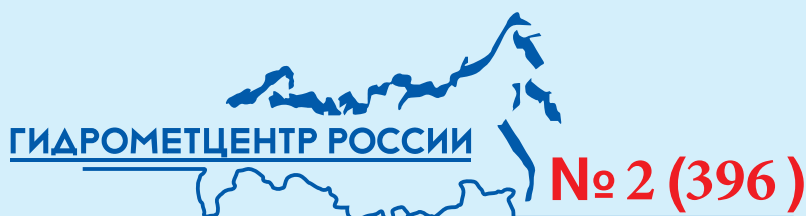


ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ



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 (396)

Под редакцией
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

**HYDROMETEOROLOGICAL
RESEARCH and FORECASTING**

No. 2 (396)

Москва
2025

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.

Рассмотрены особенности циркуляции в свободной атмосфере Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов. Приводится сравнение двух систем внутрисезонного ансамблевого прогнозирования на основе модели ПЛИАВ. На примере отдельных случаев, отмечавшихся в московском регионе в холодные периоды 2023–2024 гг., рассмотрены условия образования ледяного дождя и гололёда, методы их прогноза. Представлена обновленная система прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в московском регионе на основе химической транспортной модели CHIMERE-2023. Приведены результаты исследования химического состава снежного покрова в различных геоморфологических зонах Кабардино-Балкарской Республики. По данным моделей проекта СМР6 рассчитаны тенденции изменения среднегодовых осадков в Азово-Черноморском регионе. В разделе гидрологических прогнозов приведен обзор деятельности Всемирной метеорологической организации в области оперативной гидрологии и рекомендации по выпуску прогноза речного стока в вероятностной форме. Представлены результаты испытания технологий и методов, рекомендованных в 2024 году к внедрению Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и геофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета. Сборник интересен как для специалистов, так и для широкого круга лиц, изучающих гидрометеорологию.

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

Гельфан А.Н., член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, 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

Мотовилов Ю.Г., д-р геогр. наук, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

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

Симонов Ю.А., д-р геогр. наук, Гидрометцентр России, г. Москва, Россия

Страйная 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, Гидрометцентр России, 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.

The features of circulation in the Southern Hemisphere free atmosphere affecting aircraft flights are considered. The comparison of two systems for subseasonal ensemble forecasting based on the SL-AV model is given. Based on the individual cases observed in the Moscow region during the cold periods of 2023-2024, the formation environments of freezing rain and glaze and methods for their prediction are considered. An updated system for predicting pollutant concentrations in the Moscow region based on the CHIMERE-2023 chemistry-transport model is presented. The results of studying the chemical composition of snow cover in different geomorphological zones of the Kabardino-Balkarian Republic are presented. According to the CMIP6 models, trends in average annual precipitation in the Azov-Black Sea region are calculated. The section of hydrological forecasts provides an overview of the activities of the World Meteorological Organization in the field of operational hydrology and recommendations for issuing probabilistic streamflow forecasts. The results of testing the technologies and methods recommended for adoption in 2024 by the Roshydromet Central Methodological Commission for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts are presented. The journal is interesting both for specialists and for a wide range of people studying hydrometeorology.

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

Gelfan A.N., Associate Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 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

Motovilov Yu.G., Doctor of Geographical Sciences, Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

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

Simonov Yu.A., Doctor of Geographical 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

Khristoforov A. V., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, 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

Метеорологические прогнозы, математическое моделирование

- Некоторые особенности циркуляции в свободной атмосфере
Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов 8
Иванова А.Р.
- Сравнение двух систем внутрисезонного ансамблевого
прогнозирования на основе модели ПЛАВ 28
*Куликова И.А., Круглова Е.Н., Хан В.М., Зарипов Р.Б.,
Мизяк В.Г., Толстых М.А.*
- Анализ условий образования и особенностей прогнозирования
ледяного дождя и гололёда в московском регионе 44
Дмитриева Т.Г., Васильев Е.В.
- Обновленная система прогнозирования концентраций
загрязняющих веществ в московском регионе на основе
химической транспортной модели CHIMERE-2023 64
Ткачева Ю.В., Кузнецова И.Н.
- Исследование состава снежного покрова в различных
геоморфологических зонах Кавказского региона 85
Агоева Э.А., Ламашвили Л.С., Кумыков Р.М.

Расчеты и прогнозы элементов режима морей и океанов

- Тенденции изменения среднегодовых осадков
в Азово-Черноморском регионе по данным моделей проекта CMIP6 105
Полонский А.Б., Сухонос П.А.

Гидрологические прогнозы

- Оперативная гидрология в деятельности
Всемирной метеорологической организации. 121
Симонов Ю.А.
- Вероятностная форма выпуска прогнозов речного стока 141
Симонов Ю.А., Христофоров А.В.

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов,

рекомендованных к внедрению в оперативную практику
в соответствии с решениями Центральной методической комиссии
по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП)
Росгидромета в 2024 году и подтвержденных актами внедрения

- Численный краткосрочный прогноз погоды для регионов России,
Зарубежной Европы, Центральной Азии, Северного Ледовитого океана,
Атлантического и Тихого океанов севернее 29 град. с. ш.
на базе конфигурации ICON-Ru13/6N29
(шаг сетки 6,5 км, 74 вертикальных уровней)
на основе глобальной модели нового поколения ICON 159
*Ривин Г.С., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Блинов Д.В.,
Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Коспанов А.А., Никитин М.А.*
- Технология сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6,
включающей дополнительный модуль расчета
сверхдолгосрочных прогнозов 163
*Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Реснянский Ю.Д.,
Субботин А.В., Гришун А.С., Володин Е.М., Тарасевич М.А., Брагина В.В.*
- Технология наукастинга скорости порывов ветра в летний период
на основе данных дистанционного зондирования атмосферы
и численных прогнозов погоды 169
Киктёв Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В.

CONTENTS

Meteorological forecasts, mathematical modeling

- Some features of the Southern Hemisphere circulation
in the free atmosphere affecting aircraft flights 8
Ivanova A.R.
- Comparison of two subseasonal ensemble forecasting systems
using the SLAV072L96 model 28
*Kulikova I.A., Kruglova E.N., Khan V.M.,
Zaripov R.B., Mizyak V.G., Tolstykh M.A.*
- Analysis of formation environments and prediction features
of freezing rain and glaze in the Moscow region 44
Dmitrieva T.G., Vasil'ev E.V.
- An updated system for forecasting pollutant concentrations
in the Moscow region based on the CHIMERE-2023
chemistry-transport model 64
Tkacheva J.V., Kuznetsova I.N.
- Studying the composition of the snow cover
in different geomorphological zones in the Caucasus region 85
Agoeva E.A., Lamashvili L.S., Kumykov R.M.

Computing and forecasting of the marine environment parameters

- Trends in annual precipitation in the Azov-Black Sea region
from CMIP6 models 105
Polonsky A.B., Sukhonos P.A.

Hydrological forecasts

- Activities of the World Meteorological Organization
in the field of operational hydrology 121
Simonov Yu.A.
- A probabilistic form of streamflow forecasts 141
Simonov Yu.A., Khristoforov A.V.

Results of testing new and improved technologies, models and methods for hydrometeorological forecasting,

recommended for introduction into operational practice according to the resolutions of the Roshydromet Central Methodological Commission for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts in 2024 and confirmed by adoption certificates

- Short-range numerical weather prediction for the regions of Russia, foreign Europe, Central Asia, the Arctic, Atlantic and Pacific oceans north of 29° N on the basis of the ICON-Ru13/6N29 configuration (the grid spacing is 6.5 km, 74 vertical levels) based on the new-generation ICON global model 159
Rivin G.S., Astakhova E.D., Rozinkina I.A., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Kopeykin V.V., Kospanov A.A., Nikitin M.A.
- Technology for seasonal prediction based on the INM-CM6 model version including an additional module for the computation of very-long-range forecasts..... 163
Khan V.M., Tishchenko V.A., Kruglova E.N., Resnyanskiy Yu.D., Subbotin A.V., Gritsun A.S., Volodin E.M., Tarasevich M.A., Bragina V.V.
- Technology for nowcasting wind gusts in summer based on the data of remote sensing of the atmosphere and numerical weather prediction 169
Kiktev D.B., Muravyev A.V., Smirnov A.V.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27>

УДК 551.555+551.587

Некоторые особенности циркуляции в свободной атмосфере Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов

А.Р. Иванова

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

Представлен краткий обзор особенностей циркуляции в тропосфере и нижней стратосфере Южного полушария. Рассмотрены сезонные и многолетние изменения в положении и интенсивности струйных течений. Описаны особенности поведения и структуры тропопаузы, в том числе в период полярной ночи. Показано влияние глобального потепления и изменения содержания стратосферного озона на изменение циркуляции в Южном полушарии.

Ключевые слова: индексы циркуляции, Южное полушарие, тропопауза, струйные течения, озон

Some features of the Southern Hemisphere circulation in the free atmosphere affecting aircraft flights

A.R. Ivanova

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

A brief overview of the circulation features in the troposphere and lower stratosphere of the Southern Hemisphere is presented. Seasonal and long-term changes in the position and intensity of jet streams are considered. Features of the behavior and structure of the tropopause are described, including the polar night time. The impact of global warming and changes in stratospheric ozone on the circulation variations in the Southern Hemisphere is discussed.

Keywords: circulation indices, Southern hemisphere, tropopause, jet streams, ozone

Введение

В связи с блокировкой поступления в нашу страну информации Всемирной системы зональных прогнозов (ВСЗП) возникла необходимость ее импортозамещения продукцией на основе отечественных глобальных моделей численного прогноза погоды (ЧПП). До недавнего времени ФГБУ «Гидрометцентр России» выпускал резервную информацию с использованием российской модели ЧПП для метеообеспечения дальних перелетов исключительно по территории Северного полушария. Прекращение информирования российских авиакомпаний глобальными

прогнозами со стороны центров ВСЗП – Лондон и Вашингтон – обусловило насущную потребность внимательного изучения процессов в тропосфере и стратосфере Южного полушария для выпуска по этой территории прогностических карт особых явлений для авиации. Хотя в Южном полушарии живет всего 10 % населения Земли и, ожидаемо, интенсивность воздушного движения здесь гораздо ниже, чем в Северном полушарии (рисунок), тем не менее, глобальные прогнозы предполагают полное освещение информацией всего земного шара.

Разработка задач постпроцессинга для прогноза особых для авиации явлений в Южном полушарии может иметь свою специфику, поскольку существуют значительные отличия в атмосферной циркуляции двух полушарий, обусловленные следующими объективными факторами.

По сравнению с Северным полушарием, в Южном полушарии меньше суши и больше воды. Южная часть Тихого океана, Южная Атлантика, Индийский океан и различные моря, такие как Тасманово море между Австралией и Новой Зеландией и море Уэдделла у берегов Антарктиды, покрывают около 80,9 % территории Южного полушария. Площадь суши составляет только 19,1 %. Для сравнения, в Северном полушарии суша занимает около 39,3 % от общей площади [<http://geo.historic.ru/gazetteer/st002.shtml>]. Этот факт свидетельствует о том, что влияние подстилающей поверхности на циркуляцию атмосферы будет проявляться в Южном полушарии иначе, чем в Северном. Из-за более однородной подстилающей поверхности в Южном полушарии зональная циркуляция (западный перенос) более устойчива, чем в Северном.

Другим отличительным фактором Южного полушария является наличие Антарктического ледового щита, который оказывает значительное влияние на формирование атмосферной циркуляции. Стоит отметить, что в последние годы в связи с развитием туризма возросла активность воздушного движения к берегам ледяного континента (в основном за счет рейсов из Австралии и ЮАР). На Антарктиде и прилегающих островах расположены около 40 аэродромов и взлетно-посадочных полос, часть из которых законсервирована. В настоящее время в качестве действующих можно назвать новый российский аэродром «Зенит» на станции Прогресс, взлетно-посадочные полосы российской станции Новолазаревская [1], а также аэродромы, принадлежащие Чили на о. Ватерлоо (имени Тениенте Родолфо Марша Мартина, SCRM), Австралии (Уилксон, YWKS) и США (Амудсен-Скотт, NZSP; Мак-Мердо, NZPG) [avia.pro/blog/aeroporty-antarctidy].

Стоит упомянуть, что из-за более развитой сети наземных наблюдений в Северном полушарии, а также из-за того, что здесь проживает 90 % населения земного шара, традиционно качеству прогнозов именно на этой территории уделялось больше внимания при описании процессов в глобальных моделях ЧПП. Порой для экономии вычислительных ресурсов эти модели производят вычисления в Южном полушарии на более грубой сетке [43, <https://meteoinfo.ru/mrf-system-about>].

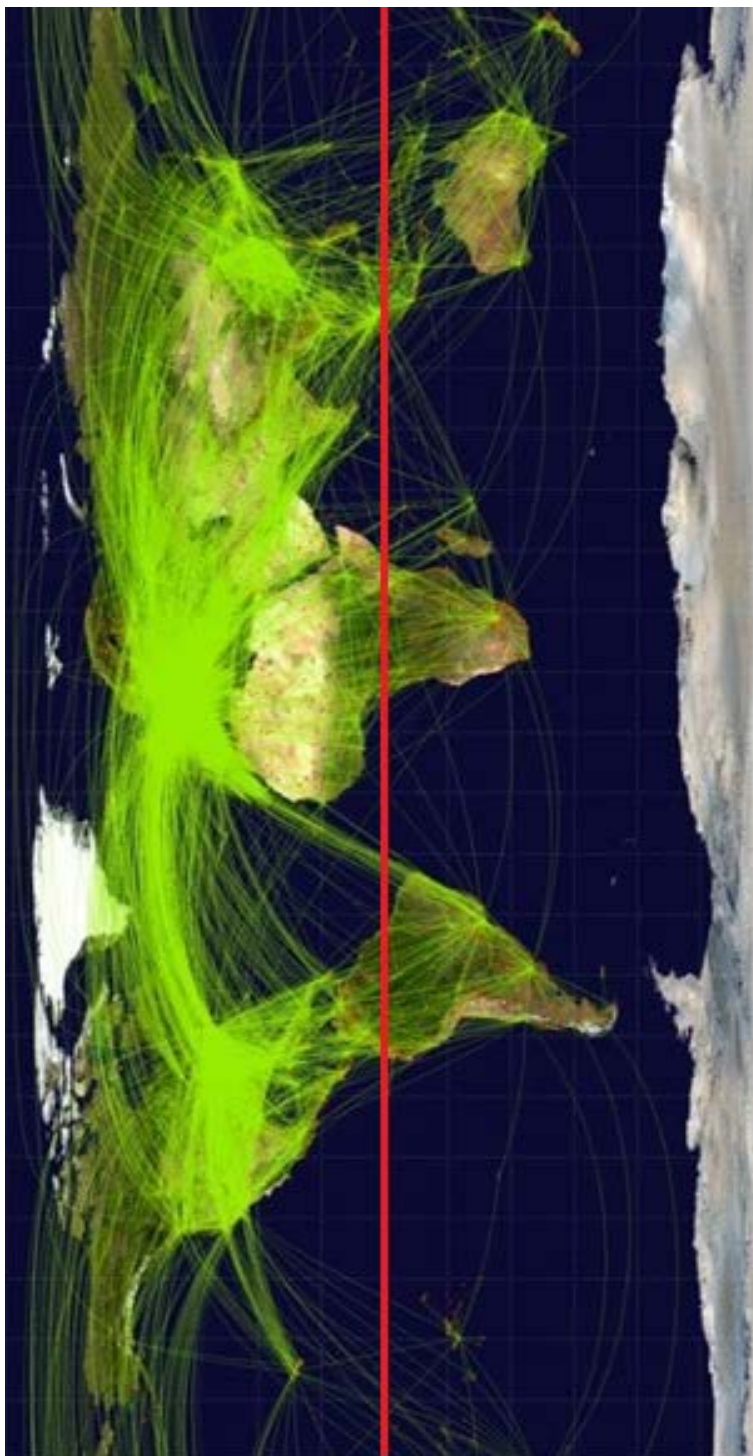


Рисунок. Карта воздушного движения (информация с портала [<https://www.northpointaviation.com/>]). Линия экватора обозначена красным цветом.

Figure. Air traffic map (from portal [<https://www.northpointaviation.com/>]). Equator line is denoted in red.

Рассмотрим некоторые объекты, характеризующие особенности циркуляции в атмосфере Южного полушария, которые будут оказывать влияние на полеты воздушных судов по маршруту. В данной работе в качестве таких объектов анализируются струйные течения (СТ) и тропопауза, информация о которых представляется на картах особых явлений («significant weather») для авиации [8]. В районе тропопаузы – области верхней тропосферы и нижней стратосферы – расположены эшелоны дальнемагистральных воздушных судов. Информация о струйных течениях имеет важное аэронавигационное значение с точки зрения как эффективности и экономичности полетов (использование попутного потока), так и их безопасности (наличие зон турбулентности в ясном небе).

Историческая справка

Понимание характера атмосферных движений в Южном полушарии невозможно без регулярного зондирования атмосферы в этом регионе. Подобные исследования состояния атмосферы над Антарктидой (высотные наблюдения) проводились еще в начале 40-х годов прошлого века. Экспедиция Антарктической службы США с 26 апреля 1940 г. по 15 января 1941 г. осуществила запуск 230 шаров-пилотов и 190 радиозондов со станции Little America, расположенной в 800 км от Южного полюса. По материалам этой экспедиции впервые было заявлено об «исчезновении» тропопаузы в полярную ночь [20].

Однако активное изучение атмосферной циркуляции Южного полушария было начато чуть позднее, в конце 1950-х годов, когда сбор глобальных данных во время Международного геофизического года (1957–1958 гг.) позволил ликвидировать некоторые пробелы в знаниях об атмосферных процессах в южных широтах. Помимо радиозондирования, атмосфера изучалась с помощью самолетов-лабораторий: например, советская летающая метеорологическая обсерватория «Антарктида» функционировала с 1958 по 1962 год [12]. Регулярные сведения о погоде поступали также с бортов военно-транспортной авиации США при полетах от г. Крайстчерч (Новая Зеландия) до антарктической станции США Мак-Мёрдо [2]. Наступившая впоследствии эра метеорологических спутников и появление моделей численного прогноза погоды расширили границы представления об особенностях циркуляции атмосферы в Южном полушарии и о процессах обмена между двумя полушариями. В 1972 г. Американское метеорологическое общество выпустило в серии «Метеорологические монографии» книгу «Метеорология Южного полушария», русский перевод которой увидел свет в 1976 г. [9]. В данной монографии ветер над Южным полушарием анализировался только в рамках геострофического соотношения по данным о давлении, поскольку далеко не все существовавшие на тот момент станции радиозондирования проводили наблюдения за ветром. Полученные материалы позволили установить наличие в верхней

тропосфере единой мощной зональной струи с осью на высоте 250 гПа, смещающейся от января к июлю с 50° до 30° ю. ш.

Отметим, что, несмотря на дальнейшее развитие систем наблюдений, геострофический подход к исследованию циркуляции оказался применимым и в 21 веке. Так, в работе [23] по материалам реанализа геопотенциальной высоты в период 1958–2002 гг. была обнаружена способность к раздвоению высотной струи в Южном полушарии и ее разделению на субтропическое и полярное струйные течения.

В настоящее время основным источником информации о состоянии атмосферы над Южным полушарием служат наблюдения с геостационарных и полярно-орбитальных спутников. Кроме этого, дважды в сутки поступает информация со станций глобальной аэрологической сети. Их количество в Южном полушарии превышает сотню, 11 из них расположены на территории Антарктиды [<https://oscar.wmo.int/surface/#/>].

Индексы, определяющие циркуляцию атмосферы в Южном полушарии

Для анализа особенностей циркуляции атмосферы исследователи используют некоторые глобальные или региональные индексы. В Южном полушарии это прежде всего индекс Южного колебания и индекс Антарктического колебания.

Индекс южного колебания (Southern Oscillation Index, SOI) – это стандартизированный индекс, который представляет собой осредненную за пять месяцев разность нормированных аномалий давления на станциях Таити и Дарвин (Австралия) [5]. В целом, сглаженные временные ряды *SOI* очень хорошо соответствуют изменениям температуры океана в восточной тропической части Тихого океана. Отрицательная фаза *SOI* представляет давление воздуха ниже нормы на Таити и давление воздуха выше нормы в Дарвине. В отрицательную фазу *SOI* отмечено усиление западного переноса в субтропическом поясе Южного полушария в период австралийской зимы [13]. Длительные периоды отрицательных (положительных) значений *SOI* совпадают с аномально теплыми (холодными) водами океана в восточной тропической части Тихого океана, типичными для эпизодов Эль-Ниньо (Ла-Нинья) [<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi/>].

Цикл *Эль-Ниньо-Южного колебания (ENSO)* может оказывать заметное влияние на состояние стратосферы. В работе [5] демонстрировался отклик в стратосфере Южного полушария на аномалии, связанные с *ENSO*. Реакция была обнаружена в высоких широтах Южного полушария в августе. Оказалось, что более холодная австралийская весна в антарктической стратосфере в целом связана с теплой фазой *ENSO* и наоборот. Было установлено, что стратосферная циркуляция действует как промежуточное звено во взаимосвязи изменчивости *ENSO* с изменениями тропосферной циркуляции в период австралийских весны и лета. Связь

динамики стратосферного полярного вихря над Антарктидой с *ENSO* подтверждена также в [18, 54].

Индекс Антарктического колебания (AntArctic Oscillation, AAO) – первый главный компонент поля геопотенциала поверхности 850 гПа в Южном полушарии. Антарктическое колебание по своей природе не относится к «глобальным» модам атмосферной циркуляции, а является составной частью более сложных глобальных структур в общей циркуляции атмосферы [5]. *AAO* представляет собой зонально-симметричную моду изменчивости геопотенциала в Южном полушарии с областями противоположных знаков над Антарктикой и зональной полосой с центром вблизи 45° ю. ш. Положительная фаза *AAO* характеризуется понижением геопотенциальной поверхности над Антарктидой и ее подъемом над средними широтами полушария [62]. Индекс *AAO* является мерой интенсивности стратосферного полярного вихря, колебания которой могут повлиять на циркуляцию в тропосфере (возникновение погодных аномалий в полярных и субполярных широтах).

Другое название Антарктического колебания – *Южная кольцевая мода (Southern Annular Mode, SAM)*. В [55] *SAM* определена как ведущая эмпирическая ортогональная функция зонально-осредненной кинетической энергии, которая характеризуется смещениями по широте внутритропической струи и связана с большими вариациями в вихревых потоках импульса. Эта кольцевая мода имеет бароклинную природу и связана с изменениями в широтном положении источника бароклиновых вихрей [32]. Южная кольцевая мода, согласно [23], выступает в качестве главного модулятора широты и интенсивности струи полярного фронта, при этом ее влияние на субтропическое СТ крайне незначительно. В положительной фазе *SAM* наблюдается сдвиг к полюсу и усиление полярной струи. В холодный сезон отмечается асимметрия *SAM*, связанная с интенсификацией полярного струйного течения [44]. Исследования *SAM* для второй половины прошлого века показали, что ее изменения были обусловлены нелинейной комбинацией естественного и антропогенного вынуждения, причем последнее было наиболее выражено в летний сезон [36].

Аналогом *SAM* является бароклиновая кольцевая мода (*Baroclinic annular mode, BAM*). Индекс *BAM* определяется как ведущий основной компонент вихревой кинетической энергии в Южном полушарии, рассчитанный для всех уровней от 1000 до 200 гПа и всех широт в полосе 20–70° ю. ш. *BAM* связан с изменениями амплитуд вихрей, но не с зональным средним потоком [37, 55]. Периодичность, связанная с *BAM*, потенциально важна для понимания внутрисезонной изменчивости климата полушария.

На изменчивость стратосферного полярного вихря в Южном полушарии может оказывать влияние фаза квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере [4, 42]. При западной фазе стратосферный зимний вихрь интенсивнее и температура в полярной области ниже, чем во время восточной фазы [4].

В задачах климатического моделирования [17] в качестве индексов циркуляции могут использоваться осевая широта и скорость западного переноса, а также *индекс ASL (Amudsen Sea Low)* – постоянно существующая область низкого давления над морем Амудсена у западного побережья Антарктиды, демонстрирующая сезонную миграцию между морем Росса (~150° з. д.) в июне и морем Беллинсгаузена (~110° з. д.) в январе.

