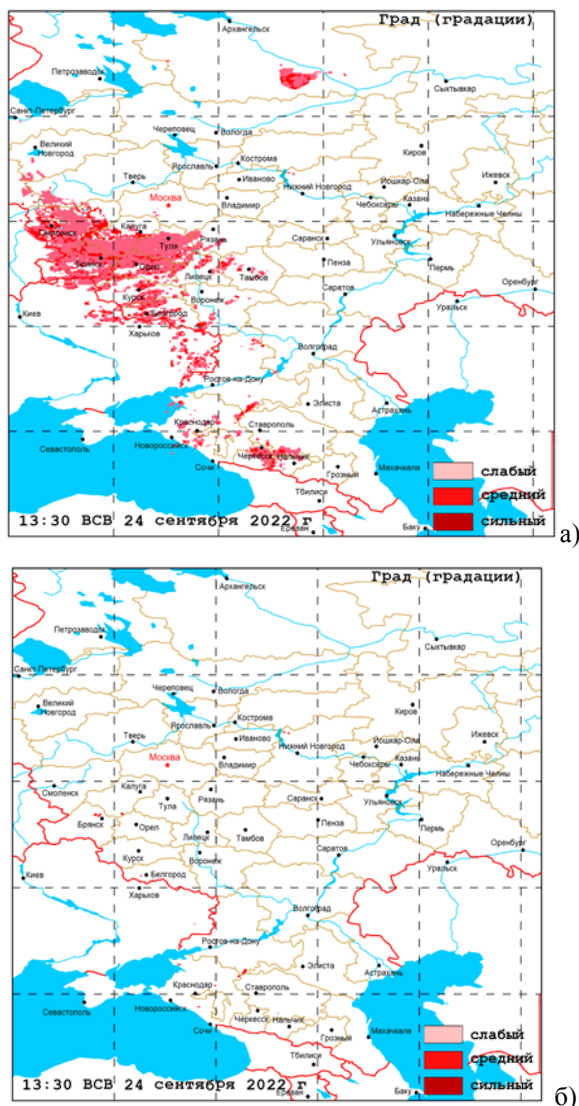


Рис. 5. Диагностированные зоны с градом по алгоритму без анализа фазового состояния осадков в облаке (а) и с учетом (б) за срок 13.30 ч ВСВ 24.09.2022 г.

Fig. 5. Diagnosed hail zones according to the algorithm (a) without and (b) with analyzing the phase state of precipitation in a cloud for 13:30 UTC on September 24, 2022.

Выводы

Представленные результаты исследований показывают, что есть проблемы диагностики града, выпадающего на поверхность земли, которые необходимо решать для достижения цели точности диагностирования.

В результате – данные радиолокационного диагностирования града, выпадающего на поверхность земли, смогут дополнить базу данных о таких случаях, приблизившись по доверию к наблюдавшимся случаям на метеостанциях, которые считаются эталонными.

Использованные в данном исследовании подходы к диагностированию явления прошли проверку практикой их использования в прогнозировании [5]. Это подтверждает вывод, что подходы к диагностированию явлений, проверенные в режиме реального времени, также могут применяться при прогнозировании, т. е. исследования по диагностированию и прогнозированию опасных явлений погоды дополняют друг друга, обогащая знаниями о процессах их возникновения.

В ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010», реализованном при оперативной работе сети ДМРЛ-С, для критерия диагностики града, как и грозы, используются значения высоты верхней границы облачности и вертикальный профиль радиолокационной отражаемости, а именно ее значения на специальных уровнях (высоте нулевой изотермы и на уровне интенсивной кристаллизации, т. е. на уровне изотермы -15°C , превышающем, как правило, уровень нулевой изотермы на 2–2.5 км), а также максимальное значение радиолокационной отражаемости в столбе [6]. Кроме того, ведутся исследования по использованию значений вертикально интегрированной водности как предиктора для явления «град слабый» и «град сильный». В представляемом исследовании диагностика града и его размера производится практически по тем же предикторам, что и в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010», но по разработанным зависимостям, а не критериям радиолокационных параметров. Результаты данных исследований показывают их полезность для совершенствования диагностики града по данным сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования, о чем говорит показатель предупрежденности таких случаев.

Верификация случаев градобитий предлагаемым подходом будет проведена на большей выборке с учетом 2023 г., в том числе в режиме сравнения с данными локаторов, работающих в оперативном режиме в рамках действующей сети ДМРЛ-С. Результаты верификации покажут, насколько данный подход оправдан для использования, а результаты диагностирования полезны для синоптиков.

Результаты исследований по отделению случаев с градом от случаев выпадения снежной или ледяной крупы также являются важными. Из общих сведений о площадях градобитий, накопленных десятилетиями, известно, что они локальны, по форме представляют либо узкие зоны близ фронтальных разделов в случае прохождения атмосферных фронтов, либо пятна при внутримассовых процессах. Это наглядно видно на рис. 5б.

В 2022 и 2023 гг. диагностические карты опасных конвективных явлений, включая град, поступают в режиме реального времени на компьютер синоптиков Гидрометцентра России. Успехи в повышении точности диагностирования градовых процессов имеют и практическое значение,

что приведет к более точному штормовому предупреждению о них, полученные результаты могут также найти применение при наукастинге явления.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НТЦР ДМРЛ ФГБУ «ЦАО» за предоставленную выборку данных, переданных по коду WAREP, и начальнику отдела краткосрочных прогнозов погоды и опасных явлений ФГБУ «Гидрометцентр России» Александру Дмитриевичу Голубеву – за данные из журнала донесений о выпадении града в летний период 2022 года на Европейской территории России.

Исследования выполнены в рамках темы 1.1.5 (2020–2024 гг.) НИТР ФГБУ «Гидрометцентр России».

Список литературы

1. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 127-143.
2. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.
3. Глушкова Н.И. Метод прогноза града и ливня // Труды ВГИ. 1966. Вып. 3 (5). С. 129-139.
4. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 542-545.
5. Методические рекомендации по использованию в прогностической практике продукции численных краткосрочных прогнозов опасных конвективных явлений погоды в летний период года. М.: Гидрометцентр России. 2018. 170 с. <http://www.method.meteorf.ru> (дата обращения 16.05.2023г.).
6. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Третья редакция. М., 2019. 129 с.
7. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. 181 с.
8. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. 66 с.
9. Решетов Г.Д. Метод прогноза града для авиации на 12–36 ч. Пособие для синоптиков. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 31 с.
10. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 412 с.
11. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 183 с.
12. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Мальбахова Н.М. О прогнозе града // Метеорология и гидрология. 1989. № 4. С. 43-50.
13. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации: Научно-методическое пособие. М.: Трида лтд, 2016. С. 127-145.
14. Шишкин Н.С. О прогнозе града // Труды ГГО. 1962. Вып. 126. С. 25-32.

References

1. Alekseeva A.A., Losev V.M. Forecast of severe convective weather events in summer. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 127-143 [in Russ.].

2. Alekseeva A.A., Peskov B.E. Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].
3. Glushkova N.I. Metod prognoza grada i livnya. *Trudy VGI*, 1966, vol. 3, no. 5, pp. 129-139 [in Russ.].
4. Zverev A.S. Sinopticheskaya meteorologiya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1977, pp. 542-545 [in Russ.].
5. Metodicheskie rekomendacii po ispol'zovaniyu v prognosticheskoy praktike produktsii chislennykh kratkosrochnykh prognozov opasnykh konvektivnykh yavleniy pogody v letniy period goda. Moscow, Gidrometcentr Rossii [Hydrometcentre of Russia], 2018, 170 p. Available at: www.method.meteorf.ru [in Russ.].
6. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike. Tret'ya redaktsiya, Moscow, 2019, 129 p. [in Russ.].
7. RD 52.27.339-93. Rukovodstvo po diagnozu i prognozu opasnykh i osobo opasnykh osadkov, grada i shkvalov po dannym meteorologicheskikh radiolokatorov i iskusstvennykh sputnikov Zemli. 181 p. [in Russ.].
8. RD 52.27.724-2019. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. 66 p. [in Russ.].
9. Reshetov G.D. Metod prognoza grada dlya aviatsii na 12–36 ch. Posobie dlya sinoptikov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1981, 31 p. [in Russ.].
10. Sulakvelidze G.K. Livnevye osadki i grad. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1967, 412 p. [in Russ.].
11. Sulakvelidze G.K., Glushkova N.I., Fedchenko L.M. Prognoz grada, groz i livnevnykh osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1970, 183 p. [in Russ.].
12. Fedchenko L.M., Goral' G.G., Mal'bahova N.M. O prognoze grada. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1989, no. 4, pp. 43-50 [in Russ.].
13. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii: Nauchno-metodicheskoe posobie. Moscow, Triada LTD publ., 2016, pp. 127-145 [in Russ.].
14. Shishkin N.S. O prognoze grada. *Trudy GGO*, 1962, vol. 126, pp. 25-32 [in Russ.].

Поступила 16.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;

принята в печать 13.06.2023.

Submitted 16.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;

accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-128-137>

УДК 551.513

Решение задачи гашения свободных колебаний уральной поверхности воды в Финском заливе

В.В. Клёмин, О.А. Королёва

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Предлагаемая статья является третьей в серии статей авторов из Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского, опубликованных в журнале «Гидрометеорологические исследования и прогнозы» (№1 (371) 2019; №2 (380), 2021). В этих статьях продемонстрировано применение математических методов оптимизации, от классического вариационного исчисления до современных методов Понтрягина и метода моментов, для решения конкретных задач управления природными процессами.

В данной статье для прогноза штормового нагона в Финском заливе выбрана система уравнений, которая, как показали расчеты по данным наблюдений, позволяет прогнозировать максимальный уровень подъема воды в устье реки Нева с погрешностью, не превышающей 10 %. Предложен алгоритм решения задачи гашения свободных колебаний уральной поверхности воды в Финском заливе. Представлены результаты расчетов управляющих воздействий, а также уровней подъема воды при гашении свободной гравитационной волны при одностороннем и двухстороннем воздействии. Результаты расчетов на примере наводнения 28–29 сентября 1975 года показали, что при гашении свободной гравитационной волны штормового нагона максимальный уровень подъема воды в устье р. Нева мог быть уменьшен с 280 см до 194–195 см, то есть на 85–86 см (на 30 %).

Ключевые слова: штормовой нагон, свободные колебания водной поверхности, управляющее воздействие

Solving the problem of damping free oscillations of the water level surface in the Gulf of Finland

V.V. Klemin, O.A. Korolyova

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

The proposed article is the third paper of the authors from Mozhaisky Military Space Academy published in Hydrometeorological Research and Forecasting journal (No. 1 (371) in 2019, No. 2 (380) in 2021), which show how optimization methods (from the classic calculus of variations to modern Pontryagin methods and the method of moments) can be applied for solving specific problems of managing natural processes.

In the present paper, a system of equations was chosen for forecasting storm surges in the Gulf of Finland, which, as calculations based on observations showed, allows predicting the maximum level of water rise at the Neva River mouth with an error not exceeding 10%. An algorithm for solving the problem of damping free oscillations of the water level surface in the Gulf of Finland is proposed. The results of calculations of control actions,

as well as the levels of water rise during the damping of a free gravity wave with unilateral and bilateral actions are presented. The results of the calculations on the example of the flood on September 28-29, 1975 showed that when damping the free gravity wave of the storm surge, the maximum level of water rise at the Neva River mouth could be reduced from 280 to 194-195 cm, that is, by 85-86 cm (30%).

Keywords: storm surge, free oscillations of the water surface, control action

1. Постановка задачи гашения

При гидродинамическом прогнозировании штормовых нагонов в устье реки Невы используется следующая система уравнений мелкой воды [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{F} \right)^2 + gF \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -F \frac{\partial P}{\partial x} + B \left(\tau - kQ \frac{|Q|}{F^2} \right), \\ B \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\xi = \xi(x, t)$ – отклонение уровенной поверхности от состояния равновесия;

$Q = Q(x, t)$ – объемный расход воды;

$F = F(x) + B(x) \cdot \xi$ – площадь поперечного сечения отклоненной от равновесия уровенной поверхности (см. рис. 1);

P – атмосферное давление;

g – ускорение силы тяжести;

B – ширина свободной поверхности залива;

τ – поверхностное ветровое напряжение;

k – коэффициент придонного сопротивления.

Последнее слагаемое левой части уравнения определяет силу градиента воды, первое слагаемое правой части определяет вынуждающую силу градиента атмосферного давления. Последнее слагаемое правой части определяет силу трения ветра и придонного трения.

Как показали исследования, выполненные Р.В. Пясковским и К.С. Померанцем [6] в 70-х годах прошлого века в Ленинградском отделении государственного океанологического института (ЛОГОИН), на стадии подъема воды в устье р. Невы вклад свободной гравитационной волны, вынуждающей силы градиента атмосферного давления и силы трения ветра примерно одинаков. Таким образом, погасив свободные колебания, можно примерно на $1/3$ уменьшить высоту подъема воды в устье р. Невы, что качественно снижает ущерб, наносимый С-Петербургу невскими наводнениями.

Как видно из системы уравнений (1), динамика свободных колебаний описывается уравнениями

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gF \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0,$$

$$B \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0,$$

после перекрестного дифференцирования которых и почленного вычитания результатов дифференцирования приходим к волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $a^2 \equiv \frac{gF}{B} = gH$ – квадрат фазовой скорости свободной гравитационной волны в Финском заливе при средней глубине H .

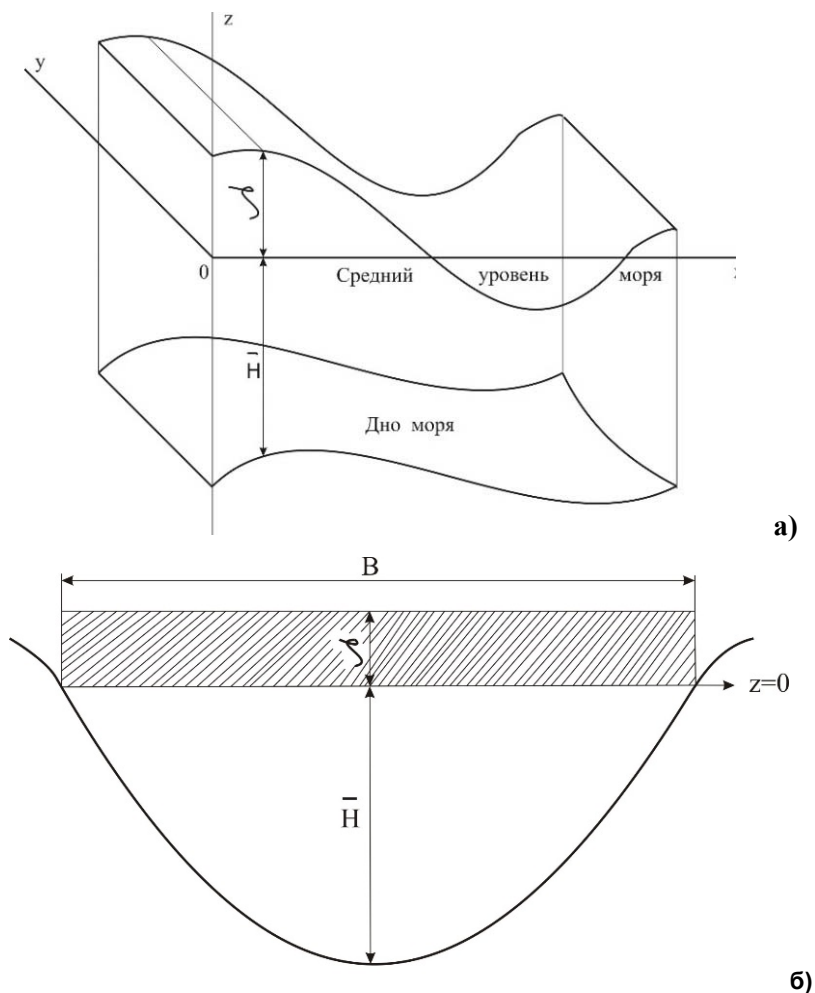


Рис. 1. Система координат и принятые обозначения (а); поперечное сечение водоема (б).

Fig. 1. Coordinate system and accepted notation (a); cross section of a reservoir (б).

Сформулируем задачу гашения свободной гравитационной волны следующим образом.

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ на отрезке $0 \leq x \leq S$ задано некоторое возбужденное состояние водной поверхности, определяемое неравномерным распределением давления атмосферы и силой трения ветра. Пусть также известна в начальный момент скорость изменения уровня в каждой внутренней точке области $0 \leq x \leq S$, т. е.

$$Q(x, 0) = Q_0(x), \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \dot{Q}_0(x). \quad (4)$$

Пусть, наконец, управляющее воздействие, направленное на гашение свободных колебаний урениной поверхности, приложено на концах отрезка $x = 0$ и $x = S$, т. е.

$$U_1(t) = Q(0, t), \quad (5)$$

$$U_2(t) = Q(S, t). \quad (6)$$

Если функции $Q(0, t)$ и $Q(S, t)$ заданы, задача (2), (3), (4), (5), (6) является классической краевой задачей для волнового уравнения. Она поставлена корректно и имеет единственное решение (см. [8]). Если же управляющие функции $U_1(t)$ и $U_2(t)$ необходимо определить, то имеем задачу краевого управления в задачах оптимизации распределенных систем, т. е. систем, в которых уравнением для ограничений используется уравнение в частных производных (см., например, [1, 3]).

Задачу оптимального управления гашением колебаний урениной поверхности воды сформулируем следующим образом: изменяя уровень водной поверхности на краях отрезка $0 \leq x \leq S$ при условии, налагаемом на вектор управляющей функции $U(t) = (U_1(t), U_2(t))$

$$\|U(t)\| \leq l, \quad l > 0, \quad (7)$$

за кратчайший срок T получить нулевое распределение амплитуд $Q(x, T)$ и скоростей их изменения $\dot{Q}(x, T)$, т. е.

$$Q(x, T) = 0,$$

$$\dot{Q}(x, T) = 0. \quad (8)$$

Это классическая задача быстродействия Понтрягина (см. [4]). Для нее в теории оптимального управления доказано существование и единственность решения. В нашем случае «быстродействию» по сути совпадает с понятием «реального времени штормового нагона» в устье р. Невы.

2. Решение задачи гашения

Представим решение уравнения (2) в виде суммы двух функций

$$Q(x, t) = Q_1(x, t) + Q_2(x, t), \quad (9)$$

где функция $Q_1(x, t)$ описывает свободные колебания водной поверхности, т. е. является решением задачи (2), (3), (4) при нулевых граничных условиях, а $Q_2(x, t)$ описывает вынужденные колебания, определяющиеся возмущающими граничными условиями.

Будем также искать решение методом Фурье разделения переменных, предварительно разложив решение в ряды Фурье по ортогональным функциям синусов и косинусов, т. е.

$$Q_1(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k \cos \frac{\pi k a}{S} t + B_k \sin \frac{\pi k a}{S} t \right) \sin \frac{\pi k}{S} x, \quad (10)$$

где a — фазовая скорость гравитационной волны в водоеме глубиной H (см. рис. 1),

$$A_k = \frac{2}{S} \int_0^S Q_0(\xi) \sin \frac{\pi k}{S} \xi d\xi, \quad (11)$$

$$B_k = \frac{2}{\pi k a} \int_0^S \dot{Q}_0(\xi) \sin \frac{\pi k}{S} \xi d\xi, \quad (12)$$

и

$$Q_2(x, t) = \int_0^t K(x, t - \tau) U(\tau) d\tau, \quad (13)$$

где

$$K(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin \frac{\pi k}{S} x \sin \frac{\pi k a}{S} t, \quad (14)$$

$$C_k = \frac{2a}{S} [1 - (-1)^k]. \quad (15)$$

Напомним, что точкой над искомой функцией $\dot{Q}$ обозначена частная производная $\frac{\partial Q}{\partial t}$ по времени.

Для нахождения решения сформулированной задачи быстрогодействия гашения свободных колебаний может быть применен метод моментов, который подробно излагается в монографии А.Г. Бутковского [1]. В этой монографии доказывается, что в итоге оптимальное управление $U^0(t)$, полученное решением l -проблемы моментов, строго совпадает с функциональным решением классической задачи быстрогодействия Понтрягина и может быть рассчитано по формуле

$$U^0(t) = \frac{1}{2} \left[Q_0(at) + \int_0^t \dot{Q}(a\tau) d\tau \right], 0 \leq t \leq \frac{S}{a}. \quad (16)$$

Итак, для решения задачи гашения необходимо и достаточно знание объемных расходов воды в каждой точке отрезка $0 \leq x \leq S$ в начальный момент t_0 и скорости изменения этих расходов.

3. Подготовка исходных данных

Исходными данными для расчета объемных расходов воды $Q_0(x)$ и скоростей их изменения $\dot{Q}_0(x)$ являлись ежечасные наблюдения уровней воды на сети береговых станций наблюдения от Балтийска до Кронштадта, которые интерполировались на ось Финского залива на основании весов, полученных по данным наблюдений 1946–1976 годов [5]. Положение станций и узлов разностной сетки численного дифференцирования и интегрирования показаны на рис. 2. Пространственный шаг сетки равнялся 70 км.

Значения скоростей воды определялись путем численного интегрирования уравнения неразрывности в системе (1) по данным ежечасных приращений скоростей объемных расходов. Использовались трехточечные формулы Симпсона.



Рис. 2. Распределение станций для вычисления уровня в узлах интерполяции.

Fig. 2. Distribution of stations for level calculation in interpolation nodes.

4. Проверка результатов численного эксперимента по управлению гашением свободной гравитационной волны

Для проверки результатов была выбрана одномерная модель гидродинамического прогнозирования штормового нагона в устье р. Нева, разработанная в ЛОГОИН и подробно описанная в монографиях [2, 6]. Все расчеты были выполнены для наводнения 28–29 сентября 1975 г. Для этого

наводнения удалось восстановить ежечасные измерения уровня Балтийского моря на прибрежных станциях от Кронштадта до Балтийска, которые, как уже отмечалось, интерполировались в узлы разностной сетки на ось Балтийского моря и Финского залива (рис. 2) с использованием весов, полученных в ЛОГОИН. Для этих сроков были использованы (восстановлены) кольцевые карты погоды, с которых снимались данные об атмосферном давлении и скорости ветра. Это позволило рассчитать вынуждающую силу градиента атмосферного давления (первое слагаемое правой части первого уравнения системы (1)) и силу трения ветра об водную поверхность (второе слагаемое правой части первого уравнения системы (1)).

По проинтерполированным в узлы разностной сетки ежечасным значениям уровня определялись разностные значения $\partial\xi/\partial t$, которые использовались для нахождения начального распределения объемных расходов воды путем численного интегрирования по x второго уравнения системы (1). В начальной точке интегрирования (в нулевом узле интерполяции, г. Кронштадт) скорость потока и объемный расход $Q(0, t)$ принимались равными нулю. Полученный в 10 узле максимальный расход компенсировался убывающей синусоидой до нулевой отметки в Датских проливах.

Таким образом, вся необходимая информация для гидродинамического прогнозирования наводнений в устье р. Нева была собрана.

Численное интегрирование системы (1) выполнялось методом Лакса – Вендроффа [7]. Граничное разностное уравнение для ξ в узле 0 записывалось направленной разностью назад для конца отрезка времени. В качестве левого граничного условия (Датские проливы) принималось $\dot{Q}(S, t) = 0$, $\xi(S, t) = 0$. В узлах сетки от 11 до 15 вынуждающая сила градиента атмосферного давления и силы трения о воздух и дно принимались равными нулю.

Из представленной на рис. 2 координатной сетки видно, что шаг дифференцирования по пространству равнялся 70 км, шаг устойчивого интегрирования по времени равнялся 7 минут, что соответствует условию Куранта – Фридрихса – Леви при средней глубине водоема 200 м.

Результаты численного интегрирования представлены на рис. 3. Из анализа результатов видно, что ошибка гидродинамического прогноза максимальной высоты подъема воды не превышает 10 см. При этом максимальный уровень подъема воды достиг 280 см в период 03–04 часа 29 сентября 1975 года.

Расчеты управляющего воздействия, выполненные для одностороннего краевого воздействия в узле 0, представлены в табл. 1. Там же представлена величина подъема воды при одностороннем воздействии. Максимальное значение подъема воды при воздействии составило 195 см в 04 часа 29 сентября.

В качестве инструмента, уменьшающего толщину слоя воды в узле воздействия, предлагается использовать гибкую емкость (подушку), которую предварительно наполняют воздухом. Затем в процессе управления воздух выпускается из подушки, что создает эффект опускающейся донной поверхности.

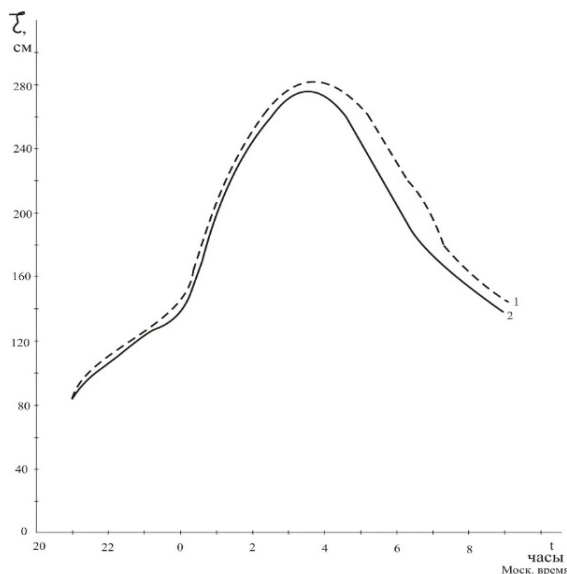


Рис. 3. Временной ход уровня водной поверхности в Кронштадте: 1 – измеренный уровень; 2 – расчетный уровень.

Fig. 3. Time course of the water surface level in Kronstadt: 1 – measured level; 2 – estimated level.

Таблица 1. Расчеты величины одностороннего воздействия 28-29 сентября 1975 г.

Table 1. Calculations of the unilateral actions on September 28-29, 1975

Время, ч	21	22	23	24	01	02	03	04	05
Величина воздействия, см	-16	-30	-42	-60	-78	-84	-96	-100	-85
Величина подъема в узле 0 при воздействии, см	78	86	110	125	138	173	192	195	184

Отметим, что в соответствии с теорией общая энергия свободной волны составляет одну четвертую квадрата амплитуды синусоиды. При пространственном шаге сетки 70 км и направленной разности назад, использующейся для аппроксимации дифференциальных уравнений в крайних узлах, ширина подушки составляет 70 км.

Кроме выполнения расчетов по одностороннему воздействию были выполнены расчеты по гашению свободной гравитационной волны двухсторонним воздействием. При этом вторая (левая) точка управления располагалась в узле 3 на траверсе поселка Кунда, в самом узком месте Финского залива. Для численного интегрирования системы уравнений (1) использовалась сетка с пространственным шагом 20 км. Данные об уровне водной

поверхности в узлах сетки с шагом 20 км получались интерполированием данных в узлах сетки с шагом 70 км с помощью билинейных сплайнов. Отметим еще раз, что ширина воздушных подушек в этом случае составляет 20 км.

Результаты расчетов управляющих воздействий, а также уровни подъема воды при двухстороннем воздействии, представлены в табл. 2. Максимальное значение подъема воды в этом случае составило 194 см в 04 часа 29 сентября 1975 года.

Таблица 2. Расчет величины двухстороннего воздействия 28-29 сентября 1975 г.

Table 2. Calculations of bilateral actions on September 28-29, 1975

Время, ч	21	22	23	24	01	02	03	04	05
Величина воздействия в узле 0, см	-10	-16	-20	-34	-42	-56	-58	-66	-38
Величина воздействия в узле 3, см	-2	-8	-12	-16	-27	-32	-41	-44	-32
Величина подъема воды в узле 0, см	100	102	120	130	142	180	192	194	188

Из анализа результатов расчетов видно, что при гашении свободной гравитационной волны штормового нагона максимальный уровень подъема воды в устье р. Нева удастся уменьшить с 280 см до 194–195 см, то есть на 85–86 см (на 30 %).

Заключение

Из представленных результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. Выбранная для прогноза штормового нагона система уравнений позволяет прогнозировать максимальный уровень подъема воды в устье р. Нева с погрешностью, не превышающей 10 %.

2. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений (1) и применение для ее решения метода Лакса – Вендроффа второго порядка точности по сравнению с методом Лакса первого порядка точности, который был использован Е.Н. Вольцингером и Р.В. Пясковским [2], незначительно повлияли на результаты численного интегрирования, что объясняется довольно малым отношением шагов разностного интегрирования по времени и дифференцирования по пространству в критерии Куранта – Фридрихса – Леви.

3. Применение подушки гашения свободной гравитационной волны шириной 70 км при одностороннем воздействии и двух подушек по 20 км при двухстороннем воздействии достаточно, чтобы примерно на 30 % уменьшить максимальный уровень подъема воды в устье р. Нева. При наводнении 28–29 сентября 1975 г. гашение свободной гравитационной

волны не вызывало бы необходимости принятия экстренных мер безопасности в г. Ленинграде, которые предусматривались по наставлению о штормовом предупреждении при подъеме воды выше 190 см.

В заключение авторы выражают благодарность П.В. Клемину за подготовку рукописи статьи к изданию.

Список литературы

1. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1985. 474 с.
2. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 207 с.
3. Лурье К.А. Оптимальное управление в задачах математической физики. М.: Наука, 1975. 428 с.
4. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Галикредидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
5. Пясковский Р.В., Вольцингер Н.Е., Михайлов Ю.Д. Определение уровня в открытой части Балтийского моря по данным береговых станций // Труды ГГО. 1976. Вып. 380.
6. Пясковский Р.В., Померанец К.С. Наводнение. Л.: Гидрометиздат, 1976.
7. Рихтмаер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Гостехиздат, 1951.

References

1. Butkovskiy A.G. Teoriya optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelyonnymi parametrami. Moscow: Nauka publ., 1985, 474 p. [in Russ.].
2. Vol'cinger N.E., Pyaskovskiy R.V. Teoriya melkoy vody. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1977, 207 p. [in Russ.].
3. Lur'e K.A. Optimal'noe upravlenie v zadachah matematicheskoy fiziki. Moscow: Nauka publ., 1975, 428 p. [in Russ.].
4. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Galikrelidze R.V., Mishchenko E.F. Matematicheskaya teoriya optimal'nyh processov. Moscow: Nauka publ., 1983, 393 p. [in Russ.].
5. Pyaskovskiy R.V., Vol'cinger N.E., Mihaylov Yu.D. Opredelenie urovnya v otkrytoy chasti Baltiyskogo morya po dannym beregovykh stanciy. Trudy GGO, 1976, vol. 380 [in Russ.].
6. Pyaskovskiy R.V., Pomeranec K.S. Navodnenie. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1976 [in Russ.].
7. Rihtmaer R., Morton K. Raznostnye metody resheniya kraevykh zadach. Moscow: Mir publ., 1972 [in Russ.].
8. Tihonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki. Moscow: Gostekhizdat publ., 1951 [in Russ.].