Струйные течения Южного полушария

Как указывалось выше, первые исследования высотного поля ветра выявили наличие единой мощной струи в верхней тропосфере Южного полушария [9]. Позднее было обнаружено ее разделение на два ярко выраженных струйных течения – полярное (или, по другой терминологии, субполярное), которое прослеживается практически во всей тропосфере со средним положением оси вблизи 50° ю. ш., и субтропическое – верхнетропосферное, расположенное в среднем над 30° ю. ш. Согласно спутниковой информации [35], в период с мая по декабрь верхнетропосферные СТ сливаются с нижнестратосферными, связанные с самой низкой частью стратосферного полярного вихря ЮП («subvortex»).

По данным реанализа NCEP/NCAR, за период 1958–2002 гг. была отмечена ярко выраженная сезонность в поведении СТ: в теплый сезон наблюдалась только одна струя с осью вблизи 40° ю. ш., тогда как осень и зима характеризовались отчетливо выраженным её разделением на сильное доминирующее субтропическое течение около 30° ю. ш. и полярное фронтальное течение, постепенно смещающееся к полюсу и достигающее 60° ю. ш. к концу холодного сезона [23]. Усиление субтропической струи в период австралийской зимы (июнь-август) и ее ослабление летом (декабрь-февраль) обсуждалось в работе [57]. Как было отмечено в [40], формирование субтропической струи в Южном полушарии связано с активностью Азиатского летнего муссона. Было также установлено, что на скорость субтропической струи наиболее заметно влияет Эль-Ниньо-Южное колебание. Над Тихим океаном в период Эль-Ниньо в теплый сезон скорость СТ примерно на 50 % больше, чем в период Ла-Нинья [23].

В течение второй половины прошлого века была обнаружена тенденция к замедлению субтропической струи [23]. Оценка снижения пиковой активности субтропического СТ была выполнена в работе [27], оно составило 17 %.

В отличие от субтропического СТ, для полярной струи было отмечено усиление интенсивности в период с 1958 по 2002 г. [23]. Полярное (или субполярное) СТ является постоянным и полукруглополярным потоком, распространяющимся по высоте на всю тропосферу и сопровождающимся отчетливой бароклинной зоной у поверхности земли. Выполненный в [40] анализ циклонических траекторий вихрей и верхнетропосферной циркуляции позволил установить связь между вихревым переносом и активностью СТ. Оказалось, что в отсутствие интенсивной субтропической струи

тихоокеанские циклонические траектории летом и осенью Южного полушария являются частью четко определенных циркумполярных циклонических траекторий вдоль полярного СТ. Зимой и весной, напротив, область активного вихревого переноса на верхних уровнях разделяется на главную ветвь вдоль субтропического СТ и вторичную ветвь вдоль полярной струи. В нижней тропосфере вихревой перенос формируется только вдоль обострившейся бароклинной зоны под полярным СТ.

В будущем из-за таяния антарктического морского льда предполагается сдвиг струйных течений и связанных с ними циклонических траекторий к полюсу [61]. Это же подтверждают другие работы, рассматривающие сценарии глобального потепления [34, 46]. В [34] утверждалось, что крупномасштабный прямой отклик на климатические изменения в принципе не изменит интенсивность и форму струи, а лишь сдвинет ее на 21° широты в направлении полюса. Отметим, что площадь антарктических льдов как неоспоримого фактора формирования циркуляции в Южном полушарии испытывает колебания с тенденцией к сокращению. В 2023 г. был зафиксирован минимум площади антарктического морского льда по данным спутниковых снимков [22], а анализ рядов наземных наблюдений в Антарктиде позволил сделать вывод о постепенном увеличении количества месяцев в году с «положительной динамикой температуры» [10].

Однако глобальное потепление, отразившееся на нагревании тропосферы, считается не единственной причиной изменения положения СТ в Южном полушарии. Другим фактором в работе [28] называются процессы в стратосфере, а именно истощение озонового слоя. Это же подтверждает и более поздняя работа [25], в которой авторы полагают, что сдвиги в положении струйных течений обусловлены изменениями температурного градиента верхней тропосферы и нижней стратосферы.

Изучение динамики струйных течений [29] позволило установить, что субтропический фронт и соответствующее ему СТ в период с 1979 по 2010 г. сместились к полюсу в Южном полушарии на $6,5 \pm 0,2^\circ$ широты. Эта величина значительно превысила соответствующее значение для Северного полушария ($3,7 \pm 0,3^\circ$). При оценке факторов такого смещения (изменения температуры поверхности суши и океана в тропическом поясе, прямое радиационное воздействие парниковых газов в тропосфере, изменения температуры нижней тропической стратосферы, квазидвухлетняя осцилляция и вулканические извержения) доминирующая роль была отдана парниковым газам. Отмечалось, что значительные изменения положения струйных течений влекут за собой заметные широтные сдвиги в глобальной циркуляции, распределении температуры и осадков [38].

Недавние исследования трендов тропосферной циркуляции по данным ERA-5 (1979–2022 гг.) обнаружили увеличение скорости западного переноса во внетропической части летом и осенью Южного полушария, при этом сдвиг к полюсу был отчетливо заметен только летом, с декабря по февраль [48]. Для полярного СТ было отмечено его усиление в тихоокеанском секторе. Для субтропического СТ отмечался наибольший

сдвиг его оси к экватору в южноамериканском секторе. При этом было зафиксировано ослабление части субтропической струи, простирающейся от востока Индийского океана через Австралию до восточной части Тихого океана. Однако по данным [53] над регионом, охватывающим восточное побережье Австралии и акваторию Тасманова моря, в апреле-мае происходила интенсификация субтропического СТ.

Тропопауза в Южном полушарии

Тропопауза является областью раздела между тропосферой и стратосферой. В тропиках по обе стороны экватора высота ее максимальна (~18 км) и примерно соответствует высоте изэнтропической поверхности 380 К [7], к полюсам происходит ее понижение, в зонах высотных атмосферных фронтов и струйных течений – разрывы или складкообразование (в зависимости от способа представления). В [35] отмечено, что летом в Южном полушарии разрывы тропопаузы с образованием вторичной тропопаузы сопровождают субтропическое СТ вниз по течению от региона Австралийского муссона. При этом в высоких широтах Южного полушария множественные тропопаузы почти повсеместны в июне-июле и связаны с уникальной термической структурой тропосферы в период полярной зимы.

Отождествление тропопаузы с какой-либо поверхностью не вполне физически корректно [7]. Более точно переход между тропосферой и стратосферой следовало бы характеризовать слоем определенной толщины, как, например, в известной концепции UTLS (upper troposphere-lowermost stratosphere). Однако требования со стороны авиационных пользователей к получению информации именно о высоте тропопаузы и температуре на этом уровне [8] по-прежнему заставляют разработчиков модельного постпроцессинга искать подобие некой поверхности, отделяющей тропосферный воздух от стратосферного. При этом такие особенности, как двойные и тройные тропопаузы, возникающие в зонах атмосферных фронтов, потребителя не интересуют. По этой причине исследования тропопаузы для ее последующего прогнозирования проводятся на базе не только определения [59], основанного на вертикальном градиенте температуры, но и различных иных предположений. К ним относят концепции динамической тропопаузы, озонопаузы [6], поверхности определенных значений градиента потенциальной температуры [56] и пр.

Корректное определение среднего положения тропопаузы в Южном полушарии, за исключением центральной части антарктического континента в период полярной ночи, полностью соответствует фундаментальной причине ее существования – это уровень минимальной температуры, находящийся между двумя источниками тепла (выделением тепла, связанным с экзотермическими реакциями в озоновом слое и длинноволновым излучением поверхности планеты). Однако ледовое покрытие

антарктического материка в условиях полярной ночи может привести к нарушению подобия радиационного равновесия на высотах. В таком случае, согласно классическому определению (через величину градиента температуры), тропопауза вполне может быть идентифицирована на поверхности льда, что соответствует формальному отсутствию слоя тропосферы над Антарктидой. Еще в 1942 г. в Бюллетене Американского метеорологического сообщества была опубликована статья Арнольда Кёрта «Исчезновение тропопаузы антарктической зимой» [20].

Отметим, что в другие периоды тропопауза в ее классическом смысле [59] может быть определена и над Антарктидой. Автор [47], выполнивший анализ данных 190 зондирований на станции Литтл Америка (78° с. ш., 162° з. д.) с апреля 1940 по январь 1941 г., посчитал тропопаузу как уровень радиационного равновесия и обнаружил наибольшее охлаждение атмосферы, соответствующее положению тропопаузы, на высотах между 8 и 10 км. В начале зимы Южного полушария этот уровень мог опускаться ниже 7 км.

На сегодняшний день для однозначного определения тропопаузы (с целью исключения проблемы «множественности») чаще всего используют «динамическую» концепцию, отождествляя границу между тропосферой и стратосферой изоповерхностью некоей пороговой величины вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля, чьи значения в стратосфере на порядок превышают тропосферные [6]:

$$q = -g(\zeta + f) \partial \theta / \partial p.$$

Здесь g – ускорение свободного падения; ζ – относительная завихренность; f – параметр Кориолиса; θ – потенциальная температура; p – давление. Единицей измерения считается $1 \text{rvu} = 10^{-6} \text{ К кг}^{-1} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

Следует отметить, что значения q в Южном полушарии отрицательны (в отличие от Северного) из-за того, что параметр Кориолиса здесь меньше нуля. Отметим, что в Северном полушарии динамическая тропопауза, соответствующая той, что устанавливается в [59], чаще всего аппроксимируется изэртелическими поверхностями в диапазоне 3–4 rvu. Однако большинство работ по исследованию тропопаузы в Южном полушарии отождествляют ее поверхностью -2 rvu [16, 33, 39, 41, 52, 56].

Большой интерес исследователи проявляют к нарушению зональной циркуляции, проявляющемуся в процессах блокирования, обусловленных обрушением волн Россби (ОВР) вблизи тропопаузы. В [16] рассматривалось обрушение волн Россби на поверхности -2 rvu. Было установлено, что чаще всего блокирование волн происходит в средних широтах Южного полушария, наблюдается преимущественно зимой в восточной части Тихого океана и может охватывать всю тропосферу. Сравнительно редкие летние эпизоды блокирования ограничены в основном западной частью Тихого океана. При этом ОВР как зимой, так и летом проявляется чаще в годы Эль-Ниньо, нежели в годы Ла-Нинья.

Исследование морфологии эпизодов волнового обрушения относительно положения полярной струи обнаружило, что в целом на полярной стороне струи происходит обрушение по циклоническому типу [52]. Смешанный тип наблюдается в средних широтах над районом Новой Зеландии (запад Тихого океана, экваториальный фланг полярного СТ). В средних широтах восточной части Тихого океана, где СТ слабы, наблюдаются эпизоды обрушения волн по антициклоническому типу.

В [41] установлено, что в целом в Южном полушарии ОВР на тропопаузе выше изэнтропы 320 К чаще всего происходит по антициклоническому типу. Существуют заметные различия в сезонных изменениях ОВР: зимой повторяемость таких эпизодов минимальна вблизи поверхности 350 К, летом – на изэнтропической поверхности 330 К. Эти сезонные вариации обусловлены изменениями в расположении тропосферных струй и динамической тропопаузы. Зимой положение субтропической струи совпадает с положением тропопаузы на изэнтропической поверхности 350 К над Австралией и в Южной части Тихого океана, что приводит к сезонному минимуму ОВР на этих высотах. Летом на высоте изэнтропы 330 К над Южной Атлантикой и югом Индийского океана совпадают полярное СТ и тропопауза, что приводит к подавлению процессов ОВР в этом регионе.

Проведенный в [15] анализ главных компонентов для внутрисезонной изменчивости внетропической зонально-осредненной тропопаузы Южного полушария показал, что эта изменчивость в основном определяется волнообразной деформацией тропопаузы, а не изменениями ее высоты. Подобные деформации вызваны аномальным обрушением волн на уровне тропопаузы в уже существующем аномальном стратосферном полярном вихре. Интенсивный полярный вихрь связан с подъемом тропопаузы, слабый – с ее опусканием. При этом обрушение волн в средних широтах формирует дипольное изменение тропопаузы. Эти две вынуждающие силы действуют на разных масштабах и могут быть разделены путем частотной фильтрации.

По данным климатического моделирования [45] установлено, что причиной ослабления полярного вихря (а следовательно, понижения тропопаузы) может быть генерация стационарных вертикально распространяющихся волн в условиях низкой сплоченности антарктического морского льда.

Деформация тропопаузы у берегов Антарктиды, проявляющаяся в виде складкообразования (фолдинг), обсуждается в работе [33]. Известно, что часто опускание тропопаузы происходит на обращенной к полюсу стороне струйного течения. Однако авторами было установлено, что зимой Южного полушария наличие СТ не может полностью объяснить подобную деформацию тропопаузы вдоль побережья Восточной Антарктиды. Дополнительным фактором, по мнению авторов, является сужение (contradiction) меридионального размера вихрей синоптического масштаба,

которое обусловлено крутым рельефом Антарктического плато и радиационным выхолаживанием.

В [26] по данным ERA-Interim было установлено, что часто на уровне тропопаузы вблизи полюса наблюдаются некоторые когерентные структуры, которые могут быть идентифицированы по локальному минимуму потенциальной температуры и локальному максимуму потенциальной завихренности. Это так называемые «troropause polar vortices» (TPV), полярные вихри на тропопаузе, являющиеся предшественниками приземных циклонов – поставщиков основного количества осадков над антарктическим ледовым щитом. На траектории этих вихрей существенно влияет рельеф Антарктиды. Расчеты по данным ERA-Interim показали, что существуют три района высокой плотности таких структур: непосредственно к востоку от Трансантарктического горного хребта над шельфовым ледником моря Росса, в районе Земли Коутса и хребта Шеклтона и в районе Земли Мак-Робертсона. Было выдвинуто предположение, что потенциальные аномалии завихренности возникают подобно вихревому следу, когда западные ветры над Антарктидой приближаются к вытянутому трансантарктическому хребту. В [58] указывается на связь TPV с переносом влаги из субтропических широт в системах влажных несущих полос («atmospheric river»).

В последние десятилетия было зафиксировано устойчивое повышение высоты тропопаузы в глобальном масштабе [19]. Для Южного полушария была произведена оценка тренда положения тропопаузы по градиенту озона (озонопаузы) и вертикальному градиенту температуры [49]. Оказалось, что в период 1998–2008 гг. в тропической зоне Южного полушария (0–15° ю. ш.) высота тропопаузы уменьшилась. В субтропической зоне (15–25° ю. ш.) результаты оказались неоднозначными – озонопауза продемонстрировала повышение, а классическая «термическая» тропопауза – понижение.

По данным реанализа NCEP/NCAR в [50] установлено, что в Южном полушарии колебания высоты тропопаузы были обусловлены не только аномалиями температуры в нижней стратосфере, но главным образом вихревым переносом тепла к полюсу, связанным с вихрями синоптического масштаба, и неадиабатическим нагревом. Как указывалось в [28], из-за однородности Южного полушария поток тепла, связанный с бароклинными вихрями, практически не меняется в течение года, поскольку здесь сохраняется направление меридионального градиента приземной температуры во все сезоны. Вторичный максимум направленного к полюсу вихревого потока тепла имеет место над тропопаузой Южного полушария и связан с бароклинными волнами, не способными распространиться высоко в стратосферу, амплитуды которых быстро разрушаются в нижней стратосфере.

Некоторые аспекты связи циркуляции в Южном полушарии с динамикой стратосферного озона

Открытие в 80-х годах прошлого века резкого уменьшения концентрации озона над Антарктидой, названного «озоновой дырой», было зафиксировано в первую очередь по данным наземной аппаратуры (фильтровых озонметров). К началу 1990-х гг. общее содержание озона по данным измерений на российских антарктических станциях Мирный и Восток составляло всего 70–75 % от значений в период 1975–1980 гг. [11]. С начала 2000-х гг. наблюдается тенденция возвращения величин общего содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествовавшего появлению «озоновой дыры».

Как оказалось, открытие «озоновой дыры» позволило, кроме проблем, связанных с губительным воздействием ультрафиолетовой радиации, выявить довольно неожиданный эффект. Он был обнаружен в начале 2000-х гг. и состоял во влиянии резкого сокращения общего содержания озона на циркуляцию во всей толще тропосферы Южного полушария вплоть до подстилающей поверхности [31]. В [24] указывалось, что истощение озонового слоя было основной причиной смещения к полюсу тропосферного струйного течения в средних широтах летом Южного полушария и положительного индекса южной кольцевой моды в конце 20 века. Уменьшение содержания озона в 1960–1990-х годах привело к значительному охлаждению стратосферы из-за меньшего количества тепла, выделяемого в озоновом слое при экзотермических реакциях. Это повлекло за собой охлаждение полярной стратосферы примерно на 7 °С, что способствовало увеличению меридионального градиента температуры между Антарктикой и средними широтами Южного полушария. В результате произошло усиление западного стратосферного струйного течения и сдвиг в сторону полюса тропосферного СТ [29]. Это утверждение не всегда поддерживается исследователями, отдающими приоритет атмосферной динамике над атмосферной химией [3].

После 2001 года на фоне восстановления озонового слоя наблюдаемые величины трендов температуры в стратосфере оказались примерно на 50–75 % меньше, чем в эпоху истощения озонового слоя [14, 60]. Ожидается [24], что в течение последующих 50 лет восстановление озона практически нивелирует этот тренд. В [51] приводятся результаты экспериментов с ансамблем химико-климатических моделей, которые утверждают, что на этом фоне прогнозируемое повышение внетропической тропопаузы Южного полушария к концу 21 века существенно замедлится.

Хотя эффекты, связанные с «озоновой дырой», в основном наблюдаются весной Южного полушария, в [30] было установлено, что аномалии стратосферного озона, наблюдаемые поздней осенью (в мае), также вызывают радиационное охлаждение, распространяющееся на верхнюю тропосферу, и способствуют изменениям в тропосферной циркуляции.

Заключение

Проведенный анализ особенностей атмосферной циркуляции Южного полушария продемонстрировал некоторые ее отличия от хорошо изученных подобных черт в Северном полушарии. Это касается структуры и динамики струйных течений, а также особенностей формирования и деформации тропопаузы. Эту специфику следует принимать во внимание не только при разработке постпроцессинга на базе выходной продукции моделей ЧПП, но и при модификации и настройке самих глобальных моделей.

Прежде всего, здесь не следует производить «загрубление» шага сетки, так как вихреразрешающая способность модели оказывает влияние на интенсивность струйных течений, определяемую процессами энергообмена между вихрями и зональным потоком. Необходим точный учет льда в модели – как морского, так и континентального, ибо антарктический ледовый щит является одним из определяющих факторов циркуляции в Южном полушарии. Необходима качественная настройка радиационного блока модели, учитывающая не только поступление солнечной радиации, но и ее взаимодействие с озоновым слоем над Антарктидой, поскольку это будет определять как положение тропопаузы, так и интенсивность циркумполярного стратосферного вихря, регулирующего, в том числе, динамику тропосферных струйных течений.

Список литературы

1. Александров Е.И., Прахов А.Н. Сравнительная оценка некоторых климатических характеристик станции Новолазаревская и аэродрома станции Новолазаревская // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Том. 63, № 3 (113). С. 27-38
2. Васильев А.А. Особенности метеорологических условий полетов самолетов над Антарктикой // Труды Гидрометцентра СССР. 1979. Вып. 215. С. 137-143.
3. Васильев А.А., Вильфанд Р.М. Распределение общего содержания озона в конце полярной зимы – ключ к прогнозу экстремальных сезонов? // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 82-87.
4. Габис И.П. Влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) на стратосферный полярный вихрь в Антарктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Том. 70, № 3. С. 353-372. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372>.
5. 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.
6. Иванова А.Р. Тропопауза: многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 23-36.
7. Иванова А.Р. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // Метеорология и гидрология. 2016. №3. С. 22-45.
8. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международная организация гражданской авиации, издание 20-е, июль 2018.
9. Метеорология Южного полушария / под ред. Ч.У. Ньютона. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. 260 с.
10. Саливончик С.В., Какарека С.В. Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Том. 68, № 2. С. 142-159.

11. Сибир Е.Е., Радионов В.Ф. Вариации общего содержания озона на российских антарктических станциях. Результаты многолетних наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Том 64, №3 (117). С. 250-261.
12. Черников А.А. Развитие наблюдений и исследований по аэрологии // Очерки по истории гидрометеорологической службы. Том 3. Книга II. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. С. 177-191.
13. Aceituno P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-Air Circulation // J. Clim. 1989. Vol. 2. P. 341-355.
14. Banerjee A., Fyfe J.C., Polvani L.M., Waugh D., Chan K.-L. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol // Nature. 2020. Vol. 579. P. 544-561. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2120-4>.
15. Barroso J.A., Zurita-Gotor P. Intraseasonal variability of the zonal-mean extratropical tropopause: the role of changes of the polar vortex strength and upper-troposphere wave breaking // J. Atmos. Sci. 2016. Vol. 73. P.1383-1399.
16. Berrisford P., Hoskins B.J., Tyrplis E. Blocking and Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. P. 2881-2898.
17. Bracegirdle T.J., Holmes C.R., Hosking J.S., Marshall G.J., Osman M., Patterson M., Rackow T. Improvements in circumpolar Southern Hemisphere extratropical atmospheric circulation in CMIP6 compared to CMIP5 // Earth and Space Science. 2020. Vol. 7, no. 6. e2019EA001065. <https://doi.org/10.1029/2019EA001065>.
18. Byrne N.J., Shepherd T.G. Seasonal Persistence of Circulation Anomalies in the Southern Hemisphere Stratosphere and Its Implications for the Troposphere // J. Clim. 2018. Vol. 31. P. 3467-3483.
19. Compendium of Findings on the Effects of Climate Change on Weather Hazards and Analysis of the Impacts of Climate Change on Aviation Operations // AeM Series No. 9. WMO, 2025.
20. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter // Bull. Amer. Met. Soc. 1942. Vol. 23. P. 220-238.
21. Cuff T.J., Cai M. Interaction between low- and high-transient eddies in the Southern Hemisphere winter circulation // Tellus. 1996. Vol. 47A. P. 331-350.
22. Diamond R., Sime L.C., Holmes C.R., Schroeder D. CMIP6 Models Rarely Simulate Antarctic Winter Sea-Ice Anomalies as Large as Observed in 2023 // Geophys. Res. Lett. 2024. Vol. 58. 10 pp. <https://doi.org/10.1029/2024GL109265>.
23. Gallego D., Ribera P., Garcia-Herrera R., Hernandez E., Gimeno L. A new look for the Southern Hemisphere jet stream // Climate Dynamics. 2005. Vol. 24. P. 607-621. DOI 10.1007/s00382-005-0006-7.
24. Garnfinkel C.I., White I., Gerber E.P., Son S.-W., Jucker M. Stationary Waves Weaken and Delay the Near-Surface Response to Stratospheric Ozone Depletion // J. Clim. 2023. Vol. 36. P. 565-583. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0874.1.
25. Gerber E.-P., Son S.-W. Quantifying the Summertime Response of the Austral Jet Stream and Hadley Cell to Stratospheric Ozone and Greenhouse Gases // J. Clim. 2014. Vol. 27. P. 5538-5559.
26. Gordon A.E., Cavallo S.M., Novak A.K. Evaluating Common Characteristics of Antarctic Tropopause Polar Vortices // J. Atm. Sci. 2023. Vol. 80. P. 337-352. <https://doi.org/10.1175/jas-d-22-0091.1>
27. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes // Tellus. 2007. Vol. 59A. P. 559-617.
28. Hartmann D.L. The atmospheric general circulation and its variability // J. Met. Soc. Japan, 2007. Vol. 85(B). P. 123-143.
29. Hudson R.D. Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010 // Atm. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. P. 7798-7808. DOI: 10.5194/acp-12-7797-2012.
30. Ivy D.J., Hilgenbrink C., Kinnison D., Plumb R.A., Sheshadri A., Solomon S., Thompson D.W.J. Observed Changes in the Southern Hemispheric Circulation in May // J. Clim. 2017. Vol. 30. P. 527-536. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0394.