*Поступила 30.12.2022; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.*

*Submitted 30.12.2022; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-138-155>

УДК 556.536+519.688+004.8+004.438

Глубокие нейронные сети архитектуры трансформер в задачах гидрологических прогнозов

А.В. Романов¹, Э.Р. Акмаев², М.А. Червоненкис²

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия;

²ООО «ПАВЛИН Технологии» г. Дубна Московской обл., Россия

alexey.romanov@mecom.ru, akmaew1@gmail.com, chervonenkis@yandex.ru

Выполнен теоретический анализ современных нейросетевых моделей, используемых для обработки временных рядов. При этом особое внимание уделено архитектуре построения алгоритмов глубокого машинного обучения. Показаны преимущества нейросетевой модели Temporal Fusion Transformer (TFT), которая выбрана в качестве базовой для моделирования процесса формирования весеннего половодья. Детально численно проанализированы возможности использования модели TFT для долгосрочного прогноза максимальных уровней воды с заблаговременностью 60 и 90 суток для нескольких водпостов р. Исеть (бассейн речной системы Тобола). В качестве исходной информации для обучения модели (зависимая/обучаемая выборка) использованы суточные временные ряды за 27 лет (1991–2017 гг.) по восьми гидрометеорологическим характеристикам. Приводятся результаты прогнозов для независимой выборки (2018–2022 гг.), а также данные оперативного прогноза за 2023 г. Выделены несколько направлений развития нейросетевого моделирования для долгосрочных и краткосрочных прогнозов речного стока.

Ключевые слова: долгосрочные гидрологические прогнозы, половодье, нейронные сети, расход воды, уровень воды, искусственный интеллект, глубокое машинное обучение, Временной Объединяющий Трансформер

Deep neural networks of transformer architecture in problems of hydrological forecasts

A.V. Romanov¹, E.R. Akmaev², M.A. Chervonenkis²

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

²*PAWLIN Technologies, Dubna, Moscow region, Russia*

alexey.romanov@mecom.ru, akmaew1@gmail.com, chervonenkis@yandex.ru

The theoretical analysis of modern neural network models used for processing time series is carried out. At the same time, special attention is paid to the architecture of building deep machine learning algorithms. The advantages of the neural network model Temporal Fusion Transformer (TFT), which is selected as the base for modeling the process of spring flood formation, are shown. The possibilities of using the TFT model for a long-term forecast of maximum water levels with a lead time of 60 and 90 days for several points of the Iset river (the basin of the Tobol river system) are numerically analyzed in detail. The daily time series for 27 years (1991–2017) for eight hydrometeorological characteristics were used as the initial information for training the model (dependent (trainable) sample). The results of forecasts for an independent sample (2018–2022), as well as operational forecast data for 2023 are presented. Several directions of development of neural network modeling for long-term and short-term forecasts of streamflow are identified.

Keywords: hydrological long-term forecasts, flooding, neural networks, discharge, water level, water regime, artificial intelligence, deep machine learning, Temporal Fusion Transformer

Введение

Анализ мирового опыта развития методов математического моделирования речного стока показывает, что в основном все достигнутые в этом направлении результаты относятся к их использованию в области краткосрочных прогнозов водного режима с заблаговременностью от трех до десяти суток. При этом методы долгосрочных прогнозов с заблаговременностью месяц и более практически остались на уровне, достигнутом на рубеже XX и XXI веков. Физической основой последних прежде всего является уравнение водного баланса, которое может быть записано с той или точностью в зависимости от объема исходной гидрометеорологической информации. При этом подавляющее большинство методов долгосрочных прогнозов различных элементов речного стока, основанных на использовании уравнения водного баланса, базируются на физико-статистическом подходе, широко использующим корреляционные статистические методы анализа.

В то же время стремительный рост объема цифровой гидрометеорологической информации, развитие нейросетей, а также расширение парка и мощности вычислительных ресурсов предъявляют новые требования к их обработке, которые распространяются и на долгосрочные гидрологические прогнозы, представляющие собой практически чрезвычайно важную область гидрологии суши. На сегодняшний день в отечественной литературе практически нет публикаций, в которых рассматривается использование искусственных нейронных сетей (ANN) для долгосрочных прогнозов уровней воды с заблаговременностью месяц и более. В то же время практическая потребность в разработке таких методов постоянно нарастает, так как позволяет существенно повысить эффективность управления водными ресурсами, а также избежать серьезных экономических потерь при образовании катастрофических наводнений.

В последние годы алгоритмы глубокого обучения ANN показали высокую эффективность в самых разных областях: от синтеза речи до компьютерного зрения и прогнозирования временных рядов [1]. Важной особенностью таких алгоритмов является их способность улавливать нелинейные связи между данными разного типа, а также работать с их большим объемом. В качестве объекта исследования возможностей использования ANN были выбраны три водпоста р. Исеть (бассейн речной системы р. Тобол), для которых классические методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды с заблаговременностью не менее 30 дней, используемые в ФГБУ «Уральское УГМС», не дали положительных результатов.

1. Архитектура базовой нейросетевой модели

Рассмотрим особенности архитектуры модели Temporal Fusion Transformer / Трансформатор Временного Синтеза (TFT) [7], которая нашла широкое применение в различных областях науки для предсказания временных рядов. Эта модель обладает множеством приложений и успешно используется в задачах прогнозирования временных данных, где эффективное предсказание и моделирование временных зависимостей играют важную роль [3]. Текущие часто используемые подходы включают в себя такие модели глубокого обучения, как MLP, RNN, LSTM [5], TCNN (Temporal Convolutional Neural Network / Временная Свёрточная Нейронная Сеть), а также комбинированные подходы, как, например, LSTM в сочетании со SWAT (Soil & Water Assessment Tool / Инструмент Оценки Почвы и Воды). Однако они все страдают одним и тем же недостатком: во многих случаях возможно использование только непрерывных временных наблюдаемых признаков, в то время как использование категориальных и статических признаков позволяет улучшить качество прогнозов. Подключение категориальных и статических признаков к указанным моделям возможно путем различных модификаций (например, используются one-hot – кодировщики, необучаемые слои или признаки подаются на вход верхних уровней модели). Однако их использование недостаточно эффективно (существенное увеличение размерности, неоптимальная архитектура).

В базовой модели TFT могут быть реализованы следующие признаки:

- Статические категориальные
- Статические непрерывные
- Временные категориальные, известные заранее
- Временные непрерывные, известные заранее
- Временные категориальные, наблюдаемые
- Временные непрерывные, наблюдаемые
- Целевые значения временных рядов, наблюдаемые до настоящего момента времени

Ещё одной проблемой, с которой сталкиваются модели, является не только необходимость обработки значений в различных диапазонах, но и способность предсказывать значения в достаточно большом интервале. Решением данной задачи может быть преобразование входного временного ряда целевой переменной к нормализованному распределению через среднее и стандартное отклонение. Эти значения могут использоваться для преобразования выхода модели в требуемый диапазон. Такой подход позволяет улучшить точность прогнозов и снизить ошибки модели [2], поскольку теперь её непосредственные выходы будут лежать в одном распределении.

Общая архитектура используемой модели представлена на рис. 1.

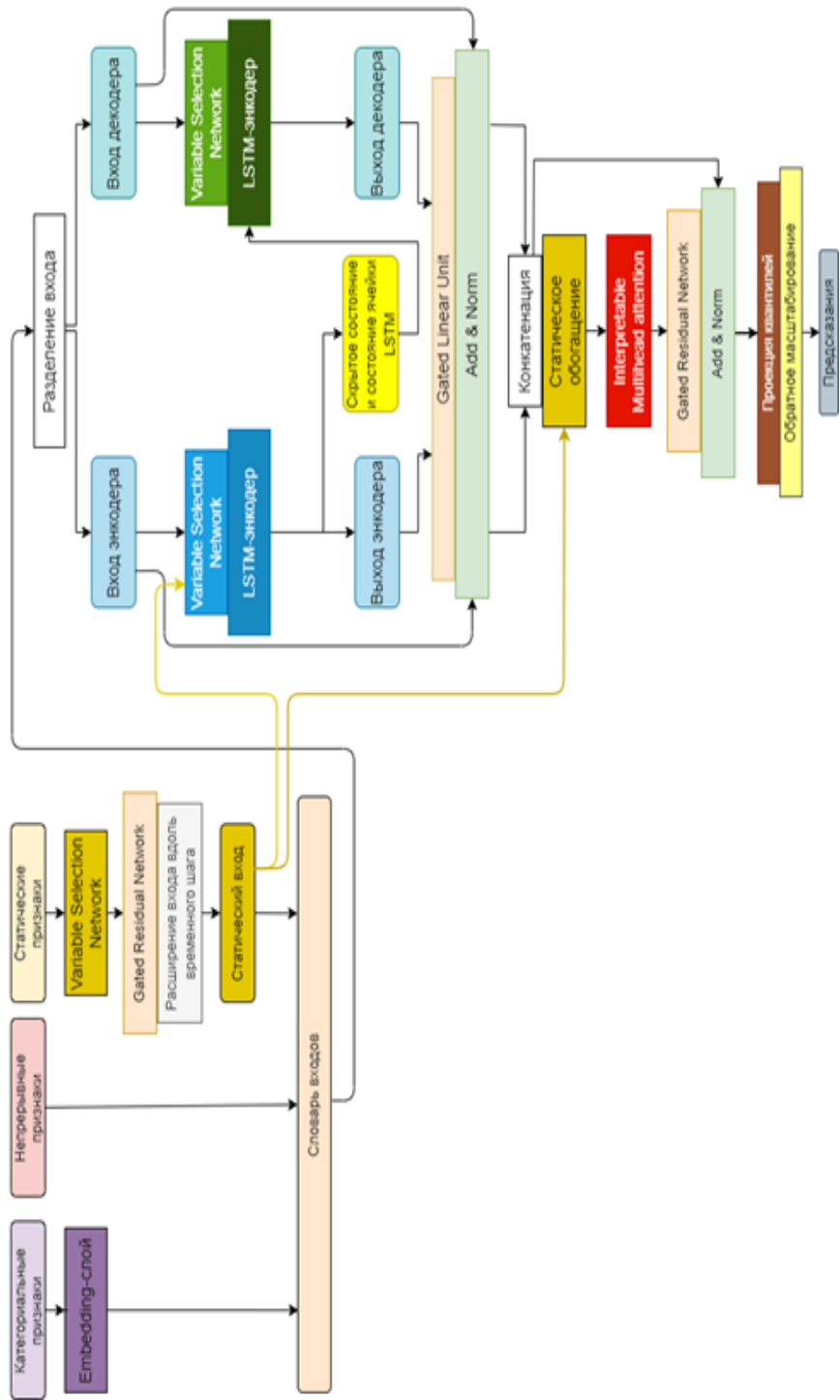


Рис. 1. Архитектура модифицированной модели Temporal Fusion Transformer.
Fig. 1. Modified Temporal Fusion Transformer model architecture.

Выделим основные концептуальные идеи, положенные в основу построения данной модели:

- в качестве энкодера и декодера используется LSTM-слой;
- GLU-блоки или их включающие используются для контроля потока информации и предотвращения насыщения или затирания градиентов линейных слоев;
- сети выбора переменных (Variable Selection Networks) используются для отбора наиболее важных признаков, возвращая дополнительно сами веса важности признаков. Также этот блок ответственен за приведение размерности от разных типов данных к одному виду – например, категориальные признаки будут иметь отличную от непрерывных размерность;
- в качестве внимания используется скалярное внимание (dot-product attention).

В данной работе все численные эксперименты выполнены на базе модификации модели, предложенной в [6]. Для упрощения описания блоков используемой модели выделим только те из них, которые отличаются от оригинальной имплементации.

Регуляционные (Шлюзовые) линейные ячейки (Gated Linear Unit, GLU) – блоки регуляции потока информации в нейронных сетях [4]. Они обеспечивают стабильность распределения входов в последующие слои. В GLU вход делится на две части: одна часть проходит через линейную функцию активации, а другая часть проходит через сигмоидную функцию активации, т. е. этот блок пропускает только половину информации из предыдущего слоя, взвешенную с помощью второй половины, прошедшей через сигмоиду, а затем происходит поэлементное умножение тензоров:

$$GLU(a, b) = a \odot \sigma(b),$$

где a – первая половина входного тензора; b – вторая; $\odot$ – операция поэлементного умножения тензоров (разделение принято проводить по последней оси тензора); $\sigma(\cdot)$ – операция поэлементного применения сигмоиды.

В данной имплементации в каждом блоке GLU непосредственно самой операции предшествует линейный слой, увеличивающий количество признаков вдвое – это предотвращает затирание информации и сохранение размерностей. Сравнение представлено на рис. 2.

Блок смещения с нормализацией (Add & Norm) – это блок, который включает в себя слой нормализации и блок обхода (skip-connection). Блок смещения с нормализацией используется для комбинации текущего входа с предыдущим выходом и нормализации результирующего сигнала. Он представляет собой следующую последовательность действий:

- установка параметров блока: размерности входных и выходных тензоров, возможность обучения маски;
- если размерность входного тензора не равна размерности выходного тензора, то применяется блок интерполяции; в противном случае используется слой-тождественность;

- если параметр добавления обучаемый, то создается параметр маски, который затем проходит через блок сигмоидальной активации и после этого умножается на параметр пропуска и некоторый множитель;
- вычисление нормализации входного тензора с добавлением параметра пропуска;
- возвращение выходного тензора.

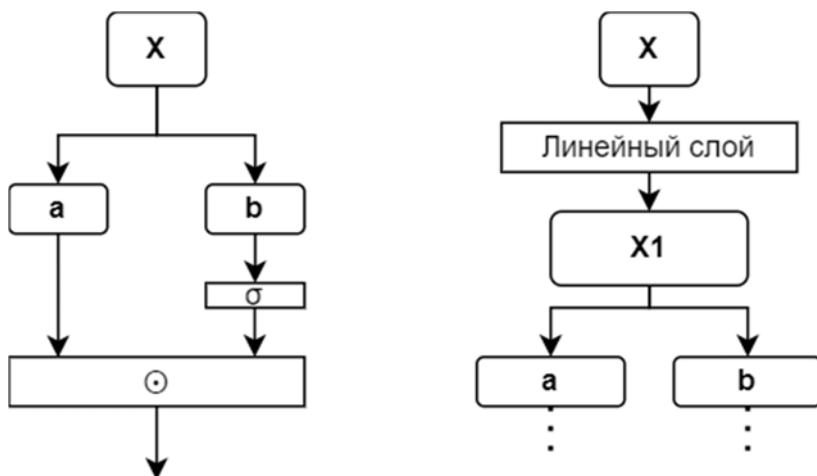


Рис. 2. Слева – исходный блок GLU, справа – используемый в данной имплементации, где разделению входов предшествует линейный слой, увеличивающий вход вдвое по последней оси тензора.