31. *Karpechko A.* Jet stream stops shifting as ozone layer recovers // *Nature*. 2020. Vol. 579. P. 500-501.
32. *Kidston J., Frierson D.M.W., Renwick J.A., Vallis G.K.* Observations, Simulations, and Dynamics of Jet Stream Variability and Annular Modes // *J. Clim.* 2010. Vol. 23. P. 6186-6199. DOI: 10.1175/2010JCLI3235.1.
33. *Kohma M., Mizukoshi M., Sato K.* Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica // *J. Clim.* 2022. Vol. 35. P. 4687-4700.
34. *Kushner P., Held I.M., Delworth T.L.* Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Response to Global Warming // *J. Clim.* 2000. Vol. 14. P. 2238-2249.
35. *Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Schwartz M.J., Santee M.L., Pawson S.* Climatology of Upper Tropospheric–Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopauses in MERRA // *J. Clim.* 2014. Vol. 27. P. 3248-3271. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00243.1.
36. *Marshall G.J., Stott P.A., Turner J., Connolley W.M., King J.C., Lachlan-Cope T.A.* Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. L14205. DOI: 10.1029/2004GL019952.
37. *Marshall G.J., Thompson D.W.J., van den Broeke M.R.* The Signature of Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Patterns in Antarctic Precipitation // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, no. 22. P. 11580-11589.
38. *McKay R., Boschat G., Rudeva I., Dowdy A., Rauniyar S., Gillett Z., Purich A., Pepler A., Hope P.* A review of the observed changes in the Southern Hemisphere circulation and their links to rainfall changes in south-eastern Australia. Bureau of Meteorology, Australia, Bureau Research Report No. 054, July 2021.
39. *Meloen J., Siegmund P.C., Sigmond P.* A Lagrangian computation of stratosphere–troposphere exchange in a tropopause-folding event in the subtropical Southern Hemisphere // *Tellus*. 2001. Vol. 53A. P. 368-379.
40. *Nakamura H., Shimo A.* Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset // *J. Clim.* 2004. Vol. 17. P. 1828-1844.
41. *Ndarana T., Waugh D.W.* Climatology of Rossby Wave Breaking on the Southern Hemisphere Tropopause // *J. Atm. Sci.* 2011. Vol. 68. P. 798-811. DOI: 10.1175/2010JAS3460.1
42. *Peña-Ortiz C., Manzini E., Giorgetta M.A.* Tropical Deep Convection Impact on Southern Winter Stationary Waves and Its Modulation by the Quasi-Biennial Oscillation // *J. Clim.* 2019. Vol. 32. P. 7453-7467.
43. *Pourret V., Šavli M., Mahfouf J.-F., Raspaud D., Doerenbecher A., Benichou H., Payan C.* Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE // *Quarterly Royal Meteorology Society*. 2022. Vol. 148. P. 2652-2671. DOI: 10.1002/qj.4329.
44. *Prince H.D., Gullenn J., Gibson P.B., Conway J., Kingston D.G.* A Climatology of Atmospheric Rivers in New Zealand // *J. Clim.* 2021. Vol. 34. P. 4383-4402. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0664.1.
45. *Rea D., Elsbury D., Butler A. H., Sun L., Peings, Y., Magnusdottir G.* Interannual influence of Antarctic sea ice on Southern Hemisphere stratosphere-troposphere coupling // *Geophys. Res. Lett.* 2024. Vol. 51. e2023GL107478. <https://doi.org/10.1029/2023GL107478>.
46. *Riviere G.* A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios // *J. Atm. Sci.* 2011. Vol. 68. P. 1253-1272. DOI: 10.1175/2011JAS3641.1.
47. *Rubin M.J.* Seasonal variations of the Antarctic tropopause // *J. Meteorology*. 1953. Vol. 10. P. 127-134.
48. *Simmons A.J.* Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022 // *Wea. Clim. Dynam. Discuss.* 2022. 45 p. <https://doi.org/10.5194/wcd-2022-19>.
49. *Sivakumar D., Bencherif H., Begue N., Thompson A.M.* Tropopause Characteristics and Variability from 11 yr of SHADOZ Observations in the Southern Tropics and Subtropics // *J. Appl. Met. Clim.* 2011. Vol. 50. P. 1403-1416. DOI: 10.1175/2011JAMC2453.1.
50. *Son S.-W., Lee S., Felstein S.B.* Intraseasonal Variability of the Zonal-Mean Extratropical Tropopause Height // *J. Atm. Sci.* 2007. Vol. 64. P. 608-620. DOI: 10.1175/JAS3855.1
51. *Son S.-W., Polvani L., Waugh D.W., Birner T., Akiyoshi H., Garcia R.R., Gettelman A., Plummer D.A., Rozanov E.* The Impact of Stratospheric Ozone Recovery on Tropopause Height Trends // *J. Clim.* 2009. Vol. 22. P. 429-445. DOI: 10.1175/2008JCLI2215.1.

52. Song J., Li C., Pan J., Zhou W. Climatology of Anticyclonic and Cyclonic Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere // *J. Clim.* 2011. Vol. 24. P. 1239-1251. DOI: 10.1175/2010JCLI13157.1.

53. Speer M.S., Leslie L. M., Hartigan J. Jet Stream Changes over Southeast Australia during the Early Cool Season in Response to Accelerated Global Warming // *Climate*. 2022. Vol. 10. P. 84. <https://doi.org/10.3390/cli10060084>.

54. Stone K.A., Solomon S., Thompson D.W.J., Kinnison D., Fyfe J.C. On the Southern Hemisphere Stratospheric Response to ENSO and Its Impacts on Tropospheric Circulation // *J. Clim.* 2022. Vol. 35. P. 1963-1981.

55. Thompson D.W.J., Crow B.R., Barnes E.A. Intraseasonal Periodicity in the Southern Hemisphere Circulation on Regional Spatial Scales // *J. Atm. Sci.* 2017. Vol. 74. P. 865-877.

56. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vornel H., Selkirk H.B. A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause // *Mon. Wea. Rev.* 2022. Vol. 12. P. 3151-3174.

57. Wang Ya, Huang G., Hu K., Tao W., Li X., Gong H., Gu L., Chang W. Asymmetric Impacts of El Niño and La Niña on the Pacific–South America Teleconnection Pattern // *J. Clim.* 2022. Vol. 35. P. 1825-1838. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0285.1.

58. Wille J.D., Pohl B., Favier V., Winters A.C., Baiman R., Cavallo S.M. et al. Examining atmospheric river life cycles in East Antarctica // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2024. Vol. 129. e2023JD039970. <https://doi.org/10.1029/2023JD039970>.

59. WMO. Definition of the tropopause // *WMO Bull.* 1957. Vol. 6. P. 134-138.

60. Zambri B., Solomon S., Thompson D.W.J., Fu Q. Emergence of Southern Hemisphere stratospheric circulation changes in response to ozone recovery // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14. P. 638-644.

61. Zhu Z., Liu J., Song M., Hu Y. Changes in Extreme Temperature and Precipitation over the Southern Extratropical Continents in Response to Antarctic Sea Ice Loss // *J. Clim.* Vol. 36, no. 14. P 1-41.

62. Zuev V.V., Savelieva E.S., Krupchatnikov V.N., Borovko I.V., Pavlinsky A.V., Chkhetiani O.G., Maslennikova E.A. Antarctic polar vortex dynamics in 2019 and 2020 under the influence of the subtropical stratosphere // *Arctic and Antarctic Research*. 2023. Vol. 69, no. 4. P. 452-463. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-452-463>.

References

1. Aleksandrov E.I., Prahov A.N. Sravnitel'naya ocenka nekotorykh klimaticeskikh karakteristik stanciya Novolazarevskaya i aerodroma stancii Novolazarevskaya. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2017, vol. 63, no. 3 (113), pp. 27-38 [in Russ.].

2. Vasil'ev A.A. Osobennosti meteorologicheskikh uslovij poletov samoletov nad Antarktikoj. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1979, vol. 215, pp. 137-143 [in Russ.].

3. Vasil'ev A.A., Vil'fand R.M. The distribution of the total ozone values in the end of the polar winter – the key to the forecast of extreme seasons? *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 349-352. DOI: 10.3103/S1068373910050080.

4. Gabis I.P. Vliyanie kvazidvuhletnih oscillyacij (KDO) na stratosfernyj polyarnyj vihr' v Antarktike [Influence of quasi-biennial oscillations (QBO) on the stratospheric polar vortex in the Antarctic]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2024, vol. 70, no. 3, pp. 353-372 [in Russ.]. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372.

5. 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.

6. Ivanova A.R. The tropopause: Variety of definitions and modern approaches to identification. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 808-817. <https://doi.org/10.3103/S1068373913120029>.

7. Ivanova A.R. Stratosphere-troposphere exchange and its specific features at extratropical latitudes. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, vol. 41, no. 3, pp. 170-185. DOI: 10.3103/S106837391603002X.

8. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoj aeronavigacii. Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii. Mezhdunarodnaya organizaciya grazhdanskoj aviacii, izdanie 20-e, iyul' 2018 [in Russ.].

9. Meteorologiya Yuzhnogo polushariya / pod red. Ch.U. N'yutona. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1976, 260 p. [in Russ.].

10. Salivonchik S.V., Kakareka S.V. Analiz trendov klimaticheskih pokazatelej po dannym nazemnyh meteonablyudenij i reanaliza na Zemle Enderbi, Vostochnaya Antarktika [Analysis of trends of meteorological characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2022, vol. 68, no. 2, pp. 142-159 [in Russ.].

11. Sibir E.E., Radionov V.F. Variacii obshchego soderzhaniya ozona na rossijskih antarkticheskikh stanciyah. Rezul'taty mnogoletnih nablyudenij. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2018, vol. 64, no. 3 (117), pp. 250-261 [in Russ.].

12. Chernikov A.A. Razvitie nablyudenij i issledovanij po aerologii. *Ocherki po istorii gidrometeorologicheskoy sluzhby. Tom 3. Kniga II.* Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat publ, 2005, pp. 177-191 [in Russ.].

13. Aceituno P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-Air Circulation. *J. Clim.*, 1989, vol. 2, pp. 341-355.

14. Banerjee A., Fyfe J.C., Polvani L.M., Waugh D., Chan K.-L. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol. *Nature*, 2020, vol. 579, pp. 544-561. DOI: 10.1038/s41586-020-2120-4.

15. Barroso J.A., Zurita-Gotor P. Intraseasonal variability of the zonal-mean extratropical tropopause: the role of changes of the polar vortex strength and upper-troposphere wave breaking. *J. Atmos. Sci.*, 2016, vol. 73, pp. 1383-1399.

16. Berrisford P., Hoskins B.J., Tyrplis E. Blocking and Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 2007, vol. 64, pp. 2881-2898.

17. Bracegirdle T.J., Holmes C.R., Hosking J.S., Marshall G.J., Osman M., Patterson M., Rackow T. Improvements in circumpolar Southern Hemisphere extratropical atmospheric circulation in CMIP6 compared to CMIP5. *Earth and Space Science*, 2020, vol. 7, no. 6. e2019EA001065. DOI: 10.1029/2019EA001065.

18. Byrne N.J., Shepherd T.G. Seasonal Persistence of Circulation Anomalies in the Southern Hemisphere Stratosphere and Its Implications for the Troposphere. *J. Clim.*, 2018, vol. 31, pp. 3467-3483.

19. Compendium of Findings on the Effects of Climate Change on Weather Hazards and Analysis of the Impacts of Climate Change on Aviation Operations. *AeM Series No. 9*, WMO, 2025.

20. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1942, vol. 23, pp. 220-238.

21. Cuff T.J., Cai M. Interaction between low- and high-transient eddies in the Southern Hemisphere winter circulation. *Tellus*, 1996, vol. 47A, pp. 331-350.

22. Diamond R., Sime L.C., Holmes C.R., Schroeder D. CMIP6 Models Rarely Simulate Antarctic Winter Sea-Ice Anomalies as Large as Observed in 2023. *Geophys. Res. Lett.*, 2024, vol. 58, 10 p. DOI: 10.1029/2024GL109265.

23. Gallego D., Ribera P., Garcia-Herrera R., Hernandez E., Gimeno L. A new look for the Southern Hemisphere jet stream. *Climate Dynamics*, 2005, vol. 24, pp. 607-621. DOI: 10.1007/s00382-005-0006-7.

24. Garnfinkel C.I., White I., Gerber E.P., Son S.-W., Jucker M. Stationary Waves Weaken and Delay the Near-Surface Response to Stratospheric Ozone Depletion. *J. Clim.*, 2023, vol. 36, pp. 565-583. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0874.1.

25. Gerber E.-P., Son S.-W. Quantifying the Summertime Response of the Austral Jet Stream and Hadley Cell to Stratospheric Ozone and Greenhouse Gases. *J. Clim.*, 2014, vol. 27, pp. 5538-5559.

26. Gordon A.E., Cavallo S.M., Novak A.K. Evaluating Common Characteristics of Antarctic Tropopause Polar Vortices. *J. Atm. Sci.*, 2023, vol. 80, pp. 337-352. DOI: 10.1175/jas-d-22-0091.1.
27. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes. *Tellus*, 2007, vol. 59A, pp. 559-617.
28. Hartmann D.L. The atmospheric general circulation and its variability. *J. Met. Soc. Japan*, 2007, vol. 85(B), pp. 123-143.
29. Hudson R.D. Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010. *Atm. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 7798-7808. DOI: 10.5194/acp-12-7797-2012.
30. Ivy D.J., Hilgenbrink C., Kinnison D., Plumb R.A., Sheshadri A., Solomon S., Thompson D.W.J. Observed Changes in the Southern Hemispheric Circulation in May. *J. Clim.*, 2017, vol. 30, pp. 527-536. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0394.
31. Karpechko A. Jet stream stops shifting as ozone layer recovers. *Nature*, 2020, vol. 579, pp. 500-501.
32. Kidston J., Frierson D.M.W., Renwick J.A., Vallis G.K. Observations, Simulations, and Dynamics of Jet Stream Variability and Annular Modes. *J. Clim.*, 2010, vol. 23, pp. 6186-6199. DOI: 10.1175/2010JCLI3235.1.
33. Kohma M., Mizukoshi M., Sato K. Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 4687-4700.
34. Kushner P., Held I.M., Delworth T.L. Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Response to Global Warming. *J. Clim.*, 2000, vol. 14, pp. 2238-2249.
35. Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Schwartz M.J., Santee M.L., Pawson S. Climatology of Upper Tropospheric–Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopauses in MERRA. *J. Clim.*, 2014, vol. 27, pp. 3248-3271. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00243.1.
36. Marshall G.J., Stott P.A., Turner J., Connolley W.M., King J.C. Lachlan-Cope T.A. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, vol. 31, L14205. DOI: 10.1029/2004GL019952.
37. Marshall G.J., Thompson D.W.J., van den Broeke M.R. The Signature of Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Patterns in Antarctic Precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 22, pp.11580-11589.
38. McKay R., Boschat G., Rudeva I., Dowdy A., Rauniyar S., Gillett Z., Purich A., Pepler A., Hope P. A review of the observed changes in the Southern Hemisphere circulation and their links to rainfall changes in south-eastern Australia. Bureau of Meteorology, Australia, Bureau Research Report No. 054, July 2021.
39. Meloen J., Siegmund P.C., Sigmond P. A Lagrangian computation of stratosphere–troposphere exchange in a tropopause-folding event in the subtropical Southern Hemisphere. *Tellus*, 2001, vol. 53A, pp. 368-379.
40. Nakamura H., Shimpo A. Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset. *J. Clim.*, 2004, vol. 17, pp. 1828-1844.
41. Ndarana T., Waugh D.W. Climatology of Rossby Wave Breaking on the Southern Hemisphere Tropopause. *J. Atm. Sci.*, 2011, vol. 68, pp. 798-811. DOI: 10.1175/2010JAS3460.1.
42. Peña-Ortiz C., Manzini E., Giorgetta M.A. Tropical Deep Convection Impact on Southern Winter Stationary Waves and Its Modulation by the Quasi-Biennial Oscillation. *J. Clim.*, 2019, vol. 32, pp. 7453-7467.
43. Pourret V., Šavli M., Mahfouf J.-F., Raspaud D., Doerenbecher A., Benichou H., Payan C. Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE. *Quarterly Royal Meteorology Society*, 2022, vol. 148, pp. 2652-2671. DOI: 10.1002/qj.4329.
44. Prince H.D., Gullenn J., Gibson P.B., Conway J., Kingston D.G. A Climatology of Atmospheric Rivers in New Zealand. *J. Clim.*, 2021, vol. 34, pp. 4383-4402. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0664.1.
45. Rea D., Elsbury D., Butler A. H., Sun L., Peings, Y., Magnusdottir G. Interannual influence of Antarctic sea ice on Southern Hemisphere stratosphere-troposphere coupling. *Geophys. Res. Lett.*, 2024, vol. 51, e2023GL107478. <https://doi.org/10.1029/2023GL107478>.
46. Riviere G. A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios. *J. Atm. Sci.*, 2011, vol. 68, pp. 1253-1272. DOI: 10.1175/2011JAS3641.1

47. Rubin M.J. Seasonal variations of the Antarctic tropopause. *J. Meteorology.*, 1953, vol. 10, pp. 127-134.
48. Simmons A.J. Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022. *Wea. Clim. Dynam. Discuss.*, 2022, 45 p. DOI: 10.5194/wcd-2022-19.
49. Sivakumar D., Bencherif H., Begue N., Thompson A.M. Tropopause Characteristics and Variability from 11 yr of SHADOZ Observations in the Southern Tropics and Subtropics. *J. Appl. Met. Clim.*, 2011, vol. 50, pp. 1403-1416. DOI: 10.1175/2011JAMC2453.1.
50. Son S.-W., Lee S., Felstein S.B. Intraseasonal Variability of the Zonal-Mean Extratropical Tropopause Height. *J. Atm. Sci.*, 2007, vol. 64, pp. 608-620. DOI: 10.1175/JAS3855.1.
51. Son S.-W., Polvani L., Waugh D.W., Birner T., Akiyoshi H., Garcia R.R., Gettelman A., Plummer D.A., Rozanov E. The Impact of Stratospheric Ozone Recovery on Tropopause Height Trends. *J. Clim.*, 2009, vol. 22, pp. 429-445. DOI: 10.1175/2008JCLI2215.1.
52. Song J., Li C., Pan J., Zhou W. Climatology of Anticyclonic and Cyclonic Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere. *J. Clim.*, 2011, vol. 24, pp. 1239-1251. DOI: 10.1175/2010JCLI3157.1.
53. Speer M.S., Leslie L.M., Hartigan J. Jet Stream Changes over Southeast Australia during the Early Cool Season in Response to Accelerated Global Warming. *Climate*, 2022, vol. 10, pp. 84. DOI: 10.3390/cli10060084.
54. Stone K.A., Solomon S., Thompson D.W.J., Kinnison D., Fyfe J.C. On the Southern Hemisphere Stratospheric Response to ENSO and Its Impacts on Tropospheric Circulation. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 1963-1981.
55. Thompson D.W.J., Crow B.R., Barnes E.A. Intraseasonal Periodicity in the Southern Hemisphere Circulation on Regional Spatial Scales. *J. Atm. Sci.*, 2017, vol. 74, pp. 865-877.
56. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vomel H., Selkirk H.B. A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause. *Mon. Wea. Rev.*, 2022, vol. 12, pp. 3151-3174.
57. Wang Ya, Huang G., Hu K., Tao W., Li X., Gong H., Gu L., Chang W. Asymmetric Impacts of El Niño and La Niña on the Pacific–South America Teleconnection Pattern. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 1825-1838. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0285.1.
58. Wille J.D., Pohl B., Favier V., Winters A.C., Baiman R., Cavallo S.M. et al. Examining atmospheric river life cycles in East Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 2024, vol. 129, e2023JD039970. DOI: 10.1029/2023JD039970.
59. WMO. Definition of the tropopause. *WMO Bull.*, 1957, vol. 6, pp. 134-138.
60. Zambri B., Solomon S., Thompson D.W.J., Fu Q. Emergence of Southern Hemisphere stratospheric circulation changes in response to ozone recovery. *Nature Geoscience*, 2021, vol. 14, pp. 638-644.
61. Zhu Z., Liu J., Song M., Hu Y. Changes in Extreme Temperature and Precipitation over the Southern Extratropical Continents in Response to Antarctic Sea Ice Loss. *J. Clim.*, vol. 36, no. 14, pp. 1-41.
62. Zuev V.V., Savelieva E.S., Krupchatnikov V.N., Borovko I.V., Pavlinsky A.V., Chkhetiani O.G., Maslennikova E.A. Antarctic polar vortex dynamics in 2019 and 2020 under the influence of the subtropical stratosphere. *Arctic and Antarctic Research*, 2023, vol. 69, no. 4, pp. 452-463. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-452-463.

Поступила 28.01.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;

принята в печать 18.06.2025.

Submitted 28.01.2025; approved after reviewing 04.06.2025;

accepted for publication 18.06.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-28-43>

УДК 551.509.33

Сравнение двух систем внутрисезонного ансамблевого прогнозирования на основе модели ПЛАВ

*И.А. Куликова, Е.Н. Круглова, В.М. Хан,
Р.Б. Зарипов, В.Г. Мизяк, М.А. Толстых*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
kulikova@mecom.ru; kruglova@mecom.ru; khan@mecom.ru*

Проводится сравнение двух систем ансамблевого прогнозирования с использованием модели ПЛАВ072L96 – S1 и S2, рассматриваются прогнозы с заблаговременностью до 6 недель. Система S1 использует ансамбль из 61 члена, для генерации ансамбля начальных состояний используется метод бридинга. В новой системе S2 используется 41 член, ансамбль начальных состояний подготавливается с использованием усвоения данных на базе локального ансамблевого фильтра Калмана. Показано, что, несмотря на меньшее количество членов ансамбля, система S2 не только не уступает системе S1, но и обладает некоторыми преимуществами, особенно на длительных интервалах интегрирования (до 46 дней). При этом обе системы характеризуются заниженным разбросом ансамбля и асимметрией распределения прогностических значений, что требует дальнейшей корректировки. Демонстрируется предпочтительность использования системы S2 и ее дальнейшего развития.

Ключевые слова: ансамбли прогнозов, метод бридинга, фильтр Калмана, верификация

Comparison of two ensemble forecasting systems using the SLAV072L96 model

*I.A. Kulikova, E.N. Kruglova, V.M. Khan,
R.B. Zaripov, V.G. Mizyak, M.A. Tolstykh*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
kulikova@mecom.ru; kruglova@mecom.ru; khan@mecom.ru*

The paper presents a comparison of two ensemble forecasting systems using the SLAV072L96 model: S1 and S2, considering forecasts with a lead time up to 6 weeks. The S1 system uses an ensemble of 61 members, the breeding method is applied to generate the ensemble of initial states. The newer S2 system uses 41 members, the ensemble of initial states is prepared using data assimilation based on the local ensemble Kalman filter. It is shown that despite the smaller number of ensemble members, the S2 system is not only not inferior to the S1 system, but also has some advantages, especially at long integration intervals (up to 46 days). At the same time, both systems are characterized by insufficient ensemble spread and asymmetry in the distribution of forecast values, which requires further adjustment and improvement. It is concluded that the use and further development of the S2 system is preferable.

Keywords: forecast ensembles, breeding method, Kalman filter, verification

Введение

Существенный вклад в развитие и совершенствование метеорологического прогнозирования внесли ансамблевые прогностические системы. Прогнозирование с использованием ансамблей, инициированное в декабре 1992 года Национальным центром прогнозирования окружающей среды США и Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) в качестве дополнения к системе детерминистских среднесрочных прогнозов погоды, получило широкое распространение в мировой метеорологической практике [15, 18]. Важную роль в развитии данного подхода сыграли теоретические и экспериментальные работы Эпштейна [9], Флеминга [10, 11] и Лейта [14], посвященные проблемам неопределенности.

В настоящее время ансамблевый подход широко используется на практике не только для предсказания погоды, но и климатической изменчивости (на временных масштабах от сезонов до десятилетий). Целесообразность использования ансамблей связана не только с недостаточной точностью представления начальных данных, которые используются в моделях, и с несовершенством самих моделей, но и с хаотическим поведением атмосферы и океана. Для описания физических процессов, происходящих в атмосфере и океане, с учетом неопределенности необходимо использовать функции распределения вероятностей характеристик состояния в соответствующем фазовом пространстве. Математическим решением данной задачи может служить уравнение Лиувилля [7, 8]. Однако стохастический подход требует больших вычислительных ресурсов, поэтому на практике изменения функции распределения вероятностей во времени представляются путем использования ансамблевых прогнозов. Современные вычислительные системы позволяют глобальным метеорологическим центрам оперировать ансамблями размерностью порядка нескольких десятков реализаций прогнозов, на основе которых можно строить различные распределения метеорологических параметров, включая характеристики климатических экстремумов.

Основной вопрос, связанный с использованием ансамблей, заключается в выборе процедуры конструирования ансамбля. В Гидрометцентре России разработаны и используются на практике две основные системы ансамблевого прогнозирования, основанные на модели ПЛАВ072L96. В обеих системах схемы параметризаций идентичны. В первом случае при подготовке ансамбля начальных состояний используется метод бридинга [17] (система S1). «Выращивание» начальных возмущений при использовании бридинга проводится 6-часовыми циклами в течение 72 часов. Каждые 6 часов среднее по ансамблю приравнивается к данным анализа, а разброс остается неизменным (если он небольшой) или несколько уменьшается. Разброс членов ансамбля оценивается по высоте изобарической поверхности 500 гПа и полю ветра на ней, в отличие от полной энергии возмущений [1]. После анализа ко всем членам ансамбля добавляются

небольшие случайные возмущения. С подобных полей считается ансамблевый прогноз на следующие 6 часов. Для прогнозов по текущим данным используется ансамбль из одного невозмущенного члена и 60 возмущенных членов ансамбля, для исторических прогнозов число возмущенных членов ансамбля составляет 10 [5].

В [3] представлена новая система ансамблевого среднесрочного прогнозирования, которая базируется на ассимиляции метеорологических данных, включая спутниковые, с использованием локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (Local Ensemble Transform Kalman Filter, LETKF) (система S2). В процессе ассимиляции метеорологических данных решение задачи ищется с учетом наблюдений в момент анализа, прогноза на интервале между предыдущим и текущим моментом анализа, а также ковариаций ошибок полей первого приближения. Уравнения прогностической модели применяются не только для получения прогноза среднего состояния (первого приближения), но и для прогнозирования ковариаций ошибок анализа, которые учитывают ковариации ошибок самой прогностической модели. В сравнении с методом 4D-VAR, данный подход позволяет явно учитывать ошибки прогностической модели. Кроме того, использование фильтров Калмана не ограничивает временной интервал окна ассимиляции.

В данной работе с использованием статистических методов и общепринятых на практике инструментов верификации прогнозов проводится сравнение двух систем ансамблевого прогнозирования на основе модели ПЛАВ072L96: S1 и S2. Показано, что система S2, несмотря на меньшее количество членов ансамбля, не только не уступает системе S1, но и обладает некоторыми преимуществами, наиболее четко выраженными на длительных интервалах интегрирования (до 46 дней). И в том, и в другом случае наблюдения слишком часто выходят за пределы ансамбля, что указывает на недостаточный разброс ансамбля. Отсюда следует, что одним из потенциалов повышения качества прогнозов на базе модели ПЛАВ является дальнейшее усовершенствование и развитие ансамблевой прогностической системы. С учетом требуемых вычислительных ресурсов система S2 является более предпочтительной по сравнению с S1 и может с успехом заменить ее в оперативной практике.

1. Исходные данные и методы исследования

Для сравнения двух систем ансамблевого прогнозирования S1 и S2 использовались детализированные по времени прогнозы, полученные с помощью модели ПЛАВ072L96. Данные охватывали период с 20 июня 2024 года по 14 ноября 2024 года и включали 22 случая прогнозов, выполненных в оперативном режиме. Анализировались среднесуточные числовые поля, представленные на сетке с разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ для пяти метеорологических параметров: геопотенциала на уровне 500 гПа (H500), атмосферного давления на уровне моря (MSLP), температуры воздуха на

уровне 850 гПа (T850), температуры у поверхности Земли (TRSF) и интенсивности атмосферных осадков (PREC). Чтобы минимизировать систематические ошибки, связанные с долгосрочным моделированием, прогнозы были представлены в виде аномалий относительно модельного климата за период 1991–2015 годов.

В анализе учитывались не только усредненные аномалии по ансамблю, но и аномалии, рассчитанные для каждого отдельного члена ансамбля. Также оценивались вероятности трех категорий аномалий – терцилей (ниже нормы, норма, выше нормы) для пяти параметров (H500, MSLP, T850, TRSF, PREC) в рамках шести временных интервалов: четырех недельных (1–7, 8–14, 15–21, 22–28 сутки) и двух месячных (1–30 и 16–46 сутки). При построении диаграмм Талаграна, основанных на суточных аномалиях для каждого члена ансамбля, временные интервалы варьировались, включая как более короткие, так и более длинные периоды по сравнению с указанными. Кроме терцилей, для определения границ категорий аномалий использовались 10-й и 90-й процентиля климатического распределения, что позволило выделить экстремальные значения метеорологических параметров.

Эталонными архивами служили данные реанализа ЕЦСПП (ERA5) полей аномалий H500, MSLP, T850, TRSF, PREC за 1991–2015 гг., а также за рассматриваемый прогностический период с 20 июня по 31 декабря 2024 года.

В состав критериев качества прогнозов по величине аномалий включены рекомендованные руководством [16] параметры: средняя квадратическая ошибка (RMSE), пространственный коэффициент корреляции аномалий (ACC) и оценка мастерства прогнозов по отношению к климату (MSSS). Оценка успешности вероятностных прогнозов трех градаций осуществлялась посредством расчетов площади под кривой ROC (AROC), построенной на сопоставлении относительной доли удачных прогнозов (HR) и ложных тревог (FAR) при различных уровнях пороговой вероятности. Формулы для расчетов и более подробную информацию по данным критериям можно найти в [4]. Перечисленные критерии рассчитывались по сеточным данным в пределах трех регионов: внетропические широты Северного полушария (20–90° с. ш.), тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), Северная Евразия (30–85° с. ш., 0–140° в. д.)

2. Анализ качества ансамблевых систем

Одним из наиболее распространенных на практике инструментов оценки качества ансамблевой прогностической системы являются диаграммы Талаграна (или ранговые гистограммы) [12]. Для их построения применяется следующая процедура. Ансамбль из N прогнозов f_1, \dots, f_N упорядочивается по возрастанию, и весь диапазон прогнозов разбивается на $N+1$ интервалов (первый интервал включает значения меньше минимального значения f , $(N+1)$ -й интервал включает значения больше

максимального значения f). Затем для каждого интервала определяется относительная частота наблюдений. При построении диаграмм используется метод агрегации или объединения, при котором все точки, расположенные в регионе, например, в Северной Евразии (1311 узлов сетки), объединяются в один массив, на основе которого рассчитываются относительные частоты наблюдений. С учетом 22 начальных дат прогноза, объем выборки для территории Северной Евразии составляет 28842 случая.

На рис. 1 представлены диаграммы Талаграна для двух ансамблевых систем S1 и S2, построенные для приземной температуры воздуха на недельном и месячном интервалах интегрирования. U-образный вид диаграмм свидетельствует о недостаточности разброса в ансамбле и в том, и в другом случаях, а асимметрия распределения прогностических значений указывают на наличие систематической ошибки в прогнозах.

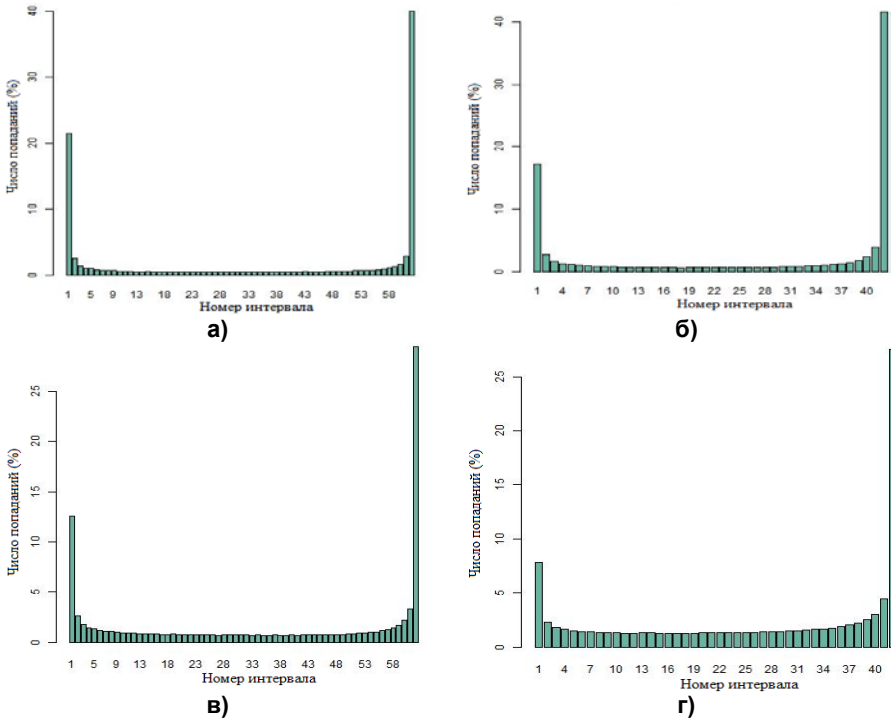


Рис. 1. Диаграммы Талаграна, построенные для двух систем: S1 (левая панель) и S2 (правая панель) модели ПЛАВ072L96 на недельном (верхняя панель) и месячном (нижняя панель) интервалах интегрирования на территории Северной Евразии для приземной температуры воздуха (28842 случая).
Fig. 1. Talagrand diagrams constructed for two schemes S1 (left panel) and S2 (right panel) of the SLAV072L96 model on weekly (upper panel) and monthly (lower panel) integration intervals over the territory of Northern Eurasia for surface air temperature (28842 cases).

На недельном интервале интегрирования для систем S1 (рис. 1а) и S2 (рис. 1б) примерно 61 % и 58 % данных наблюдений (анализа), соответственно, оказываются за пределами ансамбля. При этом небольшое преимущество системы S2 отмечается в области прогнозов отрицательных аномалий температуры воздуха. На месячном интервале интегрирования преимущества системы S2 (рис. 1г) по сравнению с системой S1 (рис. 1в) становятся более заметными, – за пределами ансамбля прогнозов оказываются соответственно 34 % и 43 % данных анализа.

Для дальнейшего сравнения двух схем ансамблевого прогноза рассчитывалась величина разброса прогнозируемых системой величин, обычно определяемая как среднеквадратическое отклонение прогностических значений во всех реализациях ансамбля от среднего по ансамблю прогноза. На рис. 2 приводятся графики изменения среднеквадратического отклонения со временем для двух систем S1 и S2 для приземной температуры воздуха на территории Северной Евразии. Как видно, на всех интервалах интегрирования величина разброса для системы S2 больше, чем для системы S1. С увеличением заблаговременности прогноза различия становятся более существенными. Аналогичные выводы получены для Северного полушария и тропиков, а также для других метеорологических параметров. Поскольку в идеальном случае разброс в ансамбле должен включать фактическое значение метеорологического элемента, можно предположить, что система S2 имеет определенные преимущества, особенно на долговременных интервалах интегрирования, т. е. в контексте долгосрочных прогнозов.

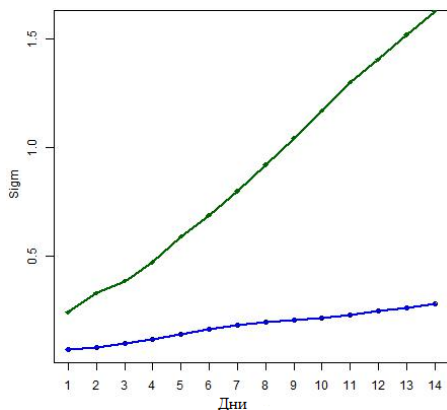


Рис. 2. Временной ход среднеквадратического отклонения (sigma) прогностических значений аномалий температуры воздуха во всех реализациях ансамбля от среднего по ансамблю прогноза для двух схем прогноза S1 (синяя кривая) и S2 (зеленая кривая) на территории Северной Евразии.

Fig. 2. Time course of the standard deviation (sigma) of the forecast values of air temperature anomalies in all ensemble realizations from the ensemble average forecast for two forecast schemes S1 (blue curve) and S2 (green curve) in the territory of Northern Eurasia.

3. Оценки качества прогнозов на внутрисезонных интервалах времени

В таблице приводятся осредненные за весь рассматриваемый период значения коэффициента корреляции аномалий ACC, рассчитанные для внутритропических широт Северного полушария. Согласно таблице, система S2 имеет небольшие преимущества по сравнению с S1, наиболее четко выраженные на длительных интервалах времени. Более заметны различия для атмосферного давления (MSLP), являющегося, вследствие большой изменчивости, одним из наиболее трудных элементов для прогнозирования. В таблице для средних значений ACC представлены доверительные интервалы для тех случаев, когда различия между системами S1 и S2 являются статистически значимыми.

Таблица. Средние значения коэффициента корреляции аномалий ACC среднего по ансамблю прогнозов, полученные на базе двух систем ансамблевого прогноза S1 и S2 для Северного полушария (22 начальные даты прогноза: с 20 июня по 14 ноября 2024 г., в скобках представлены доверительные интервалы)

Table. Averaged anomaly correlation coefficient (ACC) values of ensemble mean forecast obtained with two ensemble prediction systems S1 and S2 for Northern hemisphere (forecasts for 22 initial dates from 20 of June to 14th of November 2024; confidence intervals are given in the parentheses)

Система/ интервал	Неделя 1	Неделя 2	Неделя 3	Неделя 4	Месяц 1	Месяц 2
TRSF						
S1	0.68	0.36	0.23	0.21	0.45	0.46
S2	0.68	0.39	0.25	0.23	0.47	0.49
PREC						
S1	0.36	0.14	0.10	0.09	0.26	0.19
S2	0.37	0.16	0.12	0.12	0.28	0.21
H500						
S1	0.86	0.40	0.25	0.12	0.49	0.18
S2	0.87	0.45	0.28	0.17	0.55	0.27
MSLP						
S1	0.84	0.39	0.19	0.05	0.44 (0.380-0.500)	0.10 (0.015-0.185)
S2	0.86	0.44	0.27	0.12	0.56 (0.503-0.620)	0.26 (0.186-0.339)
T850						
S1	0.75	0.37	0.22	0.12	0.47	0.19
S2	0.76	0.40	0.24	0.17	0.49	0.23

Задача статистического оценивания распределения среднего решалась путем многократного повторного случайного отбора с заменой из исходной выборки. Данный подход, известный как «бутстреп» [6],

особенно полезен, когда теоретическое распределение статистики неизвестно или сложно вычислить. Повторные бутстреп-выборки были сгенерированы с использованием генератора случайных чисел в количестве равном 500 для каждого временного ряда отдельно. Доверительные интервалы, найденные для выборочных статистик, рассматривались как интервальные оценки соответствующих параметров генеральной совокупности. Средние значения АСС считались значимо отличающимися друг от друга (в пределах 10 % уровня значимости) в том случае, если соответствующие доверительные интервалы не перекрывались.

Более наглядные примеры, демонстрирующие сходство и различия двух систем S1 и S2, могут быть получены с помощью квартильного анализа, позволяющего разделить данные на четыре равные части (квартили), каждая из которых содержит 25 % наблюдений [19]. Квартили используются для построения диаграммы размаха (так называемого «ящика с усами»), которая наглядно отображает распределение данных, медиану и выбросы. Квартильный размах (разница между третьим и первым квартилем) дает представление о разбросе данных вокруг медианы и их изменчивости. Квартильный анализ относится к непараметрическим методам, т. е. не требует предположений о нормальности распределения данных. Среди основных преимуществ квартильного анализа нельзя не отметить также устойчивость к выбросам и возможность сравнения данных различной размерности.

На рис. 3 приводятся диаграммы размаха для коэффициента корреляции аномалий АСС. Полученные графики свидетельствуют о небольшом преимуществе системы S2 по сравнению с S1, как с точки зрения медианы распределения, так и нижнего (верхнего) квартилей. Значения коэффициента корреляции аномалий АСС, равные 0.6, обычно, в частности в ЕЦСПП, используются в качестве порогового значения, ограничивающего интервал практической предсказуемости [13]. Как видно из графиков, для обеих систем ансамблевого прогноза интервал практической предсказуемости, за исключением полей осадков, ограничивается первой прогностической неделей. Для осадков значения коэффициента корреляции аномалий АСС даже для первой недели прогноза не превышают 0.5. На месячном интервале интегрирования для системы S2 примерно в 50 % случаях, за исключением прогнозов осадков, значения коэффициента корреляции аномалий превышают 0.5–0.6.

В ряде исследований [например, 2] показаны преимущества использования вероятностных формулировок прогнозов. На рис. 4 приводятся результаты квартильного анализа агрегированного показателя качества вероятностных прогнозов, а именно площади под кривой ROC (AROC) [4, 16] для градации «выше нормы». Когда доли оправдавшихся прогнозов и ложных тревог равны (отсутствие полезного сигнала), AROC = 0.5 (уровень случайного прогноза). Критерий ROC используется для характеристики разрешающей способности прогностической системы (resolution)

или, иными словами, «умения» распределять наборы событий по подмножествам в зависимости от распределения наблюдаемых частот. Разрешающая способность модели при использовании системы S2 повышается, хотя и очень незначительно. Важно отметить, что улучшения затрагивают месячные интервалы интегрирования, а также прогнозы такого элемента, как осадки.

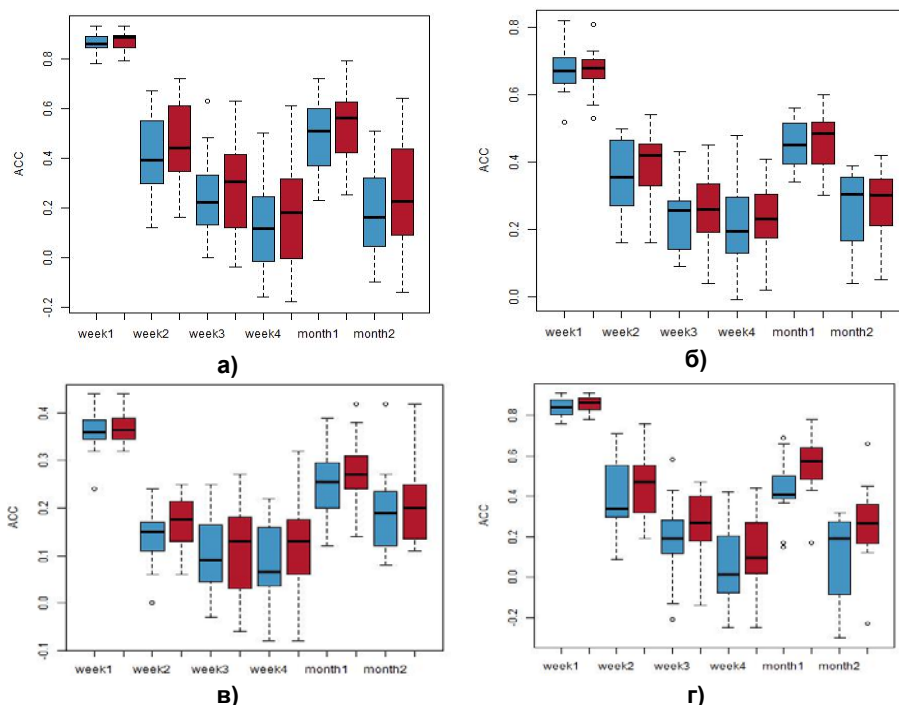


Рис. 3. Квартильный анализ оценок качества прогнозов (коэффициент корреляции аномалий ACC) для полей: H500 (а); приземной температуры воздуха (б); осадков (в); атмосферного давления (г) для Северного полушария (синий цвет соответствует системе S1, красный – S2).

Fig. 3. Quartile analysis of quality assessments of forecasts (anomaly correlation coefficient ACC) for the fields: H500 (a); surface air temperature (б); precipitation (в); atmospheric pressure (г) for the Northern Hemisphere (blue color corresponds to the S1 scheme, red – S2).

Полученные выше оценки позволяют сделать вывод, что использование вероятностных формулировок расширяет временные рамки «полезности» прогнозов по сравнению с детерминистским подходом с одной недели до одного месяца, как для системы S2, так и для системы S1. В то же время на временных интервалах в пределах второй, третьей и четвертой недель предсказуемость метеорологических величин ограничивается как фундаментальными свойствами атмосферы, в частности неустойчивостью, так и современным уровнем развития гидродинамического моделирования.

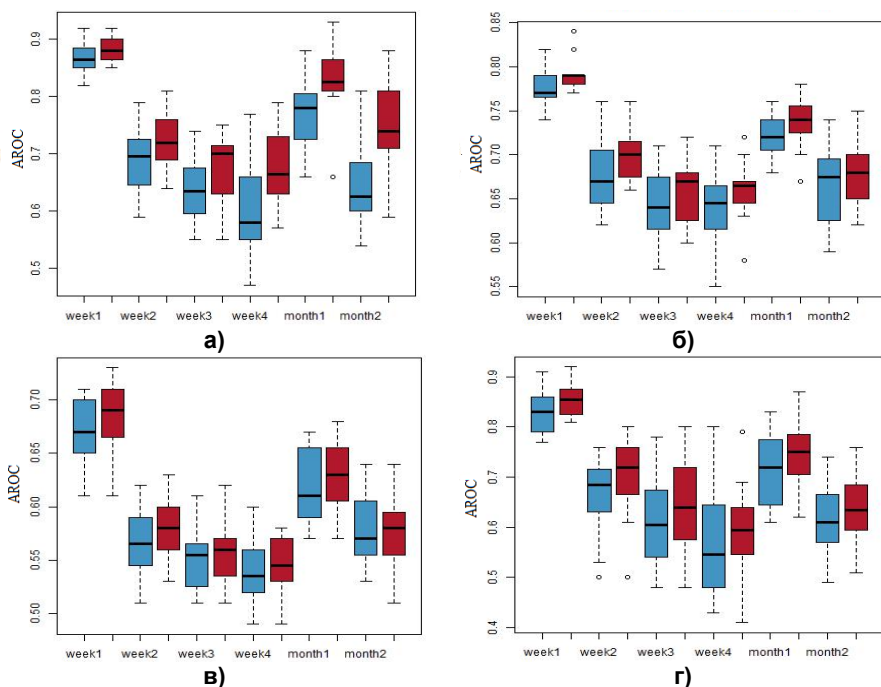


Рис. 4. Квартильный анализ оценок качества вероятностных прогнозов (AROC) для полей: H500 (а); приземной температуры воздуха(б); осадков (в); атмосферного давления (г) для градации выше нормы (AROC) для Северного полушария (20 июня – 14 ноября 2024 г.) (синий цвет соответствует схеме S1, красный – S2).

Fig. 4. Quartile analysis of the quality estimates of probabilistic forecasts (AROC) for the fields: H500 (a); surface air temperature (б); precipitation (в); atmospheric pressure (г) for the gradation above normal (AROC) for the Northern Hemisphere (June 20 – November 14, 2024) (blue color corresponds to the S1 scheme, red – S2).

4. Экстремальные явления

Ансамблевый подход, позволяя определять не только вероятности метеорологических событий, но и выбранные статистические параметры прогнозируемого распределения вероятностей вектора состояния, является важным инструментом прогнозирования экстремальных метеорологических явлений на длительных интервалах времени. Выбор схемы (S1 или S2), обладающей определенными преимуществами в этом контексте, может помочь снизить риски, связанные с экстремальными метеорологическими явлениями, оказывающие все возрастающее негативное влияние на различные отрасли экономики и социальные сферы жизни общества.

Оценка успешности вероятностных прогнозов экстремальных метеорологических явлений требует комплексного подхода, учитывающего как статистические метрики, так и практическую значимость

прогнозов. Весьма полезной в этом контексте может оказаться кривая ROC (Receiver Operating Characteristic curve), оценивающая разрешающую способность модели различать экстремальные события и не-события. Площадь под кривой (AROC) используется как мера качества прогноза. Для получения более полного представления о качестве прогнозов строятся диаграммы надежности (reliability) и гистограммы частот, характеризующие соответственно надежность, показывающую насколько хорошо прогнозируемые вероятности соответствуют наблюдаемым частотам событий, и избирательность (sharpness) системы прогнозов [16].