Fig. 2. Left plot - original GLU block, right plot - used in this implementation, where a linear layer is applied before the input split, doubling the input along the last axis of the tensor.

Слой Интерпретируемое Многоголовое Внимание (Interpretable MultiHead Attention) – это модификация стандартного механизма многоголового внимания [8], которая обеспечивает более прозрачную и интерпретируемую работу слоя. Этот блок принимает на вход три вектора: запросы (Q), ключи (K) и значения (V).

Каждый из этих векторов проходит через отдельные линейные преобразования, чтобы получить векторы с размерностью $\left(\frac{d_{model}}{heads}\right)$, где $heads$ – число голов, на которые разбивается вход этого слоя, d_{model} – размерность скрытого состояния модели. Затем происходит процесс «внимания», где каждая голова вычисляет веса «внимания» для каждой пары запросов и ключей, а затем объединяет взвешенные значения из вектора значений, чтобы получить итоговые значения для каждой головы. Далее, все головы объединяются и проходят через линейное преобразование, чтобы получить окончательный выход.

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} + mask\right)V$$

$$head_i, attn_i = Attention(Q, K, V, mask)$$

$$mask = M_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \geq i + encLen, \\ i \in [0, decLen - 1], & j \in [0, encLen + decLen - 1]; \\ 0, & \text{в обратном случае;} \end{cases}$$

$$head = \frac{1}{heads} \sum_{i=0}^{heads-1} head_i, attn = \frac{1}{heads} \sum_{i=0}^{heads-1} attn_i$$

$$preoutput = \frac{1}{heads} \sum_{i=0}^{heads-1} head_{:,i,:} \in \mathbb{R}^{B \times S \times d_v}$$

$$output = w_h(preoutput) \in \mathbb{R}^{B \times S \times d_{model}}$$

где d_{model} – размерность скрытого состояния модели; d_v – размерность вектора значений; d_k – размерность вектора ключей; B – размер пакета (batch size); S – размерность временного шага; i – индекс головы; $head$ – тензор выхода голов; $attn$ – тензор внимания; $mask$ – тензор бинарной маски; $encLen$ – длина энкодера; $decLen$ – длина декодера; w_h – слой линейного преобразования выхода голов; $preoutput$ – среднее арифметическое выходов голов; $output$ – выход слоя. В данной реализации используются отдельные линейные слои для запросов и ключей для каждой из голов, в то время как в стандартной имплементации все головы используют одинаковые линейные преобразования для Q , K и V . Кроме того здесь введен дополнительный слой w_h для объединения выходов голов, а также используется dropout для предотвращения переобучения на выходе данного слоя

$$output = m \odot x,$$

где x – входной тензор; m – бинарная маска, определяющая, какие элементы входного тензора следует обнулить; оператор $\odot$ – поэлементное умножение. При обучении модели бинарная маска генерируется случайным образом с заданной конфигурацией модели вероятностью p для каждого входного тензора, в то время как во время предсказания $dropout$ не применяется.

Помимо архитектуры самой модели, достаточно внимания должно уделяться предобработке входов в модель. Ранее уже отмечалось, что нормализация может улучшить точность модели, поэтому для каждого непрерывного признака данных используется закрепленный за ним нормализатор (StandardScaler), обеспечивающий нормализованное распределение этого признака. Схематично описанный процесс представлен на рис. 3.

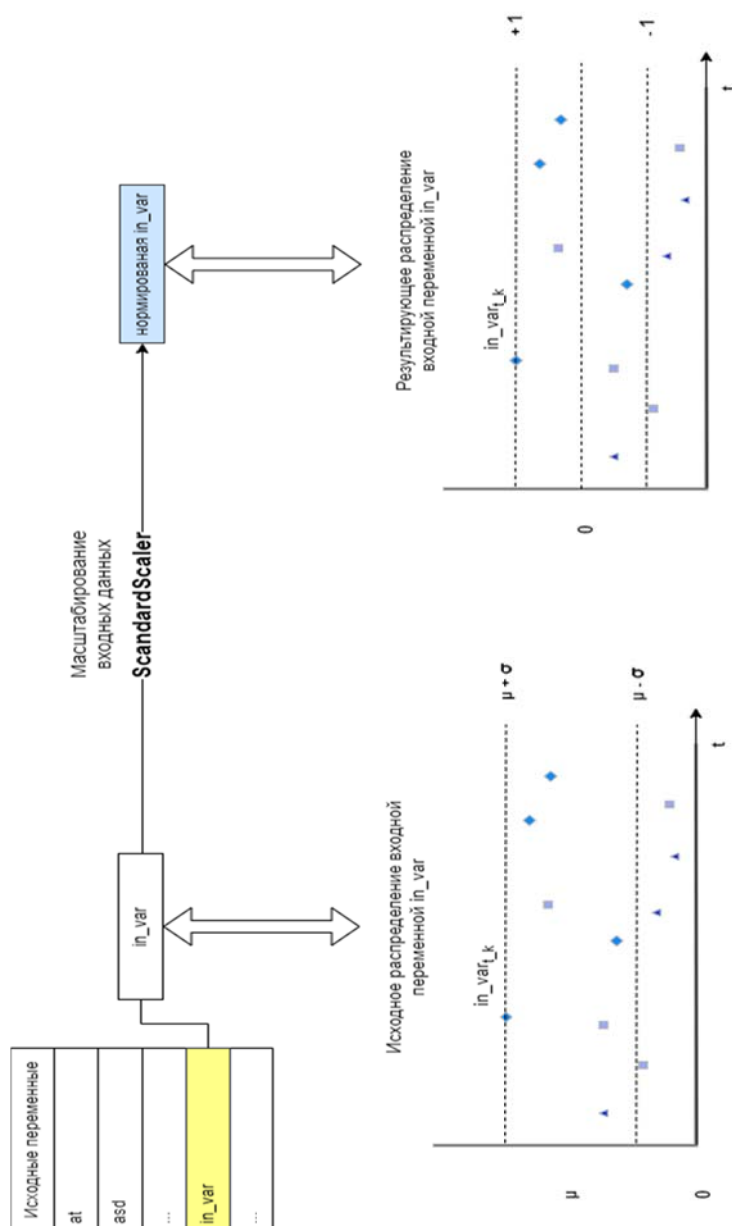


Рис. 3. Схема процесса нормализации входных данных (распределение переменной in_var со средним значением μ и стандартным отклонением σ переходит в стандартное распределение).

Fig. 3. Diagram of the input data normalization process (the distribution of the variable in_var with mean μ and standard deviation σ is transformed into a standard distribution).

В качестве дополнения для целевой переменной мы дополнительно удерживаем эти параметры нормализации (среднее и стандартное отклонение) и подаем их на вход в модель, где они используются для обратного масштабирования выходов модели (рис. 4).

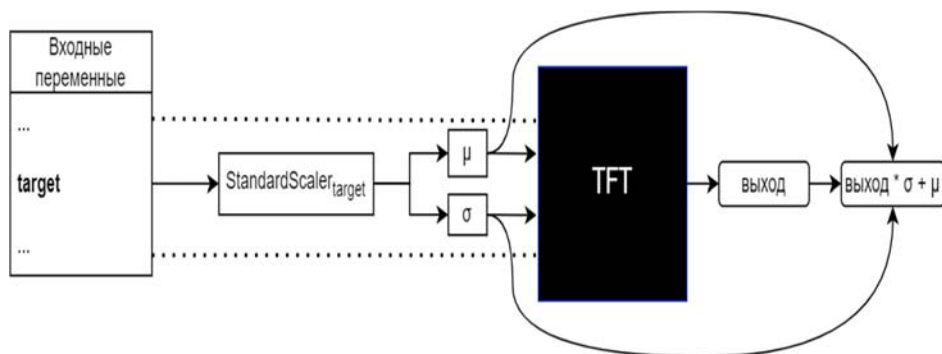


Рис. 4. Графическое представление процедуры преобразования целевой переменной target через соответствующий нормализатор.

Fig. 4. Visual representation of the target variable transformation using the corresponding normalizer.

2. Численная реализация и анализ результатов прогнозов

В качестве объекта численной реализации модифицированной модели TFT были выбраны три водпоста р. Исеть (бассейн речной системы р. Тобол): Катайск, Шадринск, Мехонское, для которых все классические методы долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды оказались безуспешными. В общем виде задача долгосрочного прогноза максимального уровня воды в данном случае формулируется следующим образом. Имея временные ряды нескольких входных переменных, необходимо предсказать уровень воды на каждом временном шаге, интерпретируемом как 1 сутки. В табл. 1–3 представлено описание каждой из используемых переменных.

Все исходные данные для проведения численных экспериментов были представлены ФГБУ «Уральское УГМС» и ФГБУ «Гидрометцентр России». Использовалось следующее пространственное распределение гидрометеорологической информации:

1) гидрологические данные (среднесуточные расход и уровень воды) по водпостам Катайск, Шадринск, Мехонское;

2) метеорологическая информация (суточные температура воздуха, высота снежного покрова, скорость ветра, температура точки росы, сумма осадков, относительная влажность в %) по метеостанциям Далматово, Шадринск, Шатрово, Курган.

В зависимости от наличия пропусков и их количества, а также характера индивидуального поведения кривой какой-либо из переменных, для

заполнения данных использовались линейная, бикубическая интерполяции или же сплайны.

Таблица 1. Список исходных переменных, полученных из исходных данных, и их преобразование

Table 1. List of input features derived from the source data and their transformations

Кодировка	Физический смысл	Расчетная формула
at_N_h	Температура воздуха N часов, °C	–
at	Температура воздуха среднесуточная, °C	$\frac{1}{M} \sum_{\text{в течение суток}} at_N_h$
asd	Среднесуточная высота снежного покрова, см	–
ws_N_h	Средняя скорость ветра в срок наблюдения (каждые h часов), м/с	–
awspd	Среднесуточная скорость ветра, м/с	$\frac{1}{M} \sum_{\text{в течение суток}} ws_N_h,$
dpt_N_h	Температура точки росы в срок наблюдения, °C	–
dpt	Среднесуточная температура точки росы, °C	$\frac{1}{M} \sum_{\text{в течение суток}} dpt_N_h$
ps_N_h	Сумма осадков за период между сроками h часов, м	–
psbd	Сумма осадков за сутки, мм	$\frac{1}{M} \sum_{\text{в течение суток}} ps_N_h$
rhp_N_h	Относительная влажность в срок наблюдения (h часов), %	–
rhp	Среднесуточная влажность, от 0.0 до 1.0	$\frac{1}{M \cdot 100} \sum_{\text{в течение суток}} rel_hum_N_h$
flow	Среднесуточный расход воды, м3/сек	–
level	Среднесуточный уровень воды, в см над «0» графика поста	–

Примечание. M – количество показаний.

Таблица 2. Список дополнительно введенных переменных
Table 2. List of additional introduced features

Кодировка	Расчетная формула
month	Взятие месяца из текущей даты
month_x	$\sin(2\pi \cdot \text{month}/12)$
month_y	$\cos(2\pi \cdot \text{month}/12)$
day	Взятие дня из текущей даты с начала текущего года
day_x	$\sin(2\pi \cdot \text{day}/365) \mid \sin(2\pi \cdot \text{day}/366)$
day_y	$\cos(2\pi \cdot \text{day}/365) \mid \cos(2\pi \cdot \text{day}/366)$
relative_time_idx	$\frac{t}{\max_encoder_len'}$ где t – позиция временного шага, $\max_encoder_len$ – максимальная длина энкодера (входная длина)
level_scale	$\frac{\sigma(\text{level}) - \mu_{\text{level_scale}}}{\sigma_{\text{level_scale}}},$ где $\sigma(\text{level})$ – взятие стандартного отклонения для текущего входного временного ряда level длиной encoder_length; $\mu_{\text{level_scale}}$ и $\sigma_{\text{level_scale}}$ – среднее и стандартное отклонение по всей выборке; последнее рассчитывается по совокупности стандартных отклонений посчитанных на группах длиной encoder_length + decoder_length
level_center	$\frac{\mu(\text{center}) - \mu_{\text{level_center}}}{\sigma_{\text{level_center}}},$ где $\mu(\text{level})$ – взятие среднего для текущего входного временного ряда level длиной encoder_length; $\mu_{\text{level_center}}$ и $\sigma_{\text{level_center}}$ – среднее и стандартное отклонение среднего по всей выборке; последнее рассчитывается по совокупности средних посчитанных на группах длиной encoder_length + decoder_length.
encoder_length	Длина входного временного ряда
region	Закодированное (в целых числах) имя водпоста

Каждый из гидрологических постов ассоциировался с данными одной или нескольких метеостанций и группировка по дате с усреднением характеристик. В наших расчетах использовалось соответствие, приведенное в табл. 4.

Все модели обучались на зависимой выборке с 1991 по 2017 г. (27 лет) и валидировались на независимой выборке 2018–2022 гг. (5 лет) с одинаковыми параметрами обучения, представленными в табл. 5.

Таблица 3. Типы переменных, подаваемых на вход модифицированной модели**Table 3.** Feature types list for the modified model

Кодировка переменной	Тип переменной
encoder_length	Статическая непрерывная
level_center	Статическая непрерывная
level_scale	Статическая непрерывная
time_idx	Временная непрерывная, известная заранее
relative_time_idx	Временная непрерывная, известная заранее
at	Временная непрерывная, наблюдаемая
asd	Временная непрерывная, наблюдаемая
awspd	Временная непрерывная, наблюдаемая
dpt	Временная непрерывная, наблюдаемая
psbd	Временная непрерывная, наблюдаемая
rhp	Временная непрерывная, наблюдаемая
level	Временная непрерывная, наблюдаемая
flow	Временная непрерывная, наблюдаемая
month	Временная категориальная, известная заранее
month_x	Временная непрерывная, известная заранее
month_y	Временная непрерывная, известная заранее
day_x	Временная непрерывная, известная заранее
day_y	Временная непрерывная, известная заранее
region	Статическая категориальная

Таблица 4. Соответствие данных наблюдений по исходным водпостам и ассоциированным метеостанциям**Table 4.** Mapping of observation data between stream gauging stations and associated weather stations

Водпост	Ассоциированные метеостанции
Катайск	Далматово
Шадринск	Шадринск
Мехонское	Шатрово, Курган, Шадринск

В качестве оптимизатора был использован Adam (Adaptive moment estimation) с параметрами $\epsilon = 10^{-8}$, $\beta_0 = 0,9$, $\beta_1 = 0,999$, а в качестве функции потерь Quantile Loss [7].

Таблица 5. Общие гиперпараметры для обучения моделей
Table 5. General model hyperparameters

Название гиперпараметра	Описание	Значение
batch_size	Размер пакета при обучении	256
max_epochs	Максимальное количество эпох при обучении	20
learning_rate	Скорость обучения	1e-4
reduce_lr_every_n_epochs	Частота снижения скорости обучения	4
lstm_layers	Количество слоев LSTM	2
lr_scheduler_gamma	Коэффициент затухания скорости обучения	0.15
hidden_size	Размер скрытого слоя	256
hidden_continuous_size	Размер скрытого слоя для непрерывных признаков	256
attention_head_size	Число голов внимания	8
Params	Количество обучаемых параметров, млн	8,9

Дополнительно по запросу ФГБУ «Уральское УГМС» в 2023 г. был выпущен оперативный прогноз максимальных уровней воды с использованием оперативных данных гидрометеорологических наблюдений в бассейне р. Исеть. Выпуск оперативного прогноза проводился с теми же гиперпараметрами, что и для других лет наблюдений.