С помощью данных критериев решалась задача оценки успешности вероятностных прогнозов экстремальных значений температуры воздуха (больше 90 и меньше 10-го перцентилей), полученных на основе прогностических ансамблей S1 и S2 для каждого вышеуказанного региона и временного интервала в отдельности. На рис. 5а и рис. 5б приводятся кривые ROC, построенные для прогнозов экстремальных значений температуры воздуха (выше 90-го перцентиля) по результатам интегрирования модели ПЛАВ072L96 на недельном и месячном интервалах для систем S1 и S2 на территории Северной Евразии (начальная дата прогноза 15 августа 2024 г.). Как видно, на недельном интервале интегрирования различия практически отсутствуют, на месячном интервале небольшое преимущество имеет система S2. Диаграммы надежности подтверждают указанные различия, предсказанные системой S2 вероятности (рис. 5г) располагаются ближе к диагональной линии, чем в случае системы S1 (рис. 5в).

Избирательность (sharpness) относится к способности модели предсказывать экстремальные или редкие события с высокой точностью и уверенностью. Эта метрика характеризует, насколько хорошо выражены прогнозы модели, т. е. насколько модель склонна выдавать предсказания с высокой уверенностью (например, с вероятностью близкой к 0 % или 100 %), а не оставаться в области неопределенности (50 % вероятности). В этом контексте нельзя не отметить небольшое преимущество системы S1 по сравнению с S2 (рис. 5в и рис. 5г соответственно). По мнению экспертов [16], кривая ROC более подходит для оценки качества долгосрочных прогнозов, чем другие критерии. Важным преимуществом кривой ROC является ее способность оценивать качество модели при всех возможных порогах классификации прогнозов, что позволяет анализировать её производительность независимо от выбора конкретного порога. Кривые надежности (включая гистограммы частот для оценки избирательности, sharpness) рекомендуется строить по большим выборкам вероятностных прогнозов с агрегированием по большим по площади территориям.

Для оценки практической полезности систем S1 и S2 использовался метод анализа затрат и потерь (cost-loss analysis), который позволяет определить, насколько выгодно использовать прогнозы для минимизации убытков, связанных с экстремальными метеорологическими явлениями.

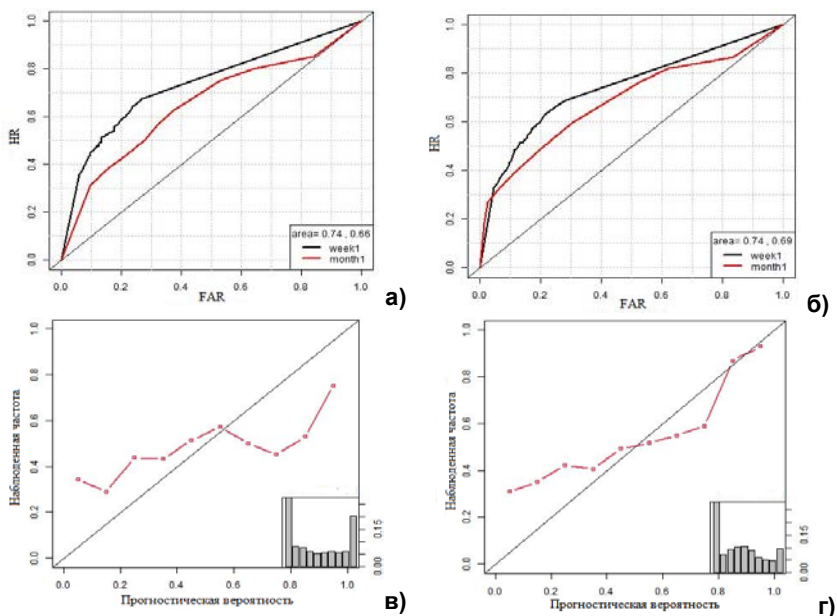


Рис. 5. Кривые ROC (а и б), диаграммы надежности (в и г) и гистограммы частот (в и г справа в нижнем углу), построенные для прогнозов экстремальных значений приземной температуры воздуха (выше 90-го перцентиля) на недельном и месячном интервалах интегрирования для систем S1 (левая панель) и S2 (правая панель) модели ПЛАВ072L96 на территории Северной Евразии (начальная дата прогноза 15 августа 2024 г.). HR – доля попаданий, FAR – доля ложных тревог. Диаграммы надежности и гистограммы частот построены для месячного интервала интегрирования.

Fig. 5. ROC curves (a and б), reliability diagrams (в and г) and frequency histograms (c and d in the lower right corner) constructed for forecasts of extreme surface air temperature values (above the 90th percentile) on weekly and monthly integration intervals for the S1 (left panel) and S2 (right panel) systems of the SLAV072L96 model in Northern Eurasia (the initial forecast date is August 15, 2024). HR – Hit Rate, FAR – False Alarm Ratio. Reliability diagrams and frequency histograms are constructed for a monthly integration interval.

Потенциальная экономическая эффективность прогнозов оценивалась по формуле [20]:

$$V = \frac{\min[o, r] - (HR + FAR)r - m}{\min[o, r] - or},$$

где V – потенциальная экономическая эффективность прогностической системы, с одной стороны, зависящая от трех основных параметров: HR, FAR и m , характеризующих, соответственно, долю «попаданий», долю ложных «тревог» и пропуск цели (т. е. качество прогнозов). С другой стороны, величина V определяется климатической повторяемостью явления o и соотношением между затратами и потерями потребителя r .

Положительные значения V означают, что использование прогнозов позволяет снизить ожидаемые убытки. Прогнозы экономически выгодны. Если $V < 0$, то прогностическая система обходится пользователю дороже, чем климатическая информация. Наряду с параметром V для оценки экономической полезности прогнозов использовался так называемый показатель Клейтона (Clayton skill score (CSS) [12]), характеризующий диапазон соотношений затрат/потерь, при которых пользователи могут получить выгоду от прогнозов.

На рис. 6 приводятся графики зависимости экономической эффективности вероятностных прогнозов экстремальных значений температуры воздуха (выше 90-го перцентиля) V от соотношения между затратами и потерями потребителя r для двух ансамблевых систем S1 и S2 модели ПЛАВ072L96 на недельном и месячном интервалах интегрирования для территории Северной Евразии.

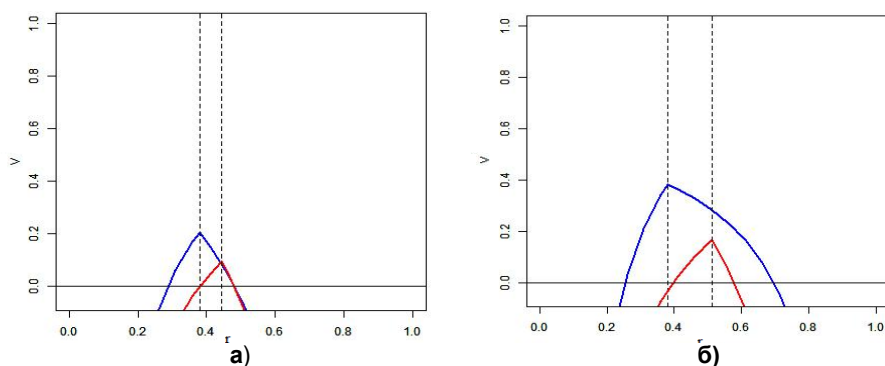


Рис. 6. «Экономическая эффективность» вероятностных прогнозов экстремальных значений температуры воздуха (выше 90-го перцентиля) для двух ансамблевых систем модели ПЛАВ072L96: S1 (а) и S2 (б) на недельном (синяя кривая) и месячном (красная кривая) интервалах интегрирования на территории Северной Евразии (начальная дата прогноза 15 августа 2024 г.).
Fig. 6. “Economic efficiency” of probabilistic forecasts of extreme air temperature values (above the 90th percentile) for two ensemble systems of the SLAV072L96 model: S1 (a) and S2 (б) on weekly (blue curve) and monthly (red curve) integration intervals in the territory of Northern Eurasia (initial forecast date is August 15, 2024).

Как и следовало ожидать, наибольшие положительные значения эффективности V наблюдаются на недельном интервале интегрирования. На месячном интервале интегрирования с нулевой заблаговременностью положительный эффект хотя и уменьшается, но сохраняется. С точки зрения параметра V система S2 имеет определенные преимущества как на недельном, так и на месячных интервалах интегрирования. Параметр CSS служит дополнительным подтверждением, – диапазон значений r для системы S2 по сравнению с системой S1 увеличивается (круг пользователей расширяется). К преимуществам вероятностного прогнозирования можно отнести и возможность максимизировать экономическую ценность

для любого конкретного пользователя (соотношения затрат/потерь) за счет выбора конкретного порогового значения вероятности.

Таким образом, существующие небольшие различия в оценках качества прогнозов ансамблевых прогностических систем свидетельствуют в пользу системы S2 по сравнению с системой S1. Существенным преимуществом системы S2 являются меньшие вычислительные затраты на подготовку ансамблевого прогноза. При расчете прогнозов на 46 дней требуется около 40 % вычислительных ресурсов, необходимых для расчета с использованием системы S1. Экономия ресурсов достигается не только за счет сокращения числа членов ансамбля, но и благодаря использованию начальных данных, подготовленных для ансамблевого среднесрочного прогноза погоды (с использованием модели ПЛАВ072L96).

Заключение

Существенный вклад в развитие и совершенствование метеорологического прогнозирования вносят ансамблевые прогностические системы, позволяющие учесть неопределенности, связанные, с одной стороны, с недостаточной точностью представления исходных метеорологических и океанографических полей и несовершенством моделей, с другой, – с хаотическим поведением самой атмосферы. В Гидрометцентре России разработаны две системы ансамблевого прогноза S1 и S2 модели ПЛАВ072L96. Обе системы идентичны, за исключением способа подготовки ансамбля начальных состояний (и самого размера ансамбля – 61 и 41 член соответственно). В первом случае при подготовке ансамбля прогнозов используется метод бридинга, во втором – алгоритм усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана.

Результаты верификации двух систем ансамблевого прогноза с использованием диаграмм Талаграна и среднеквадратического отклонения прогностических значений во всех реализациях ансамбля от среднего по ансамблю прогноза показывают, что система S2 обеспечивает соизмеримое или несколько лучшее качество прогнозов, чем система S1. К сожалению, обе системы характеризуются недостаточностью разброса ансамбля, а асимметрия распределения прогностических значений указывает на наличие систематической ошибки в прогнозах. Небольшие преимущества (статистически значимые в отдельных случаях) системы S2 по сравнению с системой S1 отмечаются также при оценке качества ансамблевых прогнозов, в том числе прогнозов экстремальных величин.

Можно сделать вывод о том, что использование системы S2 является предпочтительным по сравнению с S1, поскольку может обеспечить не только небольшое улучшение качества прогнозов, но и существенно сэкономить вычислительные ресурсы (за счет уменьшения числа членов ансамбля). Ввиду этого с начала 2025 года оперативные долгосрочные прогнозы Гидрометцентра России, подготавливаемые с использованием модели ПЛАВ072L96, используют систему S2. Метод бридинга

используется при подготовке модельного климата (т. е. при счете ансамблевых прогнозов от данных 1991–2015 годов).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект РНФ № 22-17-00247-П.

Список литературы

1. Астахова Е.Д. Ансамблевый среднесрочный прогноз погоды: реализация технологии на современной компьютерной базе // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 346. С. 38-52.
2. Куликова И.А., Вильфанд П.М., Хан В.М., Круглова Е.Н., Тищенко В.А., Емелина С.В., Каверина Е.С., Набокова Е.В., Субботин А.В., Сумерова К.А., Толстых М.А. Климатические прогнозы. Часть II. Вероятностные подходы // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 5-19.
3. Мизяк В.Г., Алипова К.А., Толстых М.А., Розутов В.С. Результаты оперативных испытаний глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2023. Информационный сборник № 50. С. 44-65.
4. Муравьев А.В., Вильфанд П.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24-34.
5. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Зарипов Р.Б. и др. Модель долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96 // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 25-39.
6. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М.: Финансы и статистика, 1988. 263 с.
7. Ehrendorfer M. The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part I: Theory // Mon. Wea. Rev. 1994. Vol. 122. P. 703-713.
8. Ehrendorfer M. The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part II: Applications // Mon. Wea. Rev. 1994. Vol. 122. P. 714-728.
9. Epstein E.S. Stochastic dynamic predictions // Tellus. 1969. Vol. 21. P. 739-759.
10. Fleming R.J. On stochastic dynamic prediction. Part I: The energetics of uncertainty and the question of closure // Mon. Wea. Rev. 1971. Vol. 99. P. 851-872.
11. Fleming R.J. On stochastic dynamic prediction. Part II: Predictability and utility // Mon. Wea. Rev. 1971. Vol. 99. P. 927-938.
12. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed., Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.
13. Hollingsworth A., Arpe K., Tiedtke M. et al. The Performance of a Medium Range Forecast Model in Winter-Impact Of Physical Parameterization // Mon. Wea. Rev. 1980. Vol. 108. P. 1736-1773.
14. Leith C.E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts // Mon. Wea. Rev. 1974. Vol. 102. P. 409-418.
15. Palmer T.N., Molteni F., Mureau R., Buizza R., Chapelet P., Tribbia J. Ensemble prediction // Proceedings of the ECMWF Seminar on Validation of Models over Europe. 1993. Vol. 1. P. 21-66.
16. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485), 2002. Vol. I.
17. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // Mon. Wea. Rev. 1997. Vol. 125. P. 3297-3319.
18. Tracton M.S., Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects // Wea. Forecasting. 1993. Vol. 8. P. 379-398.
19. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences: 3d ed. London, Academic Press, 2011. 676 p.
20. Zhu Y., Toth Z., Wobus R., Richardson D., Mylne K. The economic value of ensemble-based weather forecasts // BAMS. 2002. Vol. 83. P. 73-82.

References

1. Astakhova E.D. Ensemble medium-range weather prediction: the technology implementation on a modern computer base. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 38-52 [in Russ.].
2. Kulikova I.A., Vilfand R.M., Khan V.M., Kруглова E.N., Tishchenko V.A., Emelina S.V., Kaverina E.S., Nabokova E.V., Subbotin A.V., Sumerova K.A., Tolstykh M.A. Climate Forecasts. Part II: Probabilistic Approaches. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, pp. 659-668. DOI: 10.3103/S1068373924080016.
3. Mizyak V.G., Alipova K.A., Tolstykh M.A., Rogutov V.S. Rezul'taty operativnykh ispytaniy global'noy sistemy ansamblevogo srednesrochnogo prognoza pogody na osnove modeli PLAV. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. 2023, Informacionnyy sbornik № 50, pp. 44-65 [in Russ.].
4. Murav'ev A.V., Vilfand R.M. Standardization of Skill Scores for Medium- and Long-Term Weather Forecasts. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2000, no. 12, pp. 24-34 [in Russ.].
5. Tolstykh M.A., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Zaripov R.B., Travova S.V., Goyman G.S., Alipova K.A., Mizyak V.G., Tishchenko V.A., Kруглова E.N. The SLAV072L96 Model for Long-range Meteorological Forecasts. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, no. 7, pp. 576-86. DOI: 10.3103/S1068373924070021.
6. Efron B. *Netradicionnye metody mnogomernogo statisticheskogo analiza*. M.: Finansy i statistika publ., 1988, 263 p. [in Russ.].
7. Ehrendorfer M. The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part I: Theory. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, vol. 122, pp. 703-713.
8. Ehrendorfer M. The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part II: Applications. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, vol. 122, pp. 714-728.
9. Epstein E.S. Stochastic dynamic predictions. *Tellus*, 1969, vol. 21, pp. 739-759.
10. Fleming R.J. On stochastic dynamic prediction. Part I: The energetics of uncertainty and the question of closure. *Mon. Wea. Rev.*, 1971, vol. 99, pp. 851-872.
11. Fleming R.J. On stochastic dynamic prediction. Part II: Predictability and utility. *Mon. Wea. Rev.*, 1971, vol. 99, pp. 927-938.
12. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed., Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2012, 274 p.
13. Hollingsworth A., Arpe K., Tiedtke M. et al. The Performance of a Medium Range Forecast Model in Winter-Impact Of Physical Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, vol. 108, pp. 1736-1773.
14. Leith C.E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, vol. 102, pp. 409-418.
15. Palmer T.N., Molteni F., Mureau R., Buizza R., Chapelet P., Tribbia J. Ensemble prediction. Proceedings of the ECMWF Seminar on Validation of Models over Europe, 1993, vol. 1, pp. 21-66.
16. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS. *WMO-No. 485*, 2002, vol. I.
17. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, vol. 125, pp. 3297-3319.
18. Tracton M.S., Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects. *Wea. Forecasting*, 1993, vol. 8, pp. 379-398.
19. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*: 3d ed. London, Academic Press publ., 2011, 676 p.
20. Zhu Y., Toth Z., Wobus R., Richardson D., Mylne K. The economic value of ensemble-based weather forecasts. *BAMS*, 2002, vol. 83, pp. 73-82.

Поступила 26.02.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 26.02.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-44-63>

УДК 551.509

**Анализ условий образования
и особенностей прогнозирования
ледяного дождя и гололёда
в московском регионе**

Т.Г. Дмитриева, Е.В. Васильев

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

Рассмотрены условия образования ледяного дождя и гололёда, методы их прогноза, а также представлен анализ отдельных случаев, отмечавшихся в московском регионе в холодные периоды 2023–2024 гг. Проанализированы подходы к оперативному прогнозу этих явлений с имеющимся современным набором информации, в том числе с использованием результатов численного прогноза моделей ICON-Ru, COSMO-Ru2.2 и COSMO-Ru6 с высоким пространственно-временным разрешением. Предложены рекомендации оперативным синоптикам и алгоритм прогноза гололёдных явлений на период до 3 суток на примере московского мегаполиса.

Ключевые слова: прогноз ледяного дождя и гололёда, московский мегаполис, холодный период года, продукция численных моделей с высоким пространственно-временным разрешением

**Analysis of formation environments
and prediction features of freezing rain
and glaze in the Moscow region**

T.G. Dmitrieva, E.V. Vasil'ev

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
tdsin@mecom.ru, syno@inbox.ru*

Formation environments of freezing rain and glaze, methods for their forecasting are considered. The analysis of the cases of these phenomena observed in the Moscow region in the cold seasons of 2023–2024 is performed. Approaches to operational forecasting of the events using the available modern set of information, in particular, the results of the high-resolution ICON-Ru, COSMO-Ru2.2, and COSMO-Ru6 numerical weather prediction models are analyzed. Recommendations for operational forecasters and an algorithm for forecasting freezing rain and glaze for a period up to 3 days are proposed by the example of the Moscow region.

Keywords: forecast of freezing rain and glaze, Moscow, cold season, products of high-resolution numerical weather prediction models

Введение

Ледяной дождь – это один из видов переохлажденных, замерзающих осадков, выпадающих на поверхность Земли [4, 6], часто приводит к образованию гололёда. Гололёд, согласно [4, 6, 7, 10], относится к гололёдно-изморозевым отложениям, т. е. к твердым осадкам, образующимся на поверхности земли и на предметах. Эти аномальные природные явления создают угрозу нормальному функционированию некоторых отраслей народного хозяйства и транспортно-логистической системы в первую очередь мегаполисов. Осадки в виде ледяного дождя оказывают негативное влияние на растительность, электросети, транспорт и инфраструктуру, опасны для жизнедеятельности и здоровья граждан. По требованию Правительства Москвы ледяной дождь включен в перечень опасных гидрометеорологических явлений для мегаполиса.

В публикации 2012 года [11] дан подробный обзор состояния знаний о механизмах и условиях образования и выпадения переохлажденных осадков за 10-летний период, алгоритмах их прогнозирования. Приведены алгоритмы распознавания типа осадков с точки зрения моделирования. Проанализирован случай интенсивного гололёда на Европейской территории России 25–26 декабря 2010 года для выявления механизмов образования замерзающих осадков.

Ниже приведен краткий обзор зарубежных публикаций по проблеме прогноза ледяного дождя и гололёда.

Краткий обзор зарубежных публикаций по проблеме прогноза ледяного дождя и гололёда

Случаи ледяного дождя и гололёда в холодный и переходные периоды года, помимо центра и юга Европейской территории России, наиболее распространены в Северной Европе и особенно в Северной Америке (Канада, север США). Например, в США ледяной дождь отмечается в 24 % случаев всех зимних явлений погоды [13]. Соответственно, наиболее активные исследования проблемы образования и прогноза гололёдных явлений проводились в этой стране [14–18].

Следует отметить, что в настоящее время на территории США, помимо сети традиционных синоптических контактных наблюдений, усилиями NOAA организована дополнительная плотная сеть автоматических метеостанций, оснащенная несколькими сотнями автоматических датчиков гололёда (обледенения), которые проводят наблюдения в 5-минутном режиме и позволяют получить различные параметры гололёдно-изморозевых отложений: толщину отложений на приподнятой горизонтальной поверхности, эквивалентную радиальную толщину на приподнятой поверхности, эквивалентную диаметральную толщину льда на приподнятой поверхности, толщину льда на горизонтальной поверхности Земли [13]. Благодаря

развитой сети наблюдений за гололёдом, США обладает огромным потенциалом по изучению условий его возникновения и прогнозу.

Существуют различные методики прогноза ледяного дождя (в том числе вероятностные для различных градаций сумм осадков), толщины гололёдно-изморозевых отложений (на основе традиционных метеорологических параметров, измеряемых на наблюдательных сетях) [13–15, 18]. В различных регионах проводятся исследования случаев ледяного дождя и гололёда, связанных с различными воздушными массами, синоптическими ситуациями, характеристиками ветра и температуры [13]. Проводятся также исследования по определению характерных для случаев ледяного дождя и гололёда параметров: минимальной температуры и толщины холодного приземного слоя, максимальной температуры и толщины теплого слоя, в котором происходит таяние гидрометеоров перед попаданием в холодный приземный слой, характеристик устойчивости над инверсией, скорости и направления ветра у поверхности Земли на поверхностях 850 и 700 гПа [13, 18]. В [16, 17] приводятся типичные диапазоны изменения упомянутых параметров и их пороговые значения для определения типов осадков. В каждом алгоритме учитываются определенные градации и составляются вероятностные прогнозы.

В целом, система прогноза переохлажденных осадков/гололёда в зарубежных странах включает:

1. Прогноз необходимых параметров по численной модели атмосферы (выбранные наборы предикторов для разных исследований): количество и интенсивность осадков, скорость ветра, вертикальный профиль температуры воздуха и температуры точки росы и др.

2. Алгоритм определения типа осадков (например, по ледности, т. е. содержанию ледяной фракции).

3. Модель нарастания льда (определение толщины гололёдных отложений: например, на основе данных о плотности воды и льда, водности, скорости ветра, температуре точки росы и др.).

Алгоритмы для пунктов 2 и 3 обычно получают эмпирико-статистическим путем на основе анализа рядов наблюдений за переохлажденными осадками/гололёдом в рассматриваемых регионах.

Отечественные методы прогноза гололёдных явлений

В 60–70-х гг. XX в. в СССР были созданы следующие методы прогноза гололёдных явлений:

– *метод Р.А. Ягудина* [10, 12], основанный на сочетании прогнозируемой температуры воздуха у поверхности Земли и высоты нулевой изотермы и использующий графические номограммы для прогноза гололёда и его интенсивности. Это наиболее распространенный до сих пор синоптический метод;

– метод обобщенного портрета для численного прогноза гололёда (авторы – А.Н. Багров, А.И. Снитковский) [1], основанный на предикторах: температура воздуха у поверхности Земли, температура воздуха на уровне 850 гПа, суммарный дефицит точки росы у поверхности Земли и на уровне 850 гПа, лапласиан температуры воздуха на уровне 850 гПа, скорость ветра у поверхности Земли, разность скорости ветра у поверхности Земли и на уровне 850 гПа (по аэрологической диаграмме и картам погоды). В настоящее время метод не используется в оперативной практике;

– метод обобщенного портрета В.Н. Ванника (АН СССР) [5], суть которого состоит в том, что из множества метеорологических элементов погоды можно составить вектор-предиктор в n -мерном евклидовом пространстве. Задача прогноза гололёда заключается в разделении множества векторов-предикторов на два класса (присутствия и отсутствия гололёда), разделение производится с помощью гиперплоскости, метод реализуется для ЭВМ; зависит от точности численных прогнозов полей давления, температуры и влажности воздуха; наибольшее внимание уделяется прогнозу гололёда при температуре воздуха у поверхности Земли от -7 до $+4$ °С. Метод в настоящее время не используется в оперативной практике.