Реализация модели для всех указанных расчетных лет проводилась для двух вариантов конфигурации обучения модели с суточным интервалом по времени:

- первый вариант (Var. I) – это 90 суточных значений до даты прогноза на входе и 60 суточных значений после даты прогноза на выходе;
- второй вариант (Var. II) – 90 значений на входе и 90 значений на выходе.

Оправдываемость долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды оценивалась по следующим критериям:

• $\Delta_i^j = \frac{abs(y_i^j - \widehat{y}_i^j)}{\Delta_{доп}}$ – относительная ошибка прогноза максимального уровня воды при заданной его допустимой погрешности для j -го водпоста и i -го года, где y_i^j – фактическое значение уровня; $\widehat{y}_i^j$ – его предсказанное значение; $\Delta_{доп}$ – допустимое значение погрешности прогноза максимального уровня для каждого j -го водпоста, заданное ФГБУ «Уральское УГМС». Оправданность прогноза максимального уровня определяется принадлежностью оценки Δ_i^j по каждому водпосту для одного из четырех интервалов ($K_i^j(s)$): $[0, 0.4)$ – отлично ($s = 1$); $[0.4, 0.7)$ – хорошо ($s = 2$); $[0.7, 1.0)$ – удовлетворительно ($s = 3$); $[1.0, +\infty)$ – неудовлетворительно ($s = 4$);

• $\Delta_i^t(j) = abs(T_{mi} - T_{mfi})$ – абсолютная ошибка даты наступления максимального уровня воды для каждого j -го водпоста по каждому прогнозируемому i -му году (в сутках), где $T_{mi}(j)$, $T_{mfi}(j)$, – соответственно, даты наблюдаемого и прогнозируемого максимумов на j -м водпосту для i -го года.

В табл. 6 приведены результаты количественной оценки долгосрочных прогнозов максимального уровня воды для трех водпостов р. Исеть по двум вариантам конфигурации модели (Var. I, Var. II) при следующих допустимых значений погрешности прогноза, полученных из ФГБУ «Уральское УГМС»: 1) Катайск – 80 см; 2) Шадринск – 69 см; 3) Мехонское – 56 см. Графическое сопоставление фактических и предсказанных среднесуточных значений уровней воды по трем водпостам представлены на рис. 5–7.

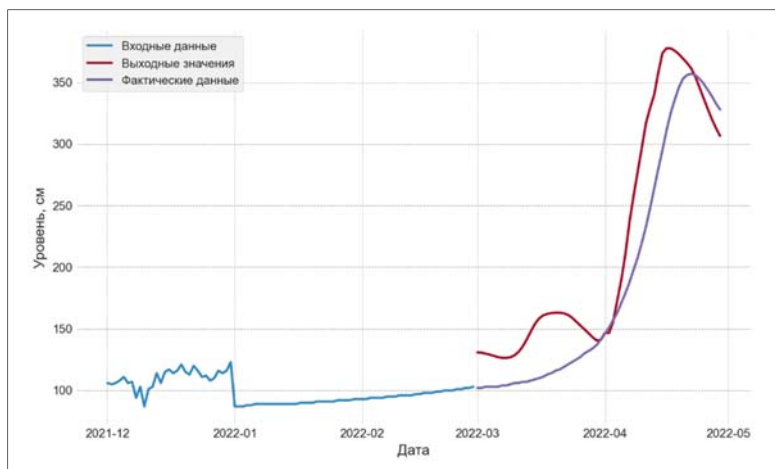


Рис. 5. Фактические и предсказанные значения уровней воды для водпоста Катайск (2022 г.)

Fig. 5. Actual and predicted water level values for the Kataysk stream gauging station (2022 year).

Таблица 6. Значения количественных критериев оценки качества выпущенных долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды р. Исеть с использованием модифицированной модели TFT
Table 6. Quantitative evaluation criteria values for the long-term forecasts of maximum water levels of the Iset River using the modified TFT mode

Название водпоста	Расчетный прогнозный год	Δ_i^j		Качественная оценка прогнозов по интервальной принадлежности их отн. ошибки ($K_i^j(s)$)		Число прогнозов, которые оправдались по данным для независимой выборки, в %		$\Delta_i^j(j)$, в сут		Средн. арифм. абсолют. ошибка прогнозной даты наступления макс. уровня воды, в сут	
		Var. I	Var. II	Var. I	Var. II	Var. I	Var. II	Var. I	Var. II		
Оценки для независимой выборки (2018-2022 гг.)											
Катайск	2018	1,1	2,4	4	4	60%	20%	11	12	9	10
	2019	0,5	2,4	2	4			5	9		
	2020	0,3	3,4	1	4			12	17		
	2021	1,5	0,7	4	3			6	7		
	2022	0,6	1,9	2	4			9	6		
Шадринск	2018	0,6	2,0	2	4	60%	40%	2	1	15	15
	2019	1,2	0,1	4	1			1	3		
	2020	0,7	2,5	3	4			16	18		
	2021	1,4	0,3	4	1			5	5		
	2022	0,2	2,5	1	4			50	49		
Мехонское	2018	0,5	0,9	2	3	60%	80%	3	2	10	9
	2019	2,8	0,7	4	3			3	1		
	2020	0,1	1,4	1	4			16	19		
	2021	2,1	0,5	4	2			4	2		
	2022	0,2	0,1	1	1			24	21		
Оценки оперативных прогнозов по данным за 2023 г.											
Катайск	2023	0,7	2,1	3	4	67%	67%	17	20	19	20
Шадринск	2023	1,7	0,6	4	2			18	22		
Мехонское	2023	0,3	0,1	1	1			21	18		

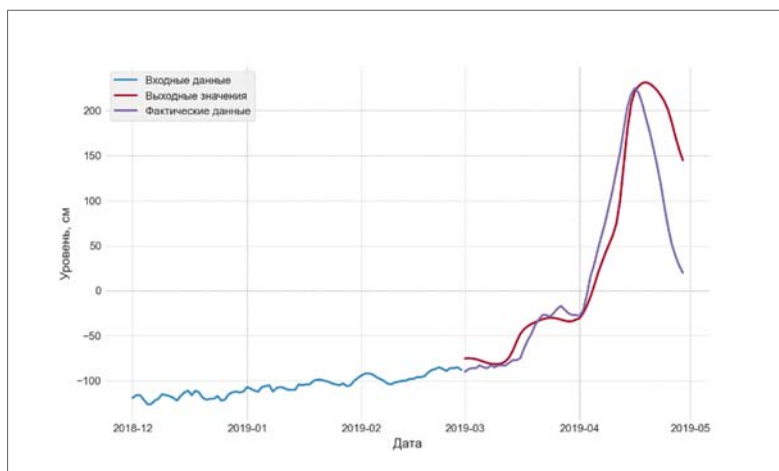


Рис. 6. Фактические и предсказанные значения уровней воды для водпоста Шадринск (2019 г.)

Fig. 6. Actual and predicted water level values for the Shadrinsk stream gauging station (2019 year).

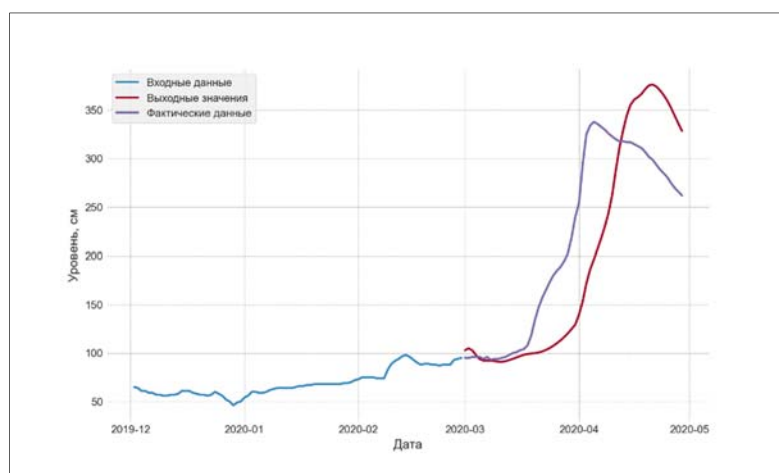


Рис. 7 Фактические и предсказанные значения уровней воды для водпоста Мехонское (2020 г.)

Fig. 7. Actual and predicted water level values for the Mekhonskoye stream gauging station (2020 year).

Заключение

Несмотря на пока еще крайне ограниченный объем выполненных численных экспериментов уже сейчас можно с уверенностью сказать, что использование ANN в ближайшем будущем позволит существенно пересмотреть наши представления о возможностях методов гидрологических

прогнозов водного режим. Неслучайно эта область выделена как одна из ведущих в рамках реформирования оперативной гидрологии, входящей в группу системных и структурных изменений ВМО ООН.

Целесообразно в общем виде выделить несколько комплексных перспективных направлений, связанных с реализацией алгоритмов глубокого машинного обучения для развития гидрологических прогнозов:

1. Расширение в использовании новой гидрологической информации при обучении исходной модели. В частности, примером такой информации могут служить данные измерения уровней грунтовых вод, которые измеряются на стационарных скважинах системы Роснедра, хорошо отражают увлажненность водосбора, реально доступны при решении некоторых организационных процедур и в силу своей комплексности могут заменить ряд гидрометеорологических характеристик, использованных при ее обучении.

2. Постепенный переход к использованию модели TFT для краткосрочных прогнозов водного режима с значительным расширением ее пространственного использования по территории Российской Федерации, а также в задачах долгосрочного прогноза минимального уровня воды в период межени.

3. Существенно более глубокий численный анализ возможностей используемой модели за счет: а) введение статистических переменных на период заблаговременности прогноза в виде месячной нормы осадков / прогнозной месячной величины осадков; б) независимое обучение модели по каждому водпосту; в) использование для обучения модели данных по максимальным уровням воды, фиксируемым сотрудниками УГМС, которые в ряде случаев существенно отличаются от среднесуточных значений, публикуемых в гидрологических ежегодниках; г) привлечение в качестве входных данных результатов численных прогнозов метеоэлементов по моделям циркуляции атмосферы, а также спутниковых снимков территории водосбора.

Можно предположить, что уже завтра указанный перечень окажется далеко неполным, учитывая стремительность обновления информации, связанной с развитием ANN.

Список литературы

1. Романов А.В. Дорожная карта современных гидрологических прогнозов водного режима // Метеорология и гидрология. – 2023 (в печати).
2. Bhanja S., Das A. Impact of data normalization on deep neural network for time series forecasting // arXiv preprint arXiv:1812.05519, 2018.
3. Caldas F.M., Soares C.A Temporal Fusion Transformer for Long-term Explainable Prediction of Emergency Department Overcrowding // Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases: International Workshops of ECML PKDD 2022, Grenoble, France, September 19–23, 2022, Proceedings, Part I. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. С. 71-88.
4. Dauphin Y.N. et al. Language modeling with gated convolutional networks // International conference on machine learning. PMLR, 2017. С. 933-941.

5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735-1780.
6. jdb78, Temporal Fusion Transformer, [Online]. Available: https://github.com/jdb78/pytorch-forecasting/tree/master/pytorch_forecasting/models/temporal_fusion_transformer. [Accessed: Feb. 16, 2023].
7. Lim B. et al. Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting // *International Journal of Forecasting*. 2021. Vol. 37, no. 4. P. 1748-1764.
8. Vaswani A. et al. Attention is all you need // *Advances in neural information processing systems*. 2017. T. 30.

References

1. Romanov A.V. Dorozhnaya karta sovremennykh gidrologicheskikh prognozov vodnogo rezhima. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2023 – in print [in Russ.].
2. Bhanja S., Das A. Impact of data normalization on deep neural network for time series forecasting. arXiv preprint arXiv: 1812.05519, 2018.
3. Caldas F.M., Soares C.A Temporal Fusion Transformer for Long-term Explainable Prediction of Emergency Department Overcrowding. *Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases: International Workshops of ECML PKDD 2022*, Grenoble, France, September 19–23, 2022, Proceedings, Part I. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 71-88.
4. Dauphin Y.N. et al. Language modeling with gated convolutional networks // *International conference on machine learning*. PMLR, 2017, pp. 933-941.
5. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780.
6. jdb78, Temporal Fusion Transformer, [Online]. Available: https://github.com/jdb78/pytorch-forecasting/tree/master/pytorch_forecasting/models/temporal_fusion_transformer. [Accessed: Feb. 16, 2023].
7. Lim B. et al. Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 1748-1764.
8. Vaswani A. Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 2017, vol. 30.

Поступила 15.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 15.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-156-173>

УДК 504.3.054

Изменения кадастровых данных о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ в московском регионе

Д.В. Борисов, И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
lbj23.98@mail.ru*

Для планируемой модификации технологии прогнозирования качества воздуха за счет перехода к новой версии ХТМ CHIMERE проведен сравнительный анализ эмиссий ЕМЕР-2020 с используемыми в настоящее время данными о выбросах загрязнителей в атмосферу ЕМЕР-2013. Выявлено снижение в последние годы суммарного объема эмиссий на территории московского региона на 40 %, установлено их пространственное перераспределение и изменение вкладов отраслевых источников в суммарный выброс. Больше всего в ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 изменен вклад эмиссий автотранспорта (увеличен до 58 %) и вклад эмиссий от промышленного сжигания (увеличен до 27 %). Особый интерес представляет сравнение кадастровых эмиссий в 2019 и 2020 гг.; обнаружено небольшое уменьшение суммарных эмиссий (на 1–6 %) в 2020 г., что адекватно соотносится с ограничительными мероприятиями в период пандемии COVID-19.

Представлены и обсуждаются результаты сравнений данных о выбросах в атмосферу Росприроднадзора и ЕМЕР-2019 на территории Москвы; установлено совпадение суммарных эмиссий при отличиях в пространственном и отраслевом распределении. Разработанные алгоритмы сравнительного анализа данных ЕМЕР и Росприроднадзора универсальны, могут применяться для анализа обновленных данных на любых территориях.

Ключевые слова: эмиссии ЕМЕР, химическая транспортная модель, CHIMERE, данные Росприроднадзора, пандемия COVID-19

Changes in inventory data on pollutant emissions into the atmosphere over the Moscow region

D.V. Borisov, I.N. Kuznetsova, M.I. Nakhaev

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
lbj23.98@mail.ru*

For the planned modification of the air quality forecasting technology due to the transition to the new version of the CHIMERE chemical transport model, the updated EMEP-2020 emission data for the Moscow region were compared with the currently used EMEP-2013 data on emissions of priority pollutants into atmosphere. A 40 % decrease in the total volume of emissions has been revealed over the Moscow region in recent years, their spatial redistribution and changes in the contributions of industry sources to the total emission have been established. In EMEP-2020, as compared to EMEP-2013, the contribution of vehicle emissions and emissions from industrial combustion changed the most:

it increased up to 58 and 27%, respectively. The comparison of 2019 and 2020 emissions is of particular interest: the inventory data revealed a slight decrease in total emissions (by 1–6 %) in 2020, which adequately correlates with restrictive measures during the COVID-19 pandemic.

The results of comparisons of the data on emissions into the atmosphere on the territory of Moscow according to Rosprirodnadzor and EMEP-2019 are presented and discussed. The coincidence of total emissions was established, with differences in spatial and sectoral distributions. The developed algorithms for the comparative analysis of EMEP and Rosprirodnadzor data are universal and can be used to analyze updated information in any regions.

Keywords: EMEP emissions, chemical transport model, CHIMERE, Rosprirodnadzor, COVID-19 pandemic

Введение

Действующая в ФГБУ «Гидрометцентр России» технология прогнозирования качества атмосферного воздуха для территории московского региона базируется на химической транспортной модели (XTM) CHIMERE и системе COSMO-Ru2ART [3, 5, 6]. Расчеты концентраций загрязняющих веществ проводятся с использованием прогностических метеорологических данных мезомасштабной модели COSMO-Ru с пространственным разрешением 2.2 км [<https://meteoinfo.ru/cosmo-maps>]. Одна из входящих в технологию моделей – XTM CHIMERE – включена в технологию благодаря открытому доступу к исходному коду [<https://www.lmd.polytechnique.fr/>], а также постоянному усовершенствованию разработчиками этой модели, дающему возможность пользователям применять различные настройки, в частности подключать данные различных атмосферных моделей, корректировать данные землепользования и эмиссий и др. [9–11]. К тому же авторы планируют переход на использование в технологии прогнозирования качества воздуха также находящейся в открытом доступе последней версии CHIMEREv2020 [12].

Для технологических расчетов используются данные антропогенных эмиссий кадастра ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme) и биогенных эмиссий [<https://www.emep.int/>]. Данные ЕМЕП представлены на регулярной сетке, находятся в свободном доступе и, что важно для пользователей, позволяют проводить региональную коррекцию [13]. В ранее опубликованных авторами публикациях обсуждались способы и эффективность коррекции кадастровых данных, обнаруженной в уменьшении модельных ошибок величин концентраций загрязняющих веществ [1, 8]. Оценка качества модельных прогнозов концентраций загрязняющих веществ проводится путем сравнения модельных концентраций с данными измерений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/>).

Появление новых данных эмиссий в ЕМЕП происходит с задержкой около двух лет. Сегодня доступна информация о выбросах в атмосферу в 2020 г. (ниже ЕМЕП-2020). В кадастре последних лет данные представлены в обновленном формате: увеличено разрешение сетки до $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,

расширена номенклатура отраслевых источников загрязнения. До обновления в ЕМЕР использовалась номенклатура 11 отраслевых источников SNAP (Selected Nomenclature for sources of Air Pollution), в обновленном формате представляются данные о выбросах уже 15 источников GNRF (General Nomenclature for Reporting).

В действующей технологии прогноза качества воздуха расчеты ХТМ пока выполняются с использованием данных об эмиссиях ЕМЕР 2013 года (далее ЕМЕР-2013), представленных на сетке $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Намерение перейти на усвоение эмиссий ЕМЕР последнего выпуска должно получить обоснование целесообразности этой процедуры по результатам сравнения данных используемого кадастра ЕМЕР-2013 с актуализированным кадастром ЕМЕР-2020. При этом необходимо принимать во внимание специфические особенности 2020 года в связи с сокращением выбросов в атмосферу в период пандемии COVID-19. Ограничения работы промышленных предприятий и транспорта с соответственным сокращением эмиссий в 2020 г. были характерны и для московского региона [2, 4]. Это обстоятельство послужило причиной проведения анализа данных ЕМЕР предшествующего 2019 года.

Представленное исследование посвящено сравнительному анализу данных об эмиссиях на территории московского региона, представленных в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020. Также проведен сравнительный анализ данных ЕМЕР-2019 с открытыми данными Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор, ниже РПН) о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ на территории Москвы в 2019 году [7].

Данные и методы исследования

В рамках исследований выполнен сравнительный анализ отраслевых эмиссий шести приоритетных загрязнителей воздуха: оксид углерода (CO), аммиак (NH_3), неметановые летучие органические соединения (NMVOC), оксиды азота (NO_x), взвешенные частицы ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , $\text{PM}_{\text{coarse}}$), оксиды серы (SO_x).

Необходимо отметить, что на сайте ЕМЕР доступны данные о выбросах на территории московского региона 2013 года актуализации в обновленном формате, соответствующем формату данных ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020. Однако, поскольку ранее авторами проводился анализ эмиссий на территории московского региона кадастра ЕМЕР-2013, представленных по 11 отраслевым источникам (SNAP) на сетке $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ [8], с целью упрощения сравнительного анализа принято решение о переводе данных ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 на регулярную сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Кроме того, данные отраслевых источников выбросов ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 перераспределены под номенклатуру SNAP кадастра ЕМЕР-2013 (табл. 1).

Анализ временной и пространственной динамики количества выбросов проводился по 6 ячейкам регулярной сетки $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, охватывающим территорию московского региона (рис. 1).

Таблица 1. Соответствие отраслевых источников выбросов в атмосферу в кадастрах ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2013**Table 1.** Correspondence of air emissions industry sources in the ЕМЕР-2019 and ЕМЕР-2013 inventories

ЕМЕР-2019 (GNRF)			ЕМЕР-2013 (SNAP)	
A	PublicPower	Энергетика	S1	Сжигание в энергетической промышленности
C	OtherStationary Comb	Другое стационарное сжигание	S2	Сжигание на непромышленных заводах
B	Industry	Промышленность	S3	Сжигание в обрабатывающей промышленности
D	Fugitive	Летучие вещества	S5	Извлечение и распределение ископаемого топлива и геотермической энергии
E	Solvents	Растворители	S6	Использование растворителей
F	RoadTransport	Дорожный транспорт	S7	Автомобильный транспорт
I	Offroad	Внедорожный транспорт		
G	Shipping	Судоходство	S8	Другие мобильные источники и механизмы
H	Aviation	Авиация		
O	AviCruise	Гражданская авиация		
P	IntShipping	Внутреннее судоходство		
J	Waste	Отходы	S9	Переработка отходов и утилизация
K	AgriLivestock	Животноводство	S10	Сельское хозяйство
L	AgriOther	Другое сельское хозяйство		
N	Natural	Природные отходы	S11	Другие источники (естественные и биогенные источники)

Следует отметить особенности представления имеющихся за 2019 г. (более поздних – нет) данных в РПН, учитывая поставленную цель сравнения их с данными ЕМЕР. В базе данных РПН-2019 имеется информация об антропогенных выбросах в атмосферу на территории Москвы приоритетных загрязнителей: CO, NH₃, NMVOC, NO_x, PM (сумма всех трех фракций), SO_x. Здесь содержатся данные о выбросах от стационарных источников, полученные из отчетов формы 2ТП-воздух и распределенные по административным округам Москвы и видам экономической деятельности (ОКВЭД). Отдельно представлены данные о выбросах загрязняющих веществ автотранспортом на территории Москвы, но, в отличие от стационарных источников, суммарно для территории города.

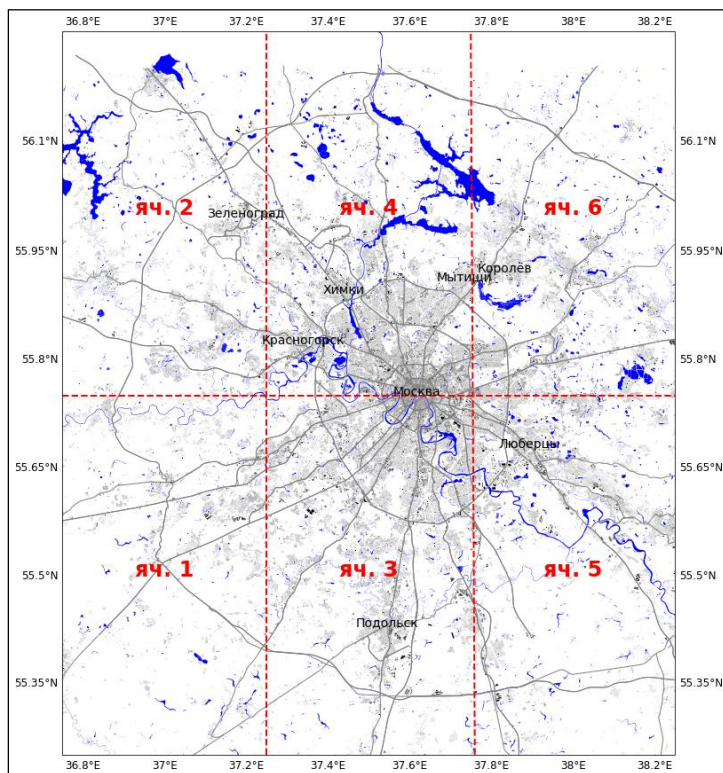


Рис. 1. Ячейки кадастра ЕМЕР-2013, охватывающие территорию московского региона (красным цветом показана сетка ЕМЕР-2013 и условные номера ячеек).

Fig. 1. EMEP-2013 inventory cells covering the territory of the Moscow region (EMEP-2013 grid and cell numbers are shown in red).

На подготовительном этапе эмиссии стационарных источников в ячейках ЕМЕР-2019 ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$) были перераспределены по административным округам Москвы пропорционально доле пересечения территории ячейки и территории административного округа от площади ячейки.

Сравнение суммарных по территории Москвы эмиссий автотранспорта по данным РПН проводилось по представленным в ЕМЕР-2019 данным отраслевого источника F (RoadTransport, табл. 1). Разработанный алгоритм сравнения данных ЕМЕР в обновленном формате с данными РПН универсален, может применяться при анализе актуализированных данных РПН и для других территорий.

Подготовительная обработка представленных в кадастре ЕМЕР и РПН данных, последующий сравнительный анализ данных проводились с использованием языка программирования Python и подключаемых к нему библиотек Pandas, Numpy и Glob. Для построения визуализаций использовались библиотеки Matplotlib, Geopandas, Cartopy, Shapely.

Обсуждение результатов

Суммарные выбросы. Анализ изменений суммарного объема выбросов по рассматриваемой территории (рис. 1) показал снижение объема выбросов в ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 на 37 % и 40 % соответственно (табл. 2). Основной вклад в снижение суммарного объема выбросов в обоих кадастрах внесли эмиссии РМ всех трех фракций. Также в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 суммарные эмиссии CO, NMVOC, NOx снижены на 30–40 % и увеличены эмиссии NH₃ на 25 % и 18 % соответственно. И только выбросы SOx практически не изменились.

Таблица 2. Суммарные объемы выбросов приоритетных загрязнителей на территории Москвы в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020

Table 2. Total emissions of priority pollutants in the territory of Moscow region in the ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 and ЕМЕР-2020 inventories

	CO, тыс. т	NH ₃ , тыс. т	NMVOC, тыс. т	NOx, %	PM10, %	PM2.5, %	PMcoarse, %	SOx, %	Сумма
ЕМЕР-2013	622317	7653	200408	218020	86123	62907	23215	76199	1296842
ЕМЕР-2019	388577	9528	146516	150699	19434	15422	8088	78427	816691
ЕМЕР-2020	364829	9039	143525	145068	19641	15288	8478	75609	781476
Доля ЕМЕР-2013	48	1	15	17	7	5	2	6	100
Доля ЕМЕР-2019	48	1	18	18	2	2	1	10	100
Доля ЕМЕР-2020	47	1	18	19	3	2	1	10	100
Разница ЕМЕР-2013 ЕМЕР-2019	-38	+25	-27	-31	-77	-75	-65	+3	-37
Разница ЕМЕР-2013 ЕМЕР-2020	-41	+18	-28	-33	-77	-76	-63	-1	-40
Разница ЕМЕР-2019 ЕМЕР-2020	-6	-5	-2	-4	+1	-1	+5	-4	-4

Установлено небольшое уменьшение (на 1–6 %) суммарных эмиссий приоритетных загрязняющих веществ на территории региона в ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2019, что, по-видимому, отражает ограничительные мероприятия в период пандемии COVID-19 в Москве и области [4]. Можно также отметить незначительное уменьшение в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 доли выбросов PM10 и PM2.5 (на 2–3 %) на фоне увеличения доли выбросов NMVOC (на 3 %) и SOx (на 4 %).

Структурные изменения эмиссий отраслевых источников. Наиболее существенные изменения в последних версиях ЕМЕР по сравнению с ЕМЕР-2013 коснулись выбросов автотранспорта (SNAP7) и выбросов от сжигания в обрабатывающей промышленности (SNAP3). В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 вклад эмиссий SNAP7 в суммарный выброс увеличен почти в 2 раза – до 58 %, SNAP3 – до 27 % (рис. 2).

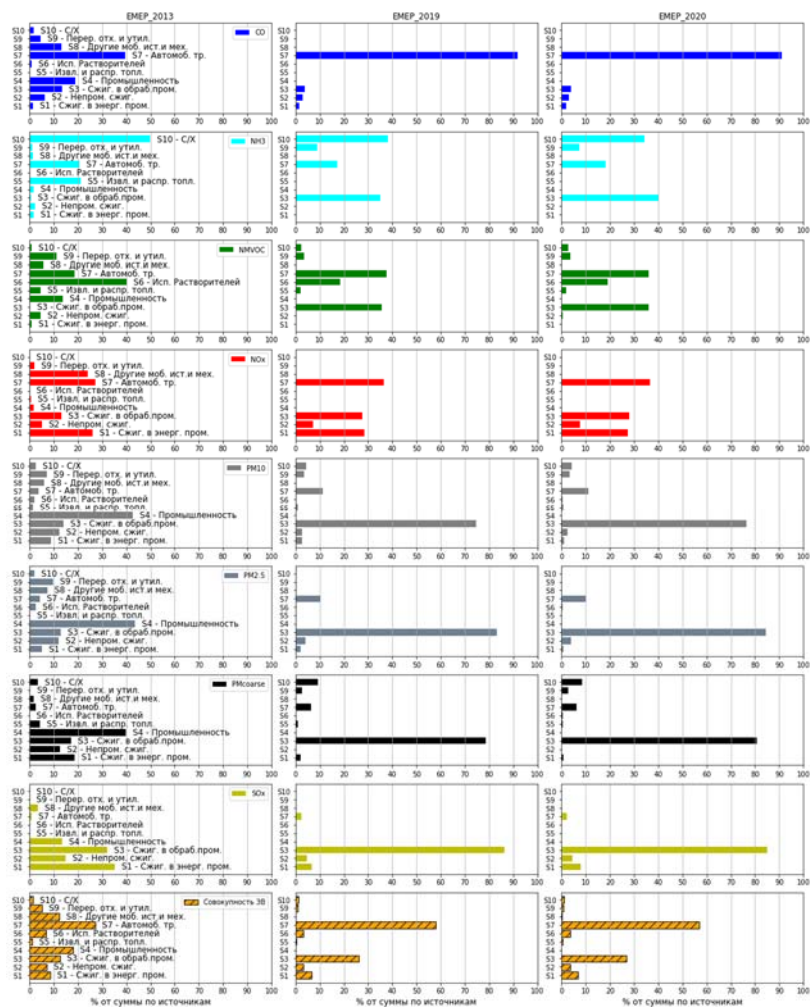


Рис. 2. Распределение эмиссий загрязняющих веществ CO, NH₃, NMVOC, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{coarse}, SO_x (сверху вниз) и суммарных выбросов (нижние рисунки) отраслевых источников по территории Москвы в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020. Номенклатура отраслевых источников SNAP показана в табл. 1.

Fig. 2. Distribution of emissions of pollutants CO, NH₃, NMVOC, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{coarse}, SO_x (from top to bottom) and total emissions (bottom figures) from industry sources over the territory of Moscow region in the EMEP-2013, EMEP-2019 and EMEP-2020. The nomenclature of industry sources of SNAP is shown in table 1.