Не получили пока широкого применения в оперативной практике современные методы:

1) Метод автоматизированного прогноза гололёдных явлений СИБНИГМИ [2, 8]:

– цель – вероятностная оценка наличия/отсутствия необходимых условий образования гололёда;

– основа – ЧПП в оперативном режиме по модели COSMO с шагом сетки 13,2 км и выходные поля глобальной модели GFS (NCEP) $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, скачиваемые по ftp-протоколу;

– оперативные выборки строятся для каждой метеостанции (МС);

– значения параметров выбираются в ближайших узлах сетки;

– для определения явления гололёда выбираются значения толщины гололёдного отложения и явления погоды, образующие гололёд;

– всего 39 предикторов (температура поверхности почвы, осадки, температура воздуха у поверхности Земли, температура точки росы, дефицит точки росы, температура смоченного термометра, давление, уровни – поверхность Земли, 950, 925, 850, 500 гПа);

– предиктанты – морось, замерзающий дождь, образующие гололёд; дождь со снегом; морось с дождем;

– разработана дополнительная типизация гололёда и гололедицы по условиям их образования (9 типов);

– используются данные в коде КН-01 для 430 МС за 5 лет.

Метод сложно использовать на практике, так как его оперативные испытания показали большое количество ложных тревог и не очень высокую предупреденность (63–66 %). Кроме того, он требует сложной программной реализации и автоматизации процесса. Метод не внедрен в оперативную практику подразделений Росгидромета.

2) *Прогноз гололёдных явлений и максимальной толщины гололёдных отложений* (авторы – Р.Ю. Игнатов, К.Г. Рубинштейн, Ю.И. Юсупов) [3, 9]:

– использована выходная продукция модели WRF-ARW (шаг сетки 12 км, 31 вертикальная сигма-поверхность) для различных регионов России;

– возможность численного прогноза факта возникновения гололёда по результатам анализа концентрации гидрометеоров в нижней тропосфере – факт отсутствия/наличия;

– прогноз максимальной толщины гололёдных отложений более сложен, чем альтернативный прогноз явления;

– расчетные данные: по анализу типа осадков и приземной температуры рассчитано образование наледи с помощью видоизмененной схемы Рамера.

Метод не внедрен в оперативную практику Росгидромета.

Анализ условий образования гололёдных явлений на примере московского региона в холодные сезоны 2023–2024 гг.

Известно, что гололёд бывает фронтальным и внутримассовым в зависимости от места расположения зоны гололёда относительно связанных с ним барических образований и активных фронтальных разделов [10]. Внутримассовый гололёд образуется в теплых секторах циклонов или на западной и северной периферии стационарных антициклонов с морозящими осадками, а также в результате оседания капель адвективного тумана [10]. Фронтальный гололёд образуется в зоне теплых фронтов и у вершины теплого сектора активного циклона. Подробно классические описания необходимых и благоприятных условий образования гололёда описаны в [10].

Условиями возникновения гололёда являются:

1. Переохлажденный дождь, морось, туман или низкая слоистая облачность в различном их сочетании.

2. Мощные слои инверсии в пограничном слое атмосферы.

3. Температура воздуха у поверхности Земли от -3 до $+0,5$ °С, на уровне 850 гПа от -5 до $+5$ °С.

4. Температура воздуха на нижней границе первого от поверхности Земли слоя инверсии от -8 до $-0,5$ °С.

5. Суммарный дефицит точки росы в слое от поверхности Земли до 850 гПа $3-5$ °С и менее.

6. Очаг теплого воздуха на поверхности 850 гПа.

7. Умеренные и сильные ветры в пограничном слое атмосферы.

Проведенный анализ случаев ледяного дождя и гололёда в московском регионе в зимние сезоны 2023–2024 гг. показал, что можно расширить градацию вероятной температуры воздуха у поверхности Земли при гололёдообразовании в п. 3, а именно: от $-7,1$ до $+0,6$ °С, в отдельных случаях

в центре Москвы до 2 °С. Остальные условия возникновения явлений в целом остаются без изменений: ледяные дожди и гололёды отмечались при наличии мощных слоев инверсии в пограничном слое атмосферы (п. 2), очагов теплого влажного воздуха на карте АТ-850 (температура в некоторых случаях поднималась до 6 °С) с низкими дефицитами точки росы (пп. 5–6), умеренных и сильных ветров в пограничном слое атмосферы (в основном в пределах 8–15 м/с, п. 7).

В п. 4 также можно расширить градацию температуры воздуха по нижнему пределу, однако с точки зрения оперативного прогноза этот пункт можно считать не очень показательным, так как само наличие слоев инверсии в пограничном слое атмосферы в передней части циклонов при адвекции тепла уже повышает вероятность образования гололёдных отложений. Имеется ввиду, что, например, прогностический зонд по модели UKMO доступен синоптикам по основным параметрам только на стандартных изобарических поверхностях без учета особых точек, соответственно, не все слои инверсии температуры воздуха могут быть представлены. Более подробно распределение основных параметров атмосферы со всеми слоями инверсии и изотермии температуры воздуха в пограничном слое атмосферы лучше рассчитывается по прогностическим численным моделям с высоким пространственно-временным разрешением (COSMO-Ru с шагом сетки 2 и 6 км) и представляется на диаграммах с результатами расчетов (сайт <https://special.meteoinfo.ru/unit/moskva/prognozy/multimodelnyj-prognoz/aerologicheskie-diagrammy>).

В табл. 1 приведены 40 случаев ледяного дождя и гололёда по московскому региону, перечислены по месяцам случаи данных явлений и сопутствующие им параметры атмосферы (температура воздуха у поверхности Земли и на поверхности 850 гПа, скорость ветра на высоте 10 м и в пограничном слое трения (на высотах ~600–1500 м), а также соответствующая синоптическая обстановка у поверхности Земли.

Анализ табл. 1 показывает, что холодные сезоны 2023 и 2024 гг. практически не отличались между собой по количеству случаев гололедных явлений в московском регионе (18 и 22 случая соответственно), но отличались месяцы с их наибольшим количеством. Для холодного сезона 2023 г. наибольшее количество случаев (10) отмечалось в январе, причем сильные морозы (-27...-20 °С) наблюдались только в первой декаде месяца, а вторая и третья декады были подвержены преимущественно влиянию активной циклонической деятельности, при которой гололёды наблюдались на теплых атмосферных фронтах и фронтах окклюзии с колебаниями температуры воздуха от -5 до +1 °С, что благоприятно для образования гололёдных отложений. Гололёды отмечены также на периферии антициклона, но всего 2 дня.

В холодном сезоне 2024 г., напротив, в январе преобладали низкие температуры воздуха, когда большую половину месяца температурный минимум держался в пределах -20...-15 °С, местами до -31 °С. Потеплело только в третьей декаде января, сохранив зимнее тепло, приносимое атлантическими и средиземноморскими циклонами вместе с ледяными дождями

и гололёдами в первой и третьей декаде февраля. Однако максимум данных явлений пришелся на конец года – «теплый» декабрь, когда было отмечено 14 случаев, 6 из которых наблюдались на периферии антициклона.

Таблица 1. Случаи ледяного дождя и гололёда с соответствующими данными наземных метеостанций и радиозондирования на уровне 850 гПа в холодные периоды 2023–2024 гг.

Table 1. The cases of freezing rain and glaze with the corresponding data of ground-based weather stations and 850 hPa radiosonde data in the cold season of 2023–2024

Дата	T _з , °C	T ₈₅₀ , °C	V _з , м/с	V ₈₅₀ , м/с	Синоптическая ситуация у поверхности Земли
Январь 2023 г. (10 дней)					
03.01 \triangle	-0.9 ÷ -0.1	-0.7	0–4	6–20	ТС, ЮЗ передняя часть ложбины
14.01 \triangle	-3.3 ÷ -2.3	-2.3 ÷ -1.1	1–6/10	7–13	ТС, ЮВ передняя часть ложбины
16.01	-4.6 ÷ -3.5	-7.1	3–6/11	14–19	ЮВ передняя часть ложбины, ФО
17.01	-3.5 ÷ -3.4	-8.7	2–7/10	8–14	ЮВ передняя часть ложбины, ТФ
19.01 \triangle	-3.2 ÷ -0.4	0.8	3–4	20–30	ЮВ передняя часть ложбины, ТФ средиземноморского Ц
26.01	-5.0 ÷ -1.9	0.8	1–6/10	10–14	ЮЗ периферия АЦ
27.01	-4.6 ÷ -2.5	-3.7	1–6/10	11–15	ЮЗ периферия АЦ
28.01	-3.9 ÷ -1.3	-8.7	0–5	1–7	СВ передняя часть южного Ц
29.01	-3.5	-11.7	3	5–10	СВ передняя часть южного Ц
30.01	-3.3 ÷ -3.2	-10.7	2-6	5–10	СВ часть южного Ц, ФО
Февраль 2023 г. (2 дня)					
09.02	-3.8 ÷ -2.2	-9.1	1-3	4-10	СВ периферия Ац; передняя часть ложбины, ФО
28.02	-3.5 ÷ -1.9	-5.9	7–15	12–20	ЮЗ передняя часть ложбины, ФО
Март 2023 г. (1 день)					
12.03 \triangle	-2.1 ÷ -1.4	2.0	7–12	13–25	ТС, ЮВ передняя часть ложбины, ТФ
Октябрь 2023 г. (3 дня)					
28.10	-1.7 ÷ -0.1	-2.5 ÷ + 0.8	2–6/10	2–9	ТС южного Ц, ТФ, ФО
29.10	-1.2 ÷ -0.3	-3.1	3–5/10	8–9	ЮЗ часть южного Ц, ФО
30.10	-1.7 ÷ -0.2	-5.5	3–5	1–5	ЮВ передняя часть ложбины, ТФ
Ноябрь 2023 г. (1 день)					
27.11 \triangle	-2.1 ÷ +0.6	-6.1	2–3, 8–13	9–18	ТФ южного Ц
Декабрь 2023 г. (1 день)					
18.12	-0.5 ÷ +2.0	-5.7	2	10–13	передняя часть ложбины ФО
Январь 2024 г. (1 день)					
24.01	-0.4 ÷ -0.1	-6.9	4–6	8–15	передняя часть ложбины, ФО

Февраль 2024 г. (6 дней)					
01.02 \triangle	-1.3 ÷ -1.1	0.4	4–6	6–9	передняя часть ложбины, ФО
12.02 \triangle	-7.1 ÷ -1.7	-1.7 ÷ 0.0	4–5	3–6	передняя часть ложбины, ТФ
13.02 \triangle	-5.3 ÷ -4.6	-1.7	5–7	5–10	передняя часть ложбины, ТФ
25.02 \triangle	-1.0 ÷ 0.0	-1.5	4–10	10–21	ЮЗ периферия АЦ, ТФ средиземноморского Ц
26.02 \triangle	-2.0 ÷ -0.6	0.6	1–7	5–17	ЮЗ периферия АЦ, ТФ средиземноморского Ц
27.02	-3.7	1.8	3	8–13	ЮЗ периферия АЦ, ТФ средиземноморского Ц
Ноябрь 2024 г. (1 день)					
24.11	-4.0 ÷ 0.0	-7.9	0-5	10–12	Ю часть ложбины
Декабрь 2024 г. (14 дней)					
3.12	-1.0 ÷ 0.0	1.4 ÷ 2.2	4–7	5–15	ЮЗ периферия АЦ
4.12	-1.4 ÷ 0.0	-4.3	0–5, 10–12	4–8	ЮЗ периферия АЦ
6.12	-6.0	-8.1	4–7	7–15	ЮЗ периферия АЦ
8.12 \triangle	-5.0 ÷ -1.0	-2.1	2–7	6–12	ЮЗ периферия АЦ
9.12 \triangle	-3.0 ÷ 0.0	-1.5	0–5	6–8	ЮЗ периферия АЦ
15.12	-5.0 ÷ -4.0	-9.7 ÷ -6.7	0–7	8–12	передняя часть ложбины, ТФ
19.12 \triangle	-7.1 ÷ -5.0	-5.3	1–8	6–13	передняя часть ложбины, ТФ
20.12	-6.2 ÷ -0.6	-1.1	2–5	6–12	передняя часть ложбины, ТФ
23.12	-3.0 ÷ -2.0	-1.3	1–2	6–8	ФО южного Ц
26.12	-1.0 ÷ 0.0	-5.3 ÷ +3.2	3–4	4–8	передняя часть ложбины, ФО
27.12	0.0	-1.3 ÷ 6.2	2–3	3–8, 8–12	передняя часть ложбины, ТФ
28.12	0.0	-6.3	1–2	3–5	СВ периферия АЦ
29.12	-1.3 ÷ 0.0	-2.3	3-6	5–9	передняя часть ложбины, ФО
30.12	-1.0 ÷ 0.0	1.0	2–7, 10–11	14–17	передняя часть ложбины, ТС

Примечание. \triangle – ледяной дождь в московском регионе; ФО – фронт окклюзии; ТФ – теплый фронт; Ц – циклон; АЦ – антициклон; ТС – теплый сектор циклона; T_3 – температура воздуха у поверхности Земли, °С; T_{850} – температура воздуха на поверхности 850 гПа, °С; V_3 – скорость ветра у поверхности Земли с учетом данных аэропортов, м/с; V_{850} – скорость ветра в приземном слое трения (от уровня 925 гПа до 850 гПа, м/с); если в графах T_{850} и V_{850} указаны градации, значит, рассматриваются случаи ледяного дождя и гололёда за ночь и день с учетом температуры на уровне 850 гПа и ветра в слое трения за срок зондирования 03 и 15 ч МСК.

Можно выделить (см. табл. 1) наиболее благоприятные для гололёдообразования приземные температуры воздуха по московскому региону: преобладающую градацию для самого московского мегаполиса от -3 до 0 °С (в табл. 1 не приводится разделение температур для московского мегаполиса и Московской области) и более расширенную по нижнему пределу градацию температур для области -7...-5 °С. Значения температуры

в пограничном слое атмосферы (до 1,5 км) при этом могут изменяться в широком диапазоне $-12...+6$ °С при наличии мощных слоев инверсии, начинающихся преимущественно от высоты поверхностей 950–925 гПа (~600–800 м). Градация преобладающего приземного ветра составляет 2–7 м/с, иногда с порывами до 10–11 м/с, причем для московских аэропортов случаи ледяного дождя и гололёда зачастую наблюдались при повышенном (относительно городского мегаполиса) фоне ветра с порывами до 13 м/с. В пограничном слое атмосферы процессы гололёдообразования также могут наблюдаться при большом разнообразии значений скорости ветра: от совсем слабого (1–4 м/с) до сильного, характерного для струйного течения нижних уровней (25–30 м/с), однако эти случаи все-таки достаточно редки (согласно табл. 1 – всего 2 случая за холодный период 2023 года).

Анализ данных фактических случаев ледяного дождя и гололёда в московском регионе позволяет выделить некоторые тенденции и набор необходимых параметров, присущих как всем случаям этих явлений, так и конкретно случаям ледяного дождя, а также наиболее характерные отличия, способные дать синоптику понимание в вопросе прогноза именно ледяного дождя, который для московского мегаполиса внесен в категорию опасного явления (ОЯ).

При этом стоит отметить, что случаи ледяного дождя за холодные периоды 2023–2024 гг. были незначительными и несопоставимыми по интенсивности и причиненному ущербу с явлением ледяного дождя, наблюдавшимся 25–26.12.2010. Тогда слой намерзшего льда достигал 2,5 см. Были повалены или погибли около 50 тысяч деревьев, произошли аварийные отключения электроэнергии. Анализ аэрологической диаграммы показал наличие мощного слоя тепла на высоте около 600 м протяженностью около 1000 м с максимальной температурой до 3,6 °С, тогда как приземная температура воздуха составляла -4.5 °С. Снежинки на высоте, попадая в теплый слой воздуха, таяли, а достигнув поверхности Земли – замерзали, образуя корку льда на всех поверхностях, деревьях, проводах и т. п. Причиной этого катастрофического явления явился выход на Европейскую территорию России обширной средиземноморской депрессии с двойной системой теплых атмосферных фронтов и последующим похолоданием.

Интересно сравнить случай сильного ледяного дождя 25–26.12.2010 (случай 1) с ситуацией 27.12.2024 (случай 2), когда по московскому региону отмечались только гололёды, хотя ситуация в нижней тропосфере при распределении температуры воздуха, влажности и ветра по высотам могла привести к выпадению и ледяного дождя. В табл. 2 приведено сравнение этих двух случаев.

На первый взгляд, в случае 2 максимальная температура воздуха в слое инверсии была выше (6.2 °С), чем в случае 1 (3,6 °С), однако при сравнении других показателей становятся понятными условия, благоприятные для

выпадения сильного ледяного дождя и наблюдавшиеся в случае 1, включая:

- наличие очень мощного слоя инверсии температуры (около 1000 м);
- значительная отрицательная температура воздуха у поверхности Земли ($-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- высокая влажность в самом слое инверсии (т. е. наличие теплого и влажного воздуха в непосредственной близости от поверхности Земли);
- инверсия температуры воздуха, начинавшаяся с высоты порядка 500 м, а затем – резкий переход к отрицательным температурам воздуха до поверхности Земли (т. е. в данном слое происходило таяние снега и резкое замерзание внешней оболочки образовавшихся капель воды с сохранением жидкого состояния внутри ядра капли, которая по достижении какой-либо поверхности разбивалась и образовывала ледяную корку);
- слабый ветер у земли и в приземном слое трения, что являлось дополнительным благоприятным фактором;
- высота нижнего слоя инверсии, располагавшаяся близко от поверхности Земли (от ~ 500 м).

Таблица 2. Сравнительные характеристики вертикального распределения параметров атмосферы по данным радиозондирования за 15 ч МСК 25.12.2010 и за 03 ч МСК 27.12.2024

Table 2. The comparative characteristics of the vertical distribution of the atmospheric parameters according to the radiosonde data for 15:00 Moscow time on December 25, 2010 and 03:00 on December 27, 2024

Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$		ΔH , м	$\text{H}_{\text{инв}}$, м	Относительная влажность, %		Скорость ветра, м/с	
T_z	T_c			P_z	P_c	V_z	V_c
25.12.2010 (случай 1)							
-4.5	3.6	980	~ 500	79	84-85	1	6-9
27.12.2024 (случай 2)							
0.2	6.2	769	~ 850	84	36-92	3	10-11

Примечание. T_z , P_z , V_z – значения параметров у поверхности Земли; T_c , P_c , V_c – значения параметров в слое от 928 до 841 гПа; ΔH – мощность слоя инверсии и изотермии; $\text{H}_{\text{инв}}$ – высота нижнего слоя инверсии.

В случае 2 слой инверсии при более высокой температуре начинался выше от поверхности Земли, в нем преобладал сухой воздух, а наиболее значимым отличием являлась положительная температура воздуха у поверхности Земли, не способствующая сильному намерзанию переохлажденных капель.

Соответственно, анализ фактической приземной информации МС и данных радиозондирования для случаев ледяного дождя позволил выделить наличие следующих необходимых условий для прогноза явления:

1. Температура воздуха у поверхности Земли в диапазоне $-6...-2$ °С, а в пределах «старого» города – 0 °С, т. е. с повышением верхнего предела градации на $2-3$ °С, особенно для МС, находящихся в центре города; а на окраине московского региона был отмечен случай и при $+1$ °С (24.02.2024 на МС Дмитров). Возможно, что иногда отмечаются случаи неправильного определения явления «ледяной дождь», который наблюдатели на метеостанциях путают с «ледяной крупой». Ледяная крупа имеет другую природу возникновения [4, 6], главное в которой – выпадение ледяных прозрачных крупинок с непрозрачным ядром (которые трудно раздавить) из кучево-дождевых облаков. Обычно это происходит в переходный период (весной и осенью).

2. Наличие мощного (не менее 700 м) влажного слоя теплого воздуха с положительной температурой в нижней тропосфере, начинающегося с высоты не ниже 600 м и переходящего в слой холодного воздуха с отрицательной температурой до самой поверхности Земли.

Заметим, что для возникновения явления «гололёд» слабой и умеренной интенсивности достаточно наличия небольших слоев инверсии, иногда нескольких и с отрицательной температурой воздуха в нижнем слое трения. Необходимо отметить, что не всегда при составлении прогноза синоптик может распознать по прогностическим данным о вертикальном распределении температуры воздуха вероятность образования ледяного дождя, так как зачастую имеются погрешности численного расчета (в большинстве случаев до 2 °С, но может быть и более в зависимости от прогнозируемой синоптической ситуации). Поэтому такой анализ прогностической информации достаточно сложен и требует наличия в первом приближении не более, чем за двое-трое суток, необходимой прогностической информации о стратификации температуры по численным моделям с высоким разрешением (например, COSMO-Ru с шагом 2 и 6 км).

Дополнительно в качестве одного из современных наиболее эффективных подходов к прогнозу ледяного дождя и гололёда можно рекомендовать использование продукции Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), представляемой в виде карты фазы осадков и метеограмм, уточняющих ее в вероятностной форме. Опыт использования этой продукции показывает, что даже при незначительной вероятности наличия фазы переохлажденных осадков (порядка $20-30$ %) и небольшой вероятности фазы ледяного дождя (около 10 %) возможно их возникновение в отдельных районах прогнозируемой территории. При этом подобный прогноз гололёда чаще всего подтверждается с заблаговременностью $2-3$ суток. Ситуация при прогнозе ледяного дождя несколько сложнее и требует уточнения как минимум за сутки или 12 ч, а иногда и за несколько часов до прогнозируемого явления, по возможности с использованием данных профиломеров (для московского мегаполиса доступны наблюдения по 6 профиломерам, установленным в различных районах).

Далее предложен алгоритм оперативного прогноза ледяного дождя и гололёда на примере московского региона.

Алгоритм прогноза ледяного дождя и гололёда на период до 3 суток на примере московского региона

Оперативный прогноз ледяного дождя и гололёда по территории ЕТР на сегодняшний день для синоптиков Росгидромета доступен с заблаговременностью до 2–3 суток при наличии расчетов прогностических мезомасштабных численных моделей, представленных в виде прогностического зонда (вертикального распределения прогностических значений температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра), диаграмм (метеограмм) изменения указанных параметров в приземном слое и на поверхностях до 500 гПа, в картографическом виде (карты моделей высокого разрешения Icon-Ru, COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2). По картографической продукции моделей ICON-Ru и COSMO-Ru6 предварительная оценка вероятности гололёда может быть сделана с заблаговременностью до 5 суток.

Алгоритм прогноза ледяного дождя и гололёда с учетом фазы осадков можно представить следующим образом:

- оценка синоптического положения, способствующего образованию смешанных фаз осадков и, соответственно, вероятности образования гололёда по прогностическим приземным картам и прогностическому зонду;

- оценка вероятных зон наличия переохлажденных осадков, способствующих образованию гололёда и ледяного дождя по картографической продукции региональных моделей (ICON-Ru13) (рис. 1, слева), в том числе с высоким разрешением COSMO-Ru6 (рис. 1 и 2, справа) и COSMO-Ru2 (рис. 2, слева) согласно приведенной шкале.

Обратим внимание, что примеры на рис. 1 и 2 показывают, как модель с большим разрешением уточняет и конкретизирует более общую информацию моделей меньшего разрешения: COSMO-Ru6 с разрешением 6 км (рис. 1, справа) уменьшает зону смешанных осадков, уточняя ее относительно модели ICON-Ru13 (рис. 1 слева), а COSMO-Ru2 с разрешением 2 км (рис. 2, слева) конкретизирует относительно COSMO-Ru6 вид переохлажденных осадков, показывая зоны замерзающих осадков, образующих гололёд;

- прогноз необходимых параметров по метеограмме численных моделей атмосферы высокого разрешения (COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2): количество и интенсивность осадков, горизонтальное распределение температуры воздуха и точки росы в приземном слое, температуры воздуха на поверхности 850 гПа, скорости ветра у поверхности Земли. Дан пример (рис. 3, справа) счета модели COSMO-Ru2 от 00 ч ВСУ 26.10.2024, где по превышению температуры воздуха на уровне 850 гПа над приземной температурой воздуха по графику можно прогнозировать вероятность образования переохлажденной фазы осадков. Вид осадков на метеограмме в синих и зеленых оттенках (по шкале смешанная фаза осадков) подтверждает наличие осадков смешанной фазы. Приземная карта погоды с фронтальным анализом дает характеристику синоптического положения,

способствующего образованию гололёда на теплом атмосферном фронте в обширной его зоне порядка 800 км (рис. 3, слева).