Отметим, источник SNAP4 (Промышленность) отсутствует в матрице конвертации номенклатур ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020, а источнику SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) по номенклатуре GNRf соответствует источник «Industry» (Промышленность). По-видимому, в кадастрах ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 выбросы SNAP4 были учтены в номенклатуре GNRf «Industry» и при конвертации перешли в SNAP3. Кроме того, в данных ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 практически отсутствуют выбросы источника SNAP8 (Другие мобильные источники и механизмы); сделано предположение, что выбросы этого источника перенесены в SNAP7. Такие преобразования можно связать с установленным существенным увеличением в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с данными ЕМЕР-2013 доли выбросов источников SNAP7 и SNAP3.

Сравнение суммарных эмиссий отраслевых источников загрязнителей ЕМЕР-2020 и ЕМЕР-2019 показало практически отсутствие разницы между ними (табл. 2, рис. 2).

Ниже перечислены особенности межгодовой динамики эмиссий приоритетных загрязнителей от отраслевых источников.

СО. В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 в суммарном объеме выбросов СО доля SNAP7 (Автомобильный транспорт) увеличена до 92 %, в ЕМЕР-2013 она составляла 40 % (рис. 2).

NH₃. В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 отсутствует источник SNAP5 (Извлечение и распределение ископаемого топлива и геотермической энергии), а в ЕМЕР-2013 вклад SNAP5 составлял 21 % в суммарный объем выбросов. В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 значительно возрос вклад в суммарный выброс источника SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) до 35 % и 40 % соответственно. В ЕМЕР-2013 выбросы NH₃ источника SNAP3 отсутствуют.

NMVOС. В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 снижен вклад до 19 % источника SNAP6 (Использование растворителей); в ЕМЕР-2013 он составлял 40 %.

NO_x. Изменения эмиссий отраслевых источников NO_x соответствуют реальным тенденциям: в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 вклад источника SNAP7 (Автомобильный транспорт) увеличен до 37 %, что почти на 10 % больше по сравнению с ЕМЕР-2013; почти вдвое увеличена доля выбросов SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) – до 28 %.

PM (все три фракции). В ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 существенно увеличен вклад источника SNAP3 до 75–84% при 13–17% в ЕМЕР-2013; резко снижены (до 1–4 %) вклады источников SNAP1 (Сжигание в энергетической промышленности) и SNAP2 (Сжигание на непромышленных заводах). Вклад источника SNAP7 в выбросах PM в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 увеличился до 6–11 % (рис. 2).

SO_x. Как и по выбросам PM, в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 резко увеличен вклад выбросов SNAP3 (Сжигание в обрабатывающей промышленности) – до 85 %, в ЕМЕР-2013 доля этого источника в суммарном объеме выбросов SO_x составляла 32 %. Обоснованность такого перераспределения, на наш

взгляд, не имеет практического обоснования. В последних версиях ЕМЕР, напротив, резко уменьшен вклад SNAP1 и SNAP2 (Сжигание) в суммарные выбросы SOx – до 4–8 %.

Пространственное перераспределение суммарных по источникам эмиссий. Анализ пространственного распределения суммарных эмиссий в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 показал существенные изменения в их распределении по территории московского региона по сравнению с ЕМЕР-2013. На рис. 3 в каждой из 6 ячеек ЕМЕР $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ представлены доли эмиссий загрязняющих веществ от суммарного по территории объема выбросов в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020.

Перед анализом пространственных преобразований эмиссий в последних версиях кадастров ЕМЕР заметим, что в ранее опубликованных авторами работах подчеркивалось наличие в данных ЕМЕР-2013 ярко выраженного максимума эмиссий автотранспорта в юго-западной части Москвы, также была показана целесообразность коррекции и выравнивания суммарных эмиссий в северной и южной частях московского домена [8]. По результатам проведенного анализа установлено, что в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 имеются существенные изменения в пространственном и количественном распределении эмиссий загрязняющих веществ; отметим наиболее заметные:

- в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 на юго-западе Москвы (ячейка 1) суммарные эмиссии сокращены в 5 раз по сравнению с ЕМЕР-2013 и составляют 5 % от суммы выбросов по московскому домену;

- на севере Москвы (ячейка 4) почти в 3 раза увеличен объем суммарных эмиссий – до 28 % от суммарного выброса по территории.

В других частях города изменения объемов суммарного выброса загрязняющих веществ в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 менее значительны: на 7 % суммарные эмиссии снижены на юге (ячейка 3), на 2–5 % увеличены в восточном секторе (ячейки 5 и 6). Практически не изменились эмиссии на северо-западе (ячейка 2).

Реализованное в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 пространственное перераспределение эмиссий загрязнителей обеспечивает более равномерное и, на наш взгляд, приближенное к реальности распределение эмиссий по территории московского региона.

Тенденции изменений вклада отдельных загрязняющих веществ в сумму выброса на территории московского домена детально отражены на рис. 3. Из наиболее значимых отметим: наибольший вклад в городское загрязнение воздуха РМ (около 50 %) был и сохранился в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 в южной части города. Значительный локальный максимум загрязнения SOx появился в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 на севере Москвы (ячейка 4), в ЕМЕР-2013 в этом районе эмиссии SOx были в 6 раз меньше и сравнимы с соседней ячейкой 6.

Отдельно отметим, в ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2019 изменений пространственного распределения суммарных по источникам эмиссий не наблюдается. Можно отметить только снижение в ячейке 5 (юго-восток) суммарных эмиссий на 10 %, включая снижение на 24 % эмиссий NOx.

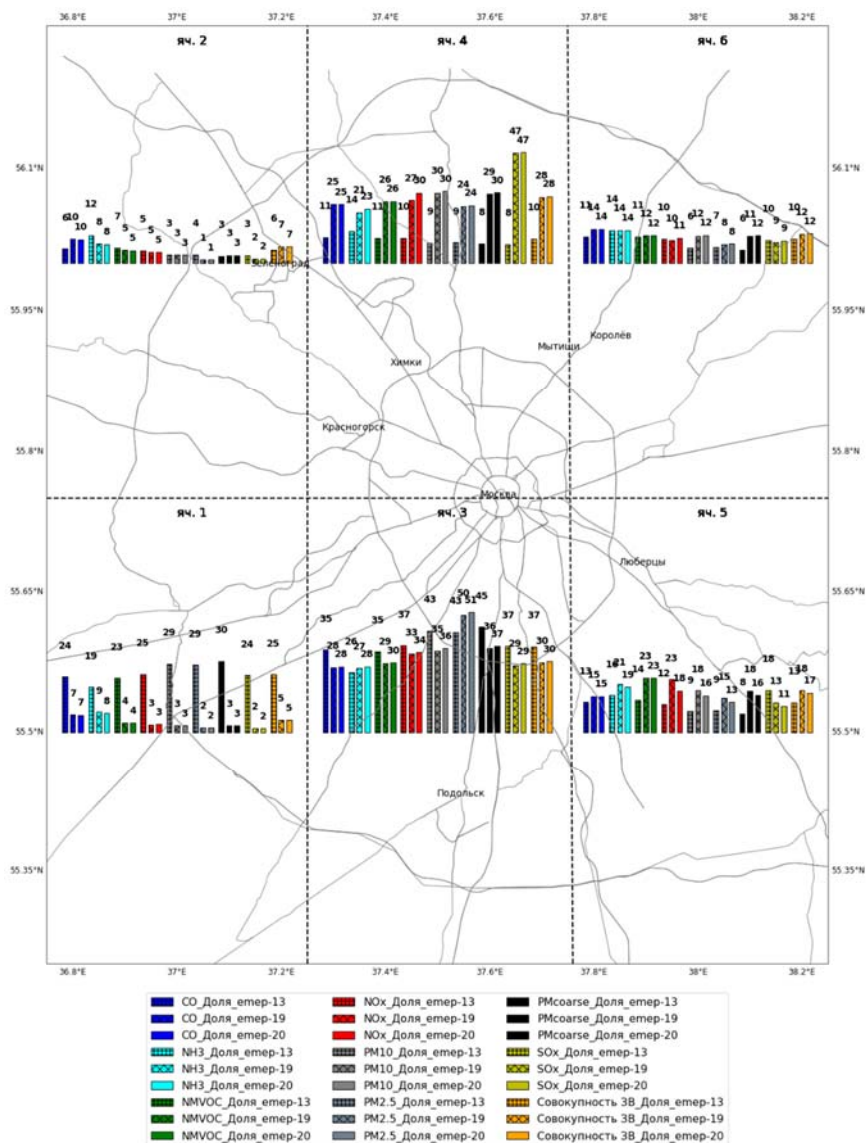


Рис. 3. Доли эмиссий загрязняющих веществ (NH₃, NMVOC, NOx, PM2.5, PM10, PMcoarse, SOx и их сумма) от суммарного по территории объема выбросов в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020.

Fig. 3. Shares of pollutant emissions (NH₃, NMVOC, NOx, PM2.5, PM10, PMcoarse, SOx and their sum) of the total emissions in the territory in the EMEP-2013, EMEP-2019 and EMEP-2020 inventories.

Изменения пространственного распределения суммарных эмиссий отраслевых источников показаны в каждой ячейке ЕМЕР $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ на рис. 4.

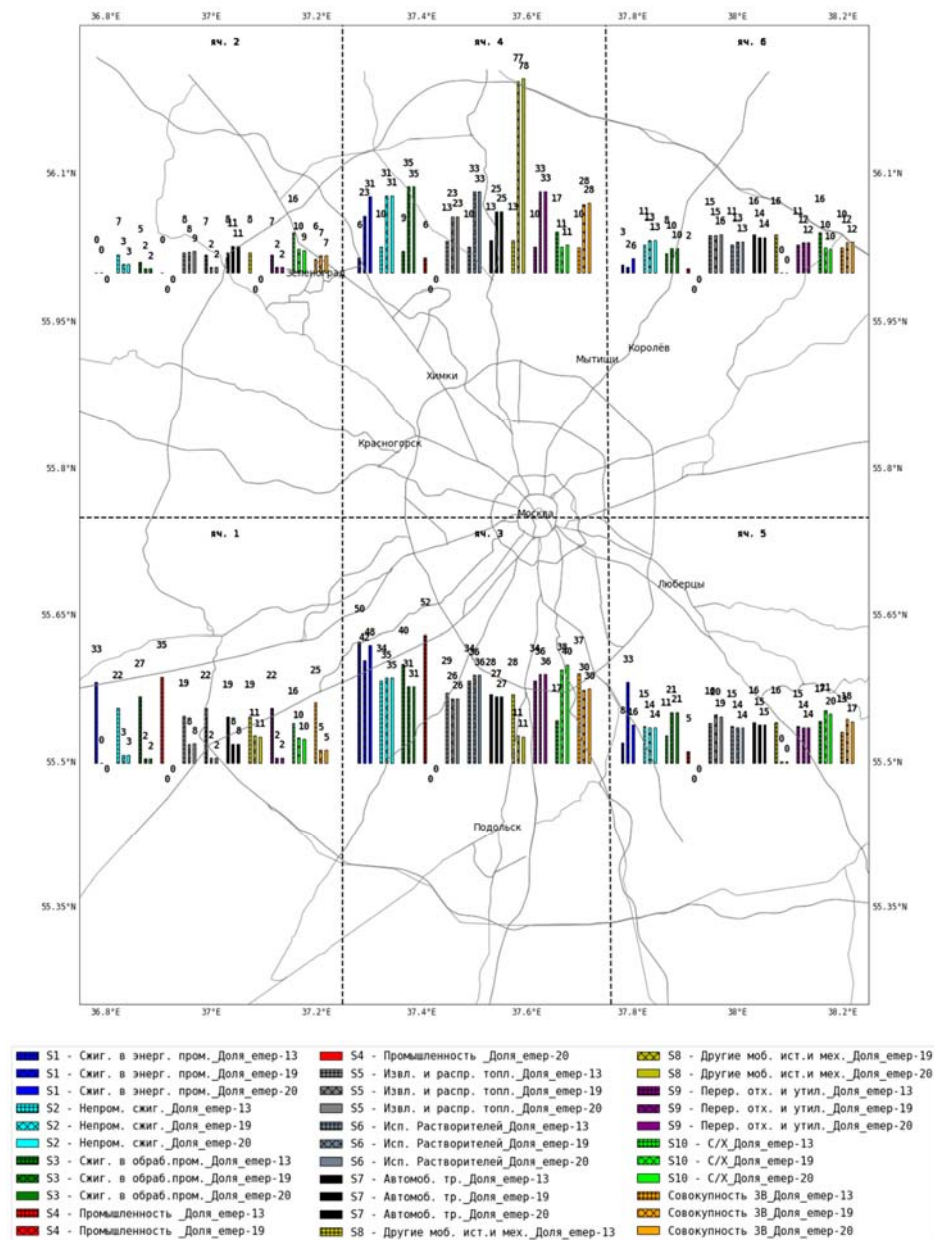


Рис. 4. Доли эмиссий отраслевых источников от суммы эмиссий по территории по номенклатуре SNAP в кадастрах ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020.
Fig. 4. Shares of emissions from industry sources from the total emissions in territory according to the SNAP nomenclature in the ЕМЕР-2013, ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 inventories.

Изменения пространственных распределений суммарных эмиссий отраслевых источников в целом соответствуют тенденциям, описанным выше для пространственных распределений суммарных эмиссий. Ниже перечислены наиболее отличающиеся от общих тенденций распределения эмиссии отраслевых источников в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020.

SNAP1 (Сжигание в энергетической промышленности) – отсутствуют выбросы в ячейках 1 и 2 (запад), большая часть выбросов (42 % и 48 %) в ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020 приходится на ячейку 5 (юг). Также в ЕМЕР-19 23 % выбросов SNAP1 приходится на ячейку 4 и 33 % на ячейку 5, в ЕМЕР-20 на эти ячейки приходится 31 % и 16 % от суммарных по территории выбросов соответственно.

SNAP8 (Другие мобильные источники и механизмы) – основной объем выбросов (около 78 %) приходится на ячейку 4 (север) при 11 % выбросов в ячейках 1 и 3 (юго-запад и юг соответственно) при отсутствии выбросов в остальных ячейках.

SNAP10 (Сельское хозяйство) – большая часть эмиссий (около 70 %) сосредоточена в южной части домена (ячейки 1, 3, 5), а в ЕМЕР-2013 выбросы SNAP10 были примерно поровну распределены между южной и северной частями домена.

Сравнение данных кадастра ЕМЕР-2019 с данными Росприроднадзора за 2019 год

Стационарные источники. По данным РПН 75 % эмиссий всех загрязнителей на территории Москвы приходится на два источника по классификатору ОКВЭД: «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха» (63 %) и «Производство кокса и нефтепродуктов» (12 %).

По данным ЕМЕР-2019 63 % выбросов совокупности загрязнителей стационарных источников приходится на источник N14_Industry (Промышленность) и 16 % на источник N14 A_PublicPower (Энергетика).

Таким образом, в РПН оценки вклада выбросов предприятий энергетического комплекса отличаются от ЕМЕР-2019 почти в 4 раза. Имеются различия между двумя кадастрами и в оценках вклада отдельных источников в суммарный выброс отдельных загрязняющих веществ.

СО. По данным РПН 48 % эмиссий СО производит источник «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха», в ЕМЕР-2019 энергетика (N14 A) обеспечивает 27 % суммарных эмиссий СО, промышленность и стационарное сжигание (N14 B и N14 C) – около 70 %.

NOx. Около 82 % эмиссий этого вещества по данным РПН приходится на предприятия энергетического комплекса. По данным ЕМЕР-2019 эмиссии от энергетических предприятий составляют около 43 %, а 55 % эмиссий NOx приходится на промышленность и другое сжигание (N14 B и N14 C).

PM. По данным РПН 23 % от суммарных эмиссий приходится на предприятия энергетического комплекса и 19 % на «Производство прочей неметаллической минеральной продукции». По данным ЕМЕР-2019 91 % эмиссий PM приходится на промышленные предприятия (N14 B).

SOx. По данным РПН 79 % выбросов этих газов делают энергетические объекты, 17 % приходится на «Производство кокса и нефтепродуктов». В ЕМЕР-2019 основным источником выбросов SOx (90 %) является промышленность.

NMVOС. 41% выбросов неметановых углеводородов дают производства кокса и нефтепродуктов, 20 % – «Торговля розничная». По данным ЕМЕР-2019 50 % выбросов NMVOС приходится на промышленные предприятия и 36 % – на производство растворителей (N14 E).

В табл. 3 приведены данные суммарных выбросов приоритетных загрязнителей на территории Москвы суммарно и отдельно по стационарным источникам и передвижным источникам (транспорт).

Таблица 3. Суммарные по территории Москвы объемы выбросов приоритетных загрязнителей, ЕМЕР-2019 и данные РПН

Table 3. Total emissions of priority pollutants for the territory of Moscow, ЕМЕР-2019 and RPN data

Данные	CO	NOx	SOx	PM	NH ₃	NMVOС	Всего
Транспортные выбросы							
ЕМЕР-2019	136342	20049	466	Н/Д	634	20083	177574
РПН	251860	45290	2480	Н/Д	4400	28420	332450
Разница (%)	-45	-55	-81	Н/Д	-85	-29	-46
Стационарные выбросы							
ЕМЕР-2019	22032	61477	57140	25367	Н/Д	54920	220936
РПН	8400	36020	13738	1751	Н/Д	11271	71179
Разница (%)	+162	+70	+315	+1348	Н/Д	+387	+210
Сумма							
ЕМЕР-2019	158373	81527	57606	Н/Д	Н/Д	75002	398510
РПН	260260	81310	16218	Н/Д	Н/Д	39691	403629
Разница (%)	-39	+0	+255	Н/Д	Н/Д	+88	-1

Как видно в табл. 3, количество суммарных выбросов всех загрязняющих веществ в ЕМЕР-2019 на 1 % меньше, чем по данным РПН. Обращает на себя внимание существенная разница вклада в суммарные эмиссии транспортных и стационарных источников: в ЕМЕР-2019 транспортных выбросов на 46 % меньше, чем по данным РПН, а выбросов стационарных источников на 210 % больше. Следует отметить наиболее существенные отличия выбросов отдельных загрязнителей: в ЕМЕР-2019 за счет эмиссий

стационарных источников больше, чем в РПН, суммарных выбросов SO_x – в 2,5 раза, PM – более чем в 13 раз, выбросов $NMVOС$ – почти в 4 раза.

С помощью разработанного авторами алгоритма с использованием данных об эмиссиях ЕМЕР-2019 на сетке $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ проведен сравнительный анализ суммарных эмиссий стационарных источников по административным округам Москвы.

Во всех АО выявлено превышение суммарных эмиссий в ЕМЕР-2019 по сравнению с данными РПН, за исключением уменьшения их на 5 % в ЦАО. Особенно большие различия в данных РПН и ЕМЕР-2019 установлены на территории СВАО, где по данным ЕМЕР-2019 суммарных эмиссий от стационарных источников в 25 раз больше, чем по данным РПН.

Выявлено несколько ярко-выраженных нехарактерных максимумов в распределении объемов эмиссий на сетке $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ в ЕМЕР-2019. На рис. 5 видны нетипичные максимумы NO_x и $NMVOС$ на юго-востоке от Москвы (рис. 5а, б) и сильно выраженный максимум эмиссий SO_x (рис. 5в) на территории СВАО.

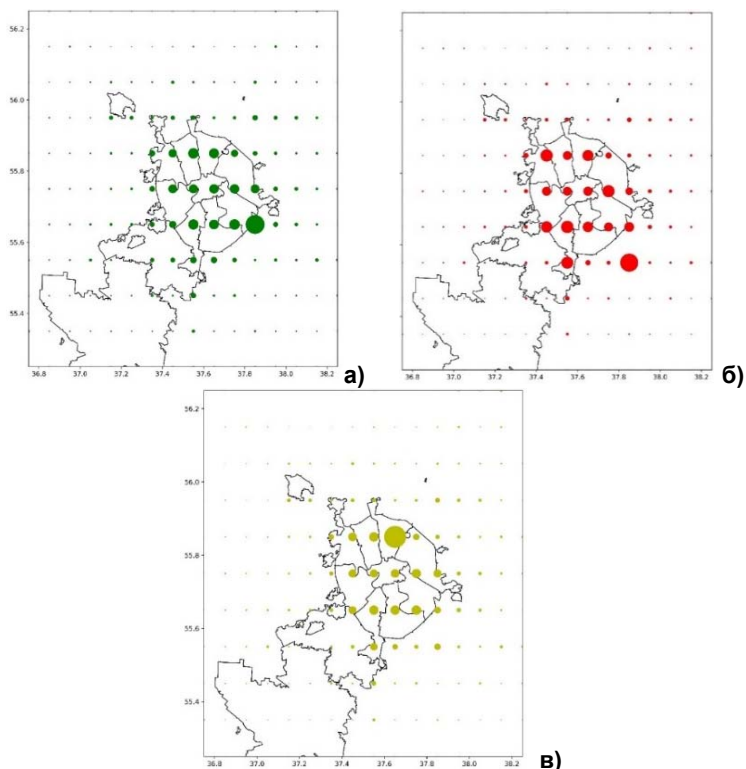


Рис. 5. Пространственное распределение суммарных эмиссий по территории Москвы на сетке $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ в ЕМЕР-2019; а) $NMVOС$, б) NO_x , в) SO_x . Размер круга прямо пропорционален объему выброса в ячейке.

Fig. 5. Spatial distribution of total emissions over the territory of Moscow on a $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ grid in EMEP-2019; а) $NMVOС$, б) NO_x , в) SO_x . The size of the circle is directly proportional to the emission value in the cell.

Установлено, что в ЕМЕР-2019 по сравнению с РПН суммарных эмиссий SOx на территории СВАО больше в 2032 раза, на территории СЗАО – в 1430 раз, на территории Новомосковского АО – в 181 раз, на территории Троицкого АО – в 287 раз.

Заключение

Проведенный анализ временных и пространственных изменений эмиссий загрязняющих веществ (CO, NH₃, NMVOC, NOx, PM_{2.5}, PM₁₀, PMcoarse, SOx) в ЕМЕР-2013 и в кадастрах последних лет (ЕМЕР-2019, ЕМЕР-2020) является подготовительным этапом на пути обновления действующей в Гидрометцентре России технологии прогнозирования качества воздуха на базе ХТМ и усвоения актуализированных данных ЕМЕР.

Установлено, что на территории московского региона в ЕМЕР-2019 и ЕМЕР-2020 по сравнению с ЕМЕР-2013 суммарный объем выбросов загрязняющих веществ уменьшен на 37 % и 40 %, в основном за счет снижения эмиссий PM. В последних кадастрах по сравнению с ЕМЕР-2013 также снижены эмиссии CO, NMVOC и NOx на 30–40 %, а эмиссии NH₃ увеличены на 18–25 %; объем эмиссий SOx практически не изменился.

Наиболее существенные изменения в отраслевых выбросах в последних версиях ЕМЕР относятся к эмиссиям автотранспорта и выбросам от сжигания в обрабатывающей промышленности; вклад в суммарный выброс транспорта увеличен почти в 2 раза – до 58 %, а эмиссий от сжигания в промышленности увеличен до 27 %.

Отдельное внимание было уделено сравнению эмиссий в 2020 г. с предшествующим 2019 г. Установлено небольшое уменьшение (на 1–6 %) суммарных эмиссий на территории московского региона в ЕМЕР-2020, что, по-видимому, отражает ограничительные мероприятия в период пандемии COVID-19.

Отмечено пространственное перераспределение эмиссий в последних версиях ЕМЕР: основной объем эмиссий распределен по модельным ячейкам, охватывающим большую часть Москвы, в кадастре ЕМЕР-2013 максимум эмиссий смещен на юго-запад.

Сравнительный анализ данных о выбросах приоритетных загрязнителей на территории Москвы кадастра ЕМЕР-2019 и данных Росприроднадзора за 2019 г. показал совпадение суммарных объемов эмиссий, при этом выявлены отличия в количестве выбросов отдельных загрязнителей и отраслевых нагрузок. В ЕМЕР-2019 выбросы автотранспорта по сравнению с данными РПН меньше, а эмиссии стационарных источников – больше. По данным РПН 75 % эмиссий всех загрязнителей стационарных источников на территории Москвы приходится на два источника: «Энергетика» (63 %) и «Производство кокса и нефтепродуктов» (12 %), по данным ЕМЕР-2019 63 % выбросов стационарных источников приходится на промышленное производство и только 16 % на энергетические объекты. На регулярной

сетке ЕМЕР-2019 ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) обнаружены локальные нехарактерные максимумы выбросов отдельных загрязнителей в северной и юго-восточной частях Москвы.

Выявленные особенности пространственного и количественного распределения эмиссий в кадастре ЕМЕР-2019, практически совпадающего с ЕМЕР-2020, являются предметом предстоящего анализа причин возникновения локальных максимумов и принятия решения о целесообразности их коррекции.

Разработанные на языке программирования Python алгоритмы сравнительного анализа данных кадастров ЕМЕР и данных государственной статистики настроены на автоматический вывод иллюстраций и исходных таблиц, приведенных в статье, из «сырых» исходных данных и достаточно универсальны для применения на актуализированных данных и для других территорий.

Список литературы

1. Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю. Уточнение данных о землепользовании для расчетов эмиссий в химической транспортной модели CHIMERE на примере нижегородского региона // Труды Гидрометцентра России. 2021. № 3 (381) С. 150-161.
2. Гинзбург А.С., Семенов В.А., Семутникова Е.Г., Алешина М.А., Захарова П.В., Лезина Е.А. Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Том 495, № 1. С. 73-78. DOI 10.31857/S2686739720110067
3. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147-170. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-6-29>.
4. Кузнецова И.Н., Ривин Г.С., Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Кирсанов А.А., Нахаев М.И. Моделирование загрязнения приземного воздуха с характерными в период COVID-19 сокращениями эмиссий в атмосферу с использованием моделей CHIMERE и COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 25-35. DOI:10.52002/0130-2906-2022-3-25-35.
5. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 203-218.
6. 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., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Татаринович 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. 27-53.
7. Статистическая отчетность Федеральной службы по надзору в сфере природопользования РФ, Информация об охране атмосферного воздуха. – Режим доступа: URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/>.
8. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Эффективность коррекции эмиссий для расчетов химической транспортной модели CHIMERE в московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 441-447.

9. Bessagnet B., Menut L., Lapere R. et al. High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps – Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountain Meteorology // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 565. DOI:10.3390/atmos11060565
10. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. CHIMERE-2013: a model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* 2013. Vol. 6. P. 981-1028. DOI: 10.5194/gmd-6-981-2013
11. Cholakian A., Bessagnet B., Menut L., Pennel R., Mailler S. Anthropogenic Emission Scenarios over Europe with the WRF-CHIMERE-v2020 Models: Impact of Duration and Intensity of Reductions on Surface Concentrations during the Winter of 2015 // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. P. 224.
12. Menut L., Bessagnet B., Briant R., Cholakian A., Couvidat F., Mailler S., Pennel R., Siour G., Tuccella P., Turquety S., Valari M. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model // *Geoscientific Model Development*. 2021. Vol. 14. P. 6781-6811.
13. EMEP Status Report 1/2022. Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. Joint MSC-W & CCC & CEIP & CIAM Report. 2022.

References

1. Borisov D.V., Shalygina I.U. Refinement of land use data for emission calculations in the CHIMERE chemistry-transport model: A case study for the Nizhny Novgorod region. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no. 3, pp. 150-161 [in Russ.].
2. Ginzburg A.S., Semenov V.A., Aleshina M.A., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Impact of Covid-19 lockdown on air quality in Moscow. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 495, no. 1, pp. 862-866. DOI: 10.1134/S1028334X20110069.
3. Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Tkacheva Yu.V., Rivin G.S., Lezina E.A. Testing and prospects of air pollution prediction technology based on CHIMERE and COSMO-Ru2ART chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, pp. 147-170. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-147-170 [in Russ.].
4. Kuznetsova I.N., Rivin G.S., Borisov D.V. Modeling Surface Air Pollution with Reduced Emissions during the COVID-19 Pandemic Using CHIMERE and COSMO-ART Chemical Transport Models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, vol. 47, pp. 174-182. DOI: 10.3103/S1068373922030025.
5. Kuznetsova I.N., Shalygina I.U., Nahaev M.I., Tkacheva U.V., Rivin G.S., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Lezina E.A. Air quality forecasting system based on chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, pp. 203-218. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-147-170 [in Russ.].
6. 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., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovitch 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. 27-53 [in Russ.].
7. Statisticheskaya otchetnost' Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya RF, Informaciya ob ohrane atmosfernogo vozduha. Available at: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/>.
8. Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Borisov D.V., Lesina E.A. Emission correction efficiency for calculations in the CHIMERE chemical transport model in the Moscow region. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2020, vol. 33, no. 6, pp. 441-447. DOI: 10.15372/AOO20200604 [in Russ.].

9. Bessagnet B., Menut L., Lapere R. et al. High Resolution Chemistry Transport Modeling with the On-Line CHIMERE-WRF Model over the French Alps – Analysis of a Feedback of Surface Particulate Matter Concentrations on Mountain Meteorology. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, pp. 565. DOI: 10.3390/atmos11060565

10. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. CHIMERE-2013: a model for regional atmospheric composition modeling. *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, pp. 981-1028. DOI: 10.5194/gmd-6-981-2013.

11. Cholakian A., Bessagnet B., Menut L., Pennel R., Mailler S. Anthropogenic Emission Scenarios over Europe with the WRF-CHIMERE-v2020 Models: Impact of Duration and Intensity of Reductions on Surface Concentrations during the Winter of 2015. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, 224 p.

12. Menut L., Bessagnet B., Briant R., Cholakian A., Couvidat F., Mailler S., Pennel R., Siour G., Tuccella P., Turquety S., Valari M. The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport. *Geoscientific Model Development*, 2021, vol. 14, pp. 6781-6811.

13. EMEP Status Report 1/2022. Transboundary particulate matter, photo-oxidants, acidifying and eutrophying components. Joint MSC-W & CCC & CEIP & CIAM Report. 2022.

Поступила 15.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023;
принята в печать 13.06.2023.

Submitted 15.05.2023; approved after reviewing 30.05.2023;
accepted for publication 13.06.2023

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 пространственную 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 подрисуночной подписи (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

№ 2 (388)

Под редакцией
д-ра геогр. наук Е.С. Нестерова

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»

Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1

Телефон: (499) 252-34-48

e-mail: hmc@mecom.ru

www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 13.06.2023. Формат 70×100/16

Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 150 экз. Заказ № 734

Отпечатано в типографии

ООО «Типография АМА-ПРЕСС»

107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3



ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»