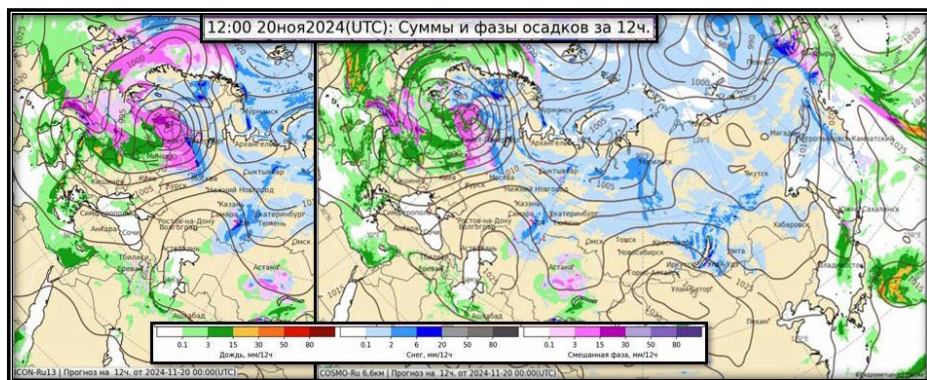


Рис. 1. Фрагменты карт «Суммы и фазы осадков» моделей ICON-Ru13 (слева) и COSMO-Ru6 (справа) от счета 00 ч ВСВ 20.11.2024. Фазы осадков приведены по цветной шкале, сиреневая зона – смешанные осадки.

Fig. 1. The fragments of «Precipitation Totals and Phases» maps of the ICON-Ru13 (left) and COSMO-Ru6 (right) models from 00:00 UTC on February 12, 2024. The precipitation phases are given on the scale, the lilac zone is the probability of freezing precipitation.

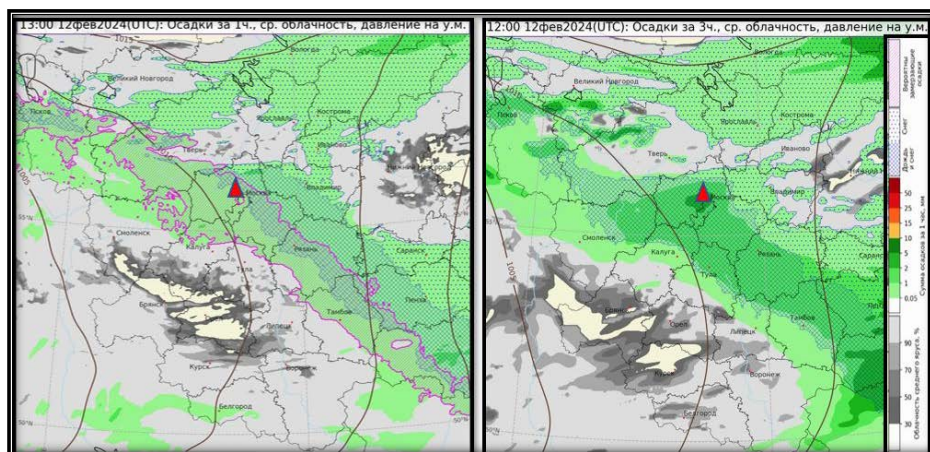


Рис. 2. Фрагменты карт «Осадки, облачность, давление над у.м.» с зонами фаз осадков моделей COSMO-Ru2 (слева) и COSMO-Ru6 (справа) от счета 00 ч ВСВ 12.02.2024. Фазы осадков приведены по шкале, сиреневая зона – вероятность замерзающих осадков.

Fig. 2. The fragments of the «Precipitation, Clouds, Sea-level Pressure» maps with the precipitation phase zones of the COSMO-Ru2 (left) and COSMO-Ru6 (right) models from 00:00 UTC on February 12, 2024. The precipitation phases are given on the scale, the lilac zone is the probability of freezing precipitation.

3. В верхнем левом «окне» страницы находим строку «тип осадков» и по приведенной (сверху) цветовой шкале с типом осадков на метеограмме находим вероятность (в %) появления замерзающих осадков на прогнозируемый срок (рис. 4, справа). Практическое использование данного метода прогноза показало, что даже небольшая вероятность наличия этой фазы на метеограмме может свидетельствовать о реальных условиях образования замерзающих осадков на территории прогноза (местами или в отдельных районах).

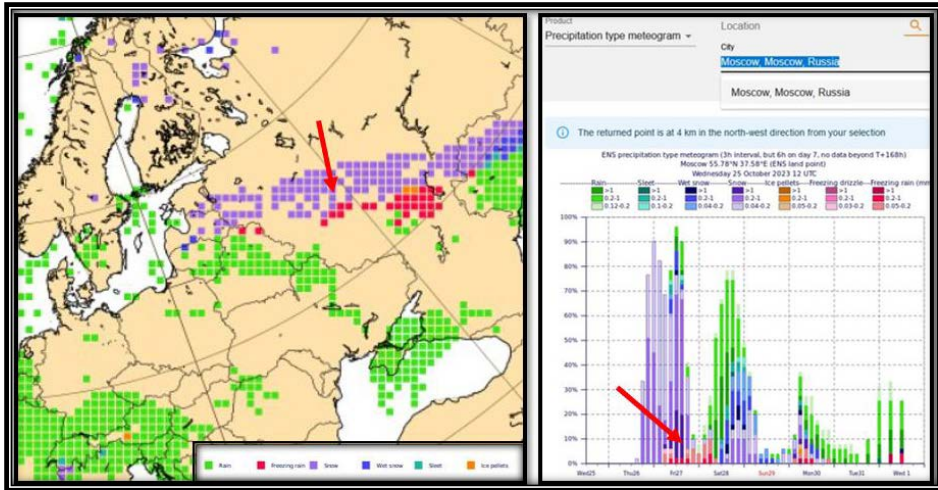


Рис. 4. Фрагменты продукции модели ECMWF с прогнозом типа осадков на 27.10.2023 от счета 00 ч ВСВ 26.10.2023: в картографическом виде (слева) и на метеограмме с вероятностью по шкале до 100 % (справа). Розовый и красный цвет – замерзающие осадки.

Fig. 4. The fragments of the ECMWF products with the forecast of precipitation type for October 27, 2023 from 00:00 UTC on October 26, 2023: the map (left) and the meteorogram with the probability on the scale up to 100% (right). The pink and red color is freezing precipitation.

На рис. 4 приведен пример прогноза гололёда по московскому региону на 27.10.2023 от счета 00 ч ВСВ 26.10.2023 по вышеизложенной последовательности использования прогностической информации. На диаграмме (рис. 4, справа) видно, что существует вероятность (не более 10 %) образования замерзающих осадков в виде мороси и дождя с интенсивностью до 1 мм/ч и вероятностью образования ледяного дождя не более 2 %. По факту гололёд отмечался «в отдельных районах», так как прогнозировалась небольшая его вероятность. При вероятности более 50 %, особенно при типе «замерзающий дождь» (ярко-красный цвет), увеличивается вероятность образования ледяного дождя, площадь распространения гололёда и его интенсивность, что ведет к опасным отложениям, и, соответственно, необходимо выпускать штормовое предупреждение для ситуации в московском мегаполисе в градации ОЯ.

Рассмотрим на примере московского региона прогноз явления ледяного дождя по указанным выше прогностическим моделям, который опасен образованием гололёда сильной интенсивности.

На рис. 5 показаны фрагменты визуализации фактических данных, подтверждающих положительные условия для возникновения явления «ледяной дождь» 12.02.2024: приземная карта погоды за 09 ч ВСВ с фронтальным анализом, подтверждающим нахождение московского региона в зоне активного теплого атмосферного фронта с фактическими гололёдными отложениями (слева); данные радиозондирования по п. Долгопрудный за 12 ч ВСВ (рис. 5, посередине), где по вертикальному распределению температуры воздуха видно наличие столба теплого воздуха (с температурой от 0 до 2.3 °С) на уровне высоты 850 гПа до уровня 928 гПа (706 м), а далее до поверхности Земли – отрицательных температур, т. е. наличие слоя инверсии температуры воздуха; подтверждающие это данные профилемера (рис. 5, справа).

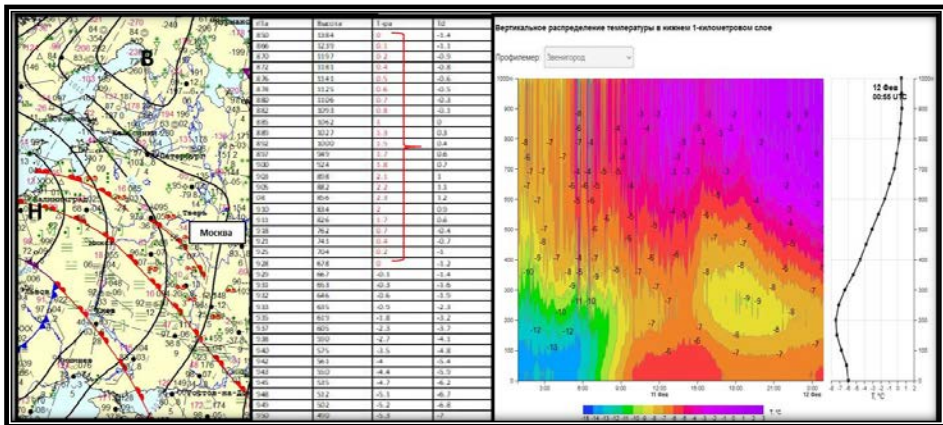


Рис. 5. Фрагменты фактических данных за 12.02.2024 г.: приземная карта погоды с фронтальным анализом за 09 ч ВСВ (слева), данные наблюдений фактического радиозондирования атмосферы в п. Долгопрудный за 12 ч ВСВ (посередине), данные профилемера в п. Звенигород (справа).

Fig. 5. The fragments of observational data for February 12, 2024: the surface weather chart with frontal analysis for 09:00 UTC (left), radiosonde data from the Dolgoprudny station for 12:00 UTC (middle), the temperature profiler data in Zvenigorod (right).

Прогностическая карта модели с высоким разрешением COSMO-Ru2 (см. рис. 2, слева) демонстрирует наличие зоны переохлажденных замерзающих осадков. Таким образом, можно сделать вывод о значительной вероятности образования ледяного дождя и гололёда.

Далее с помощью продукции численной модели ECMWF уточняем: – сначала визуальное пространственное распределение и тип переохлажденных осадков (рис. 6, слева);

- далее количественные характеристики приземных метеорологических параметров, способствующих образованию гололёда по метеограмме (приземная температура воздуха, скорость ветра, количество осадков) (по метеограмме на рис. 6, справа);
- тип, количество и вероятность переохлажденных осадков (по диаграмме на рис. 6, справа).

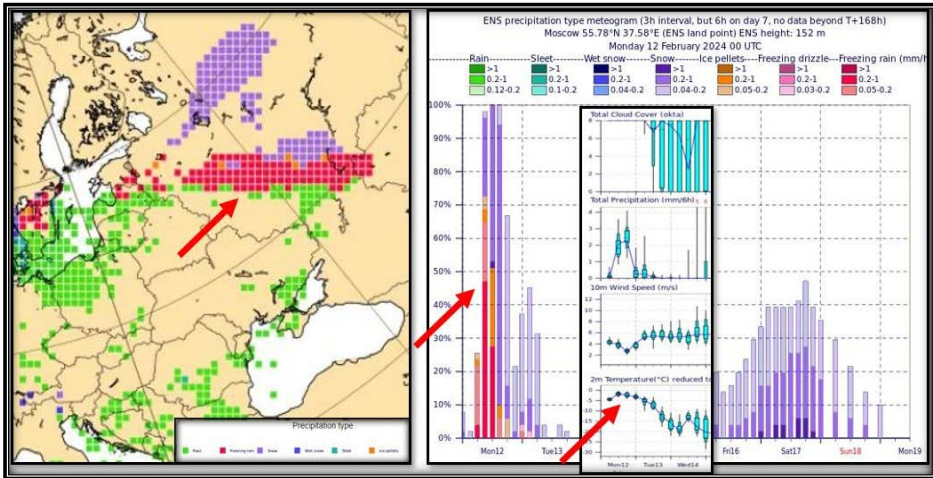


Рис. 6. Фрагменты продукции ECMWF по прогнозу фаз осадков на 12.02.2024 от счета 00 ч ВСВ: в картографическом виде (слева) и на метеограммах с вероятностью по шкале до 100 % (справа – основная) с метеопараметрами (вставка). Розовый и красный цвет – замерзающие осадки.

Fig. 6. The fragments of the ECMWF products with the forecast of precipitation phases for February 12, 2024 from 00:00 UTC: the map (left) and the meteograms with the probability on the scale up to 100% (right) with the meteorological parameters (inset). The pink and red color is freezing precipitation.

На карте видна существующая вероятность замерзающих осадков (ледяного дождя) с вероятностью ~47 % и интенсивностью около 1 мм/ч и ледяной крупы (порядка 70 %), что говорит о необходимости включения в прогноз явления «ледяного дождя» и «гололёда».

Далее при уточнении прогноза на 12 ч – конкретизация времени приближения к пункту прогноза зоны осадков теплого атмосферного фронта и необходимость выпуска штормового предупреждения, возможно, в градации ОЯ, так как для московского мегаполиса явление «ледяной дождь» признано опасным.

Представленный алгоритм прогнозирования ледяного дождя и гололёда предполагает использование всего спектра доступных в настоящее время для синоптиков Росгидромета выходных данных численного моделирования разной детализации, в том числе моделей с высоким разрешением, их адаптацию к различным регионам прогнозирования с учетом локальных особенностей, а также поиск систематических ошибок

моделирования в конкретном регионе и их минимизацию. Для повышения качества оценки ситуации, удобства восприятия и оперативности использования прогностической и фактической информации рекомендуется сконцентрировать ее на едином специализированном сайте для синоптиков Росгидромета с авторизованным доступом <https://special.meteoinfo.ru/>.

Выводы

Анализ случаев выпадения ледяного дождя и отложения гололёда в холодные периоды 2023–2024 гг. при сравнении со случаем выпадения сильного ледяного дождя 25–26.12.2010, результатов расчетов прогнозов численных моделей с высоким разрешением и модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) по прогнозу типа осадков показал сложность прогнозирования ледяного дождя и сильного гололёда.

Для прогноза рассмотренных явлений в оперативном режиме рекомендуется использовать всю имеющуюся базовую информацию с учетом корректировок на основе данных современных моделей и подходов, а также особенностей местных климатических условий, способных влиять на гололёдообразование. В качестве консультативной информации рекомендуется использовать проверенные и показавшие хорошую оправдываемость известные доступные прогностические материалы зарубежных погодных веб-ресурсов.

Настоятельно рекомендуется проведение методической учебы с наблюдательной сетью с уточнением и определением понятия гололёдных отложений, различий между видами зимних осадков (снег, снежная крупа, снежные зерна, ледяная крупа, ледяной дождь).

Что касается применения зарубежного опыта разработки методов диагноза и прогноза переохлажденных осадков/гололёда в России, основным препятствием является недостаточный объем рядов инструментальных наблюдений за этими явлениями, а также отсутствие автоматизированных методов, принятых Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета.

Необходимо развивать сеть наблюдений за гололёдом в подразделениях Росгидромета с учетом региональных особенностей условий образования данных явлений и совершенствовать алгоритм прогноза в отечественных численных моделях.

Список литературы

1. Багров А.Н., Снитковский А.И. Применение метода обобщенного портрета для численного прогноза гололёда // Труды Гидрометцентра СССР. 1974. Вып. 149. С. 3-13.
2. Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П. Оперативная технология краткосрочного прогноза гололедных явлений на территории Урало-Сибирского региона // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. 2023. № 108. С. 112-121. http://sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112.
3. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 735-741.

4. Методическое письмо ГГО № 30 от 30.08.2021 «О метеорологических условиях в период выпадения ледяных дождей». СПб., 2021. 6 с.
5. *Вапник В.Н., Червоненкис А.Я.* Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974. 415 с.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть I Л.: Гидрометеоиздат, 1985 С. 118-120.
7. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. 66 с.
8. Отчет о результатах оперативных испытаний «Метод и технология краткосрочного прогноза гололедных явлений на территории Урало-Сибирского региона (ФБГУ «СибНИГМИ», М.Я. Здерева) за период 2020–2022 гг.». Новосибирск, 2021. 4 с. http://sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112.
9. Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И., Титов Д.Е. Использование теплобалансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Энергия Единой Сети, 2018: № 2 (37). С. 43-50.
10. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды: Часть I. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 545-548.
11. *Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н.* Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130-161.
12. *Язудин Р.А.* Рекомендации к прогнозу гололеда на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 30. С. 68-69.
13. *Rauber R.M., Olthoff L.S., Ramamurthy M.K., Miller D., Kunkel K.E.* A Synoptic Weather Pattern and Sounding-Based Climatology of Freezing Precipitation in the United States East of the Rocky Mountains // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2001. Vol. 40, no. 10. P. 1724-1747. DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<1724:ASWPAS>2.0.CO;2.
14. Cortinas J.V.Jr., Brill K. F., Baldwin M.E. Probabilistic Forecasts of Precipitation Type https://www.researchgate.net/publication/266347591_PROBABILISTIC_FORECASTS_OF_PREC.
15. *DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L.* Short-Term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and a Modified Precipitation-Type Algorithm // Wea. Forecasting. 2018. Vol. 23. P. 838-853. https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/23/5/2008waf2006106_1.xml#i1520-0434-23-5-838-Ramer1.
16. *Musilek P., Arnold D., Lozowski E.P.* An Ice Accretion Forecasting System (IAFS) for Power Transmission Lines Using Numerical Weather Prediction // SOLA. 2009. Vol. 5. P. 025-028. <https://doi.org/10.2151/SOLA.2009-007>.
17. *Sanders K.J., Barjenbruch B.L.* Analysis of Ice-to-Liquid Ratios during Freezing Rain and the Development of an Ice Accumulation Model // Wea. Forecasting. 2016. Vol. 31, no. 4. P. 1041-1060. <https://doi.org/10.1175/waf-d-15-0118.1>.
18. *Sanders K.J., Gravelle C., Gagan J., Graves C.* Characteristics of Major Ice Storms in the Central United States // J. Operational Meteorol. 2013. Vol. 1, no. 10. P. 100-113. <http://dx.doi.org/10.15191/nwajom.2013.0110>.

References

1. *Bagrov A.N., Snitkovskiy A.I.* Primenenie metoda obobshchennogo portreta dlya chislenogo prognoza gololeda. *Trudy Gidrometcentra SSSR*, 1974, Vol.149, pp. 3-13 [in Russ.].
2. *Zdereva M.YA., Tokarev V.M., Hluchina N.A., Vorob'eva L.P.* Operativnaya tekhnologiya kratkosrochnogo prognoza gololednyh yavleniy na territorii Uralo-Sibirskogo regiona. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo institute*, 2023, no. 108, pp. 112-121. http://sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112 [in Russ.].
3. *Ignatov R.Y., Rubinshtein K.G., Yusupov Y.I.* Numerical Experiments on Forecasting Glaze Phenomena. *Atmos Ocean Opt.*, 2020, vol. 33, pp. 682-689. DOI: 10.1134/S1024856020060202.

4. Metodicheskoe pis'mo GGO № 30 ot 30.08.2021 «O meteorologicheskikh usloviyah v period vypadeniya ledyanykh dozhdhey». Saint Petersburg, 2021, 6 p. [in Russ.].
5. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. Teoriya raspoznavaniya obrazov, Moscow, Nauka publ., 1974, 415 p. [in Russ.].
6. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. Vyp. 3, Chast' I, Leningrad, Gidrometeoizdat publ, 1985, pp. 118-120 [in Russ.].
7. RD 52.27.724-2019 Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. 66 s. [in Russ.].
8. Otchet o rezul'tatah operativnykh ispytaniy «Metod i tekhnologiya kratkosrochnogo prognoza golelednykh yavleniy na territorii Uralo-Sibirskogo regiona (FBGU «SibNIGMI», M.YA. Zdereva) za period 2020–2022 gg.». Novosibirsk, 2021. 4 s. Available at: sibnigmi.ru/documents/Trudy_108_DOI.pdf#page=112 [in Russ.].
9. Rubinshtein K.G., Ignatov R.Y., Yusupov Yu.I. The forecast of ice-frost deposits on the wires of the Air Lines (VL) using the heat-balance method. *Energiya Edinoy Seti [Energy of Unified Grid]*, 2018, vol. 37, no. 2, pp. 43-50 [in Russ.].
10. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody: Chast' I. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, pp. 545-548 [in Russ.].
11. Shakina N.P., Skriptunova Ye.N., Ivanova A.R., Vetrova Ye.I. Possibilities for low cloud ceiling forecasting at the aerodroms in the former European USSR on the basis of numerical model output data. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 348, pp. 130-161 [in Russ.].
12. Yagudin R.A. Rekomendacii k prognozu goleleda na yugo-vostoke Zapadnoy Sibiri. *Trudy ZSRNIGMI*, 1977, vol. 30, pp. 68-69 [in Russ.].
13. Rauber R.M., Olthoff L.S., Ramamurthy M.K., Miller D., Kunkel K.E. A Synoptic Weather Pattern and Sounding-Based Climatology of Freezing Precipitation in the United States East of the Rocky Mountains. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2001, vol. 40, no. 10, pp. 1724-1747. DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<1724:ASWPAS>2.0.CO;2.
14. Cortinas J.V.Jr., Brill K. F., Baldwin M.E. Probabilistic Forecasts of Precipitation Type https://www.researchgate.net/publication/266347591_PROBABILISTIC_FORECASTS_OF_PREC
15. DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L. Short-Term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and a Modified Precipitation-Type Algorithm. *Wea. Forecasting*, 2018, vol. 23, pp. 838-853. Available at: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/23/5/2008waf2006106_1.xml#i1520-0434-23-5-838-Ramer1.
16. Musilek P., Arnold D., Lozowski E.P. An Ice Accretion Forecasting System (IAFS) for Power Transmission Lines Using Numerical Weather Prediction. *SOLA*, 2009, vol. 5, pp. 025-028. DOI: 10.2151/SOLA.2009-007.
17. Sanders K.J., Barjenbruch B.L. Analysis of Ice-to-Liquid Ratios during Freezing Rain and the Development of an Ice Accumulation Model. *Wea. Forecasting*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 1041-1060. DOI: 10.1175/waf-d-15-0118.1.
18. Sanders K.J., Gravelle C., Gagan J., Graves C. Characteristics of Major Ice Storms in the Central United States. *J. Operational Meteorol.*, 2013, vol. 1, no. 10, pp. 100-113. DOI: 10.15191/nwajom.2013.0110.

Поступила 19.02.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 19.02.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-64-84>

УДК 504.064.3:504.3.054

Обновленная система прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в московском регионе на основе химической транспортной модели CHIMERE-2023

Ю.В. Ткачева, И.Н. Кузнецова

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

На вычислительной платформе Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Росгидромета актуализирована одна из последних версий химической транспортной модели CHIMERE-2023 с обновленным интерфейсом. С учетом того, что ХТМ CHIMERE-2023 разрабатывалась и настраивалась для использования в странах Евросоюза, установка обновленной версии сопровождалась серией численных экспериментов по изучению чувствительности откликов модели в ответ на изменения региональных выбросов, подбором параметров сезонного и суточного распределения эмиссий используемого кадастра ЕМЕП-2021. Результаты экспериментального тестирования обновленной технологии указывают в целом на удовлетворительное качество прогнозирования приоритетных загрязняющих веществ с учетом того, что период проверки (сентябрь 2024 года) был аномальным как по погодным условиям (средняя месячная температура на 4 °С выше нормы), так и по загрязнению воздуха частицами РМ₁₀ из-за частого влияния дальнего переноса и из-за нехарактерного приземного озона, превысившего норму на 15–18 %.

Ключевые слова: загрязняющие вещества, химическая транспортная модель CHIMERE, эмиссии ЕМЕП, COSMO-Ru2ETR, верификация

An updated system for forecasting pollutant concentrations in the Moscow region based on the CHIMERE-2023 chemistry-transport model

J.V. Tkacheva, I.N. Kuznetsova

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

One of the latest versions of the CHIMERE-2023 chemistry-transport model with an updated interface is actualized on the Roshydromet CRAY XC40-LC computing platform. Given that the CHIMERE-2023 model was developed and configured for use in the EU countries, the installation of the updated version for the Moscow region was accompanied by the series of numerical experiments to study the sensitivity of the model responses to changes in regional emissions and by the selection of parameters for the seasonal and daily emission distribution of the EMEP-2021 inventory used. The results of the experimental testing of the updated technology indicate generally satisfactory quality of forecasting priority pollutants, taking into account that the testing period (September 2024) was abnormal both in terms of weather conditions (the monthly mean temperature was 4 °C above normal)

and in terms of air pollution with PM₁₀ particles due to the frequent influence of long-range transport, as well as due to uncharacteristic ground-level ozone, which exceeded the normal by 15–18%.

Keywords: pollutants, CHIMERE chemistry-transport model, EMEP emissions, COSMO-Ru2ETR, verification

Введение

Использование химических транспортных моделей – широко применяемая зарубежная практика прогнозирования качества воздуха, что иллюстрируется публикациями ВМО, в частности [14]. Одним из примеров такой практики может служить европейская Служба мониторинга атмосферы Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), которая предоставляет, в частности, информацию о загрязнении воздуха по всему миру (<https://atmosphere.copernicus.eu/cams-air>). Ежедневно CAMS рассчитывает четырехсуточные прогнозы по пяти основным загрязнителям воздуха, регулируемым стандартами качества воздуха Европейского союза и Всемирной организации здравоохранения: диоксид азота (NO₂), озон (O₃), крупные твердые частицы (PM₁₀), мелкие твердые частицы (PM_{2,5}) и диоксид серы (SO₂), а также для некоторых других загрязняющих веществ, в т. ч. формальдегида, а также пыльцы и аэрозольных трассеров в Европе (<https://atmosphere.copernicus.eu/european-air-quality-forecast-plots>). Для оценки опасности воздушного загрязнения в CAMS прогнозируется индекс качества воздуха (AQI) по всей Европе на 24 часа вперед, при этом можно получить информацию о AQI в любой час из предыдущих 48 часов.

Расчеты прогностических концентраций загрязняющих веществ производятся как по отдельным ХТМ: CHIMERE, DENM, EMEP, EURAD-IM, GEM-AQ, LOTOS-EUROS, MATCH, MINNI, MOSAGE, MONARCH, SILAM, так и на основе региональной ансамблевой модели CAMS. Созданная большими коллективами европейских разработчиков система прогнозирования качества воздуха CAMS служит прообразом разрабатываемой в Гидрометцентре России в последние годы технологии прогнозирования.

В число используемых в CAMS моделей входит ХТМ CHIMERE, которая с 2013 года является моделью открытого доступа [18]. ХТМ CHIMERE версии 2013 года (CHIMERE-2013), реализованная в оперативном режиме в Гидрометцентре России, описана подробно в [6, 7]. На базе CHIMERE-2013 были проведены эксперименты с пространственной коррекцией эмиссий загрязняющих веществ кадастра ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme) 2013 года (https://www.emep.int/emep_overview.html), коррекцией сезонного и внутрисуточного распределения суммарных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, а также тестирования вариантов с горизонтальным разрешением 11, 7 и 2 км путем сравнения с данными наблюдений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АКЗА) в Москве (<https://mosecom.mos.ru/air-quality/>). Оценки прогнозов загрязняющих веществ позволили установить

характерные отклонения модельных расчетов от измеренных концентраций различных загрязняющих веществ. [6]. В последнее время для пост-процессинга был применен метод машинного обучения, показавший целесообразность применения такого подхода для повышения успешности прогнозов загрязнений (PM_{10} и O_3) в периоды неблагоприятных метеорологических условий [1, 2].

В 2023 году разработчиками XTM CHIMERE была представлена новая версия модели CHIMERE-2023 с коренным изменением вычислительной структуры, улучшенным физическим и химическим наполнением, а также новым препроцессором, позволяющим использовать входные эмиссии загрязняющих веществ из разных баз данных [17].

Современная вычислительная платформа Росгидромета и публикация актуализированной XTM CHIMERE-2023 с эмиссиями ЕМЕР за 2021 год (ЕМЕР-2021) позволили нам реализовать обновленную технологию прогнозирования на суперкомпьютере CRAY XC40-LC.

Ниже кратко описываются новые возможности CHIMERE-2023, отличия от предыдущих версий XTM, особенности баз данных эмиссий, а также полученные результаты тестирования обновленной технологии.

Новизна актуализированной XTM CHIMERE-2023

Модель CHIMERE-2023 находится в общем доступе, подробно описана в документациях на сайте [<https://www.lmd.polytechnique.fr>] и опубликованных статьях разработчиков модели [15, 17]. XTM CHIMERE-2023 создавалась разработчиками на базе версии модели CHIMERE-2013 [16, 18, 19]. К числу основных усовершенствований относятся:

- численная реализация модели в декартовой системе координат;
- реализация вариантов счета прогнозов: *online* – с использованием в качестве метеорологической модели только WRF (Weather Research and Forecasting) с учетом и без учета обратной связи между моделями, *offline* – с использованием готовых прогнозов имеющихся у пользователей метеорологических моделей (WRF или др.);
- введение новых схем горизонтального и вертикального переноса загрязняющих веществ;
- усовершенствование учета процессов подсеточного масштаба;
- возможность выбора механизма химических процессов SAPRC, широко используемого в современных XTM, или MELCHIOR;
- реализация обновленного блока препроцессора расчета входных эмиссий загрязняющих веществ с учетом измененной структуры записи данных в актуализированной базе ЕМЕР;
- возможность выбора БД для входных эмиссий (ЕМЕР, CAMS и др.);
- усовершенствование файловой структуры для удобства анализа входных и прогностических данных.

Горизонтальная сеточная структура аналогична структуре гидродинамической модели WRF, так как в своем оригинальном варианте WRF является основной метеорологической моделью для CHIMERE-2023. Расчеты ХТМ с использованием тандема CHIMERE – WRF имеет ряд преимуществ, поскольку не требует интерполяции входных метеорологических данных при переходе к сетке химической модели, позволяет учесть обратную связь прогнозируемых величин в обеих моделях, подобрать в обеих моделях параметризацию, наилучшим образом описывающую физические процессы для выбранной области прогноза. Но одновременно с преимуществами использования модели WRF стоит отметить и недостатки. Для оперативного счета требуются мощные вычислительные и людские ресурсы. Если мощный PC или станцию для региональных прогнозов можно приобрести, то профессионалов, имеющих опыт, знания в различных областях метеорологии для настройки модели для своих географических районов, найти сложнее.

ХТМ CHIMERE-2023

Актуализированная версия химико-транспортной модели CHIMERE, вышедшая в 2023 году, предназначена для численного прогнозирования концентраций загрязняющих веществ с учетом описания химических и физических процессов [17]. Предусмотренный разработчиками модели CHIMERE-2023 вариант *offline* включения в химическую модель “готовой” метеорологической прогностической продукции численных моделей атмосферы был использован нами для реализации обновленной технологии прогнозирования качества воздуха в московском регионе.

В Гидрометцентре России считаются прогнозы по нескольким конфигурациям системы краткосрочного прогнозирования COSMO-Ru с разным горизонтальным и вертикальным разрешением и областями прогноза. Поскольку эти модификации модели создавались для российских территорий, то прогнозы рассчитываются с учетом физических процессов, характерных для данных регионов. Для расчетов CHIMERE-2023 нами была выбрана конфигурация COSMO-Ru2ETR. Следует отметить, что совместно с используемой конфигурацией модели COSMO-Ru в Гидрометцентре России считается химическая модель COSMO-ART [3, 11], прогнозы которой важны для сравнения и комплексирования с CHIMERE-2023.

Структура технологии прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе ХТМ CHIMERE-2023 представлена схематично в виде составляющих блоков на рис. 1.

ХТМ CHIMERE-2023 реализована на суперкомпьютере Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Росгидромета. Предварительно были установлены указанные в документации и отсутствовавшие на Cray XC40-LC системные библиотеки. Время счета ХТМ CHIMERE-2023 прогноза концентраций загрязняющих веществ на 2 суток для московского региона составляет около 1 часа.

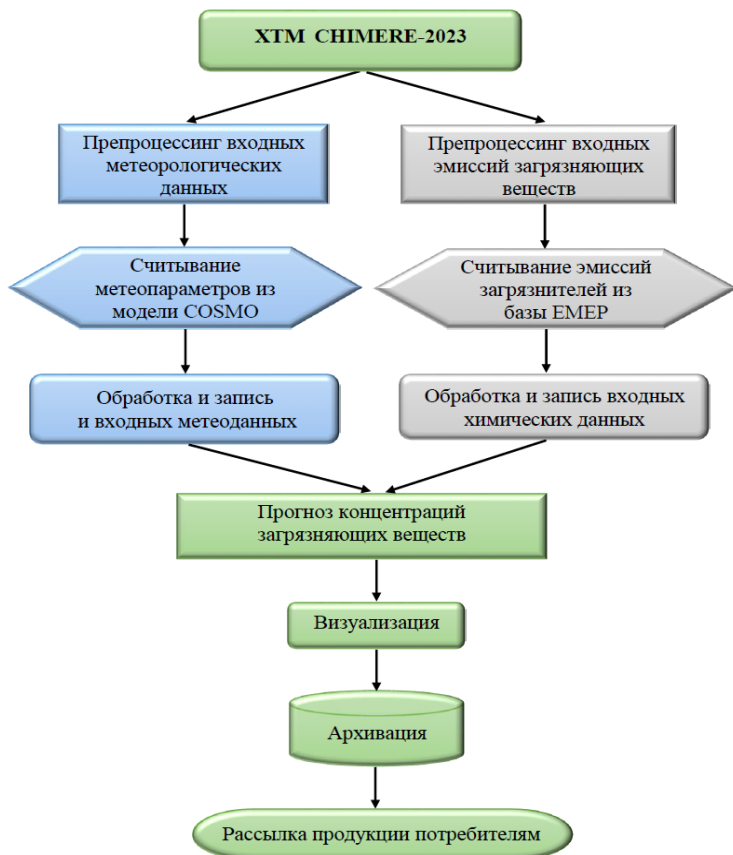


Рис. 1. Схема технологии прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на базе XTM CHIMERE-2023.

Fig. 1. Scheme of pollutant concentration forecasting technology based on CHIMERE-2023.

XTM CHIMERE-2023 имеет горизонтальную вычислительную сетку в декартовой системе координат с заданным пользователем горизонтальным разрешением и ориентированной относительно координат центрального узла областью прогноза. Горизонтальное разрешение равно 2 км по обеим осям, область прогноза захватывает территорию Москвы и небольшие приграничные районы. Поскольку применяется нерегулярная по широте и долготам сетка, границы области счета заданы по долготам (36.5° и 38.3° в. д.) и широтам (54.9° и 56.2° с. ш.), число узлов по осям x и y равно 61 и 75 соответственно, число вертикальных уровней составляет 20, первый уровень модели находится на 998 гПа, а верхняя граница на 300 гПа.

Высокое горизонтальное разрешение и улучшение вертикального разрешения, при котором толщина первого слоя модели уменьшена до 2 гПа, позволяют точнее описывать перенос во всем пограничном слое. На рис. 2а

показана расчетная область модели с границами административных округов Москвы и типовая принадлежность входящих в модельные ячейки АСКЗА, а на рис. 2б – сеточное разрешение баз ЕМЕР, используемых CHIMERE-2023 (синим) и CHIMERE-2013 (красным).

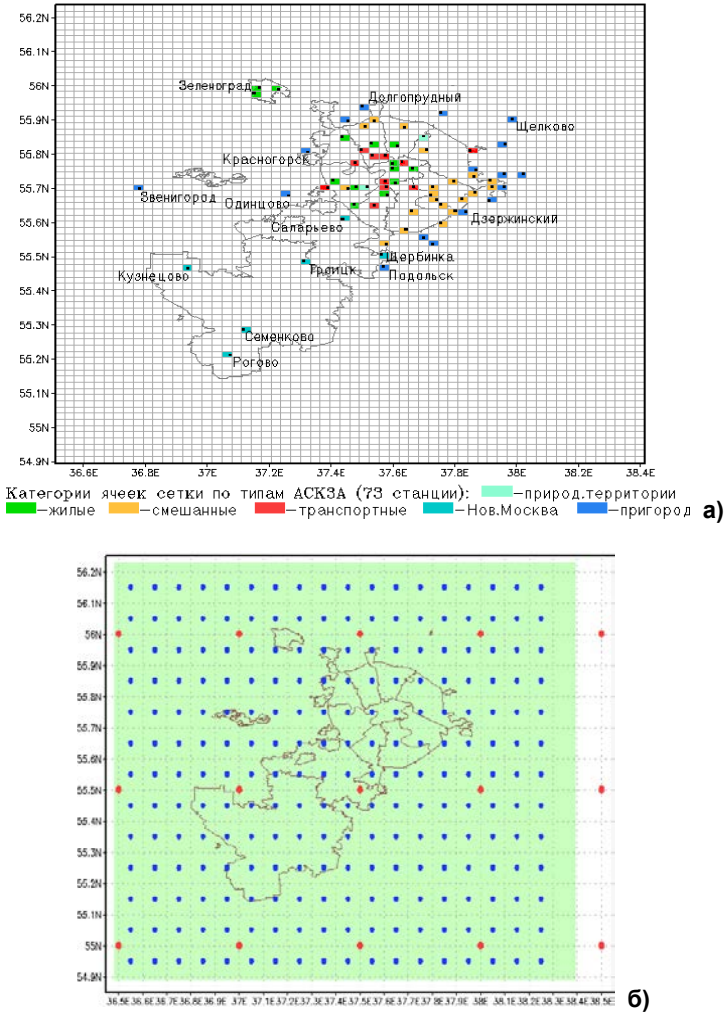


Рис. 2. Сеточная область прогноза XTM CHIMERE-2023 с границами административных округов г. Москвы и категориями ячеек сетки по типу входящих в них АСКЗА (обозначены черными точками) (а); сеточная область базы ЕМЕР, используемой для CHIMERE-2023 (синим) и для CHIMERE-2013 (красным) (б).

Fig. 2. Grid area of CHIMERE-2023 forecast with boundaries of Moscow administrative districts and categories of grid cells by the type of AAPMS (automatic air pollution monitoring stations) included in them (marked with black dots) (a); grid area of the EMEP database used for CHIMERE-2023 (blue) and for CHIMERE-2013 (red) (b).

Преобработка входных метеорологических данных

Для расчетов CHIMERE-2023 установлен обязательный перечень входных метеопараметров (табл. 1) и список необязательных параметров (вертикальная скорость, высота пограничного слоя). При отсутствии последних во входном потоке, они вычисляются в ХТМ по заданному алгоритму.

Таблица 1. Входные метеорологические параметры COSMO-Ru2ETR, передаваемые в CHIMERE-2023

Table 1. COSMO-Ru2ETR input meteorological parameters transmitted to CHIMERE-2023

Название	Единица измерения
2D	
Долгота узла сетки	град
Широта узла сетки	град
Приземная температура	К
Зональная составляющая приземного ветра	м·с ⁻¹
Меридиональная составляющая приземного ветра	м·с ⁻¹
Приземная удельная влажность	0–1
Приземный дефицит точки росы	К
Крупномасштабные осадки	кг·м ⁻² ·ч ⁻¹
Конвективные осадки	кг·м ⁻² ·ч ⁻¹
Коротковолновая радиация у земной поверхности	Вт·м ⁻²
Длинноволновая радиация у земной поверхности	Вт·м ⁻²
Приземный явный поток тепла	Вт·м ⁻²
Приземный скрытый поток тепла	Вт·м ⁻²
Облачность среднего яруса	-
Облачность нижнего яруса	-
Облачность верхнего яруса	-
Высота пограничного слоя	м
Высота снега	см
Водный эквивалент высоты снега	м
Приземное давление	Па
3D	
Температура	К
Удельная влажность	кг·кг ⁻¹
Удельная водность	кг·кг ⁻¹
Удельное содержание льда	кг·кг ⁻¹
Удельная масса дождевых капель	кг·кг ⁻¹
Удельная масса снега	кг·кг ⁻¹
Давление	Па
Высота половинных уровней	м
Вертикальная скорость	м·с ⁻¹
Зональная составляющая ветра	м·с ⁻¹
Меридиональная составляющая ветра	м·с ⁻¹
Температура слоев почвы	К
Влажность слоев почвы	м ³ ·м ⁻³

В CHIMERE-2023 передаются все перечисленные метеорологические параметры из модели COSMO-Ru2ETR, при этом предварительно проводится поэтапная обработка данных, включающая приведение в соответствие единиц измерения входных полей с принятыми в модели CHIMERE-2023.

Интерполяция данных из сетки COSMO-Ru2ETR на сетку CHIMERE-2023 осуществляется методом билинейной интерполяции с весовыми коэффициентами. Поворот векторных полей при смене систем координат выполняется с помощью стандартной процедуры преобразования систем координат, которая поставляется вместе с документацией к модели COSMO-Ru.

Для пересчета температуры и влажности слоев почвы, имеющих в COSMO-Ru2ETR, на уровни CHIMERE-2023 (табл. 2) применяется линейная интерполяция.

Таблица 2. Уровни почвы в COSMO-Ru2ETR и принятых в CHIMERE-2023
Table 2. Soil levels in the COSMO-Ru2ETR and the CHIMERE-2023

Номера слоев почвы	COSMO-Ru2ETR	CHIMERE-2023
	Нижние уровни слоев	
1	1	7
2	2	28
3	6	100
4	18	
5	54	
6	162	

Интерполяция метеорологических данных, записанных с дискретностью 1 час на каждый временной шаг, между двумя последовательными часами химической модели производится методом линейной интерполяции. Файл метеорологических данных записывается для горизонтальной сетки CHIMERE-2023, но с вертикальным разрешением модели COSMO-Ru2ETR.

Переход на вертикальную сетку модели CHIMERE производится внутри самой химической модели с применением встроенных процедур интерполяции, поскольку вертикальное разрешение метеорологической (COSMO-Ru2ETR) и химической моделей разное. При этом необходимое требование – все трехмерные поля должны быть записаны на половинных уровнях метеорологической модели. Подробное описание разных конфигураций модели COSMO-Ru дано в [9, 10], здесь можно отметить лишь то, что в конфигурации модели COSMO-Ru2ETR применена повернутая сферическая система координат с заданными параметрами шагов сетки, координат области расчета и координат модельного северного полюса.

Преобработка эмиссий загрязняющих веществ

В качестве входных данных о выбросах используются данные кадастра ЕМЕП за 2021 год, представленные CEIP (Center on Emission Inventories and Projections), географически привязанные к горизонтальной сетке с разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ и классифицированные в соответствии с 15 секторами GNFR (*Gridded Nomenclature For Reporting*) загрязнителей [8]. На рис. 26 показана сетка ЕМЕП-2021 и модельная сетка ЕМЕП-2013 с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, используемая для расчетов CHIMERE-2013. Значительно увеличенное разрешение ЕМЕП-2021 позволяет более точно распределять выбросы по территории московского региона.

Заметим, данные ЕМЕП-2021 рассчитаны по информации о выбросах загрязняющих веществ в 2019 г., поскольку из-за длительного времени сбора информации и ее обработки представленные на модельной сетке объемы эмиссий становятся общедоступными с двухгодичным запаздыванием. На сайте ЕМЕП данные с выбросами 2021 г. имеются, но обработанные по информации о выбросах 2020 г. (во время пандемии COVID), в настоящее время они осознанно не используются для решения задач прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в крупном мегаполисе Москва.

Набор данных ЕМЕП-2021 включает выбросы оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x), аммиака (NH_3), неметановых летучих соединений (NMVOC), диоксида серы (SO_2) и твердых частиц ($\text{PM}_{2.5}$ и грубых $\text{PM}_{\text{coarse}}$, равных разности PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$).

Блок препроцессора emiSURF2023 в ХТМ CHIMERE-2023 обеспечивает выполнение следующих задач: проецирование годовых эмиссий из базы ЕМЕП на сетку CHIMERE-2023, преобразование годовых сумм в почасовые потоки путем применения ежемесячных, еженедельных и почасовых профилей, преобразование данных из исходного набора данных в модельные виды.

Преобразованные эмиссии загрязняющих веществ распределяются по сезонам, дням недели для заданного месяца с учетом временного, суточного хода загрязнителей, принятого в ХТМ для Российской Федерации. Для распределения годовых эмиссий по месяцам и дням недели применяются коэффициенты, различающиеся для городской и пригородной территорий. Для распределения эмиссий в суточном ходе применяются почасовые коэффициенты с учетом дня недели (рис. 3).

Выбросы оксидов азота (NO_x) для всех секторов деятельности, кроме автомобильного транспорта, распределяются следующим образом: NO 95,0 %, NO_2 24,5 %, HONO 0,5 %. Для автомобильного транспорта: NO 90,0 %, NO_2 8,2 %, HONO 0,8 %. Выбросы оксидов серы (SO_x) распределяются для всех секторов деятельности в соотношении: 99 % SO_2 , 1 % H_2SO_4 . Пользователь может задавать собственную дифференциацию потоков выбросов по секторам деятельности в соответствии с номенклатурой GNFR, а также включать несколько входных баз данных о выбросах (ЕМЕП, CAMS и др.).

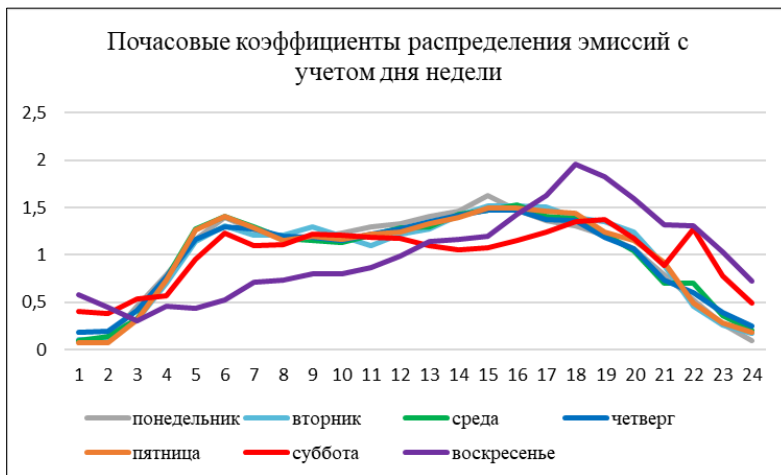


Рис. 3. Почасовые коэффициенты распределения эмиссий с учетом дня недели.

Fig. 3. Hourly emission distribution coefficients taking into account the day of the week.

В процессе обработки выполняется расчет сдвига во времени для синхронизации местного времени необработанных данных с выбросами в универсальном времени (UTC), необходимыми для CHIMERE-2023.

Для пространственного распределения выбросов предлагается использовать набор таких данных: плотность населения, дорожная карта, землепользование и выбросы аэрозолей от сжигания древесины в жилом секторе. Включенные в работу препроцессинга прокси-файлы, поставляемые вместе с CHIMERE-2023, для транспорта, плотности населения, землепользования, распределения городских территорий и др. определяют схему распределения выбросов по прогностической области расчета. Но только карта землепользования является обязательным входом, другие прокси-файлы используются только для секторов GNFR 3 (для жилых районов) и 6 (для транспортных районов). На рис. 4 представлена карта дорожного движения прокси-файлов для транспорта, плотности населения и городской застройки для московского региона.

Начальные и граничные условия берутся из климатологических данных глобальных моделей: LMDz-INCA3 (Laboratoire de Météorologie Dynamique (zoomed) coupled with INteraction with Chemistry and Aerosols) – для всех газообразных и твердых частиц, кроме минеральной пыли (эти данные обновляются ежегодно), для минеральной пыли – из базы данных GOCART5 (Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport).

Потоки биогенных выбросов рассчитываются с использованием данных модели MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) и базы данных MOD – обработанных спутниковых данных MODIS LAI (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, NASA) растительного

покрова с индексом площади листьев (LAI), определяемой как половина общей площади зеленых листьев на единицу горизонтальной поверхности с временным разрешением 8 дней.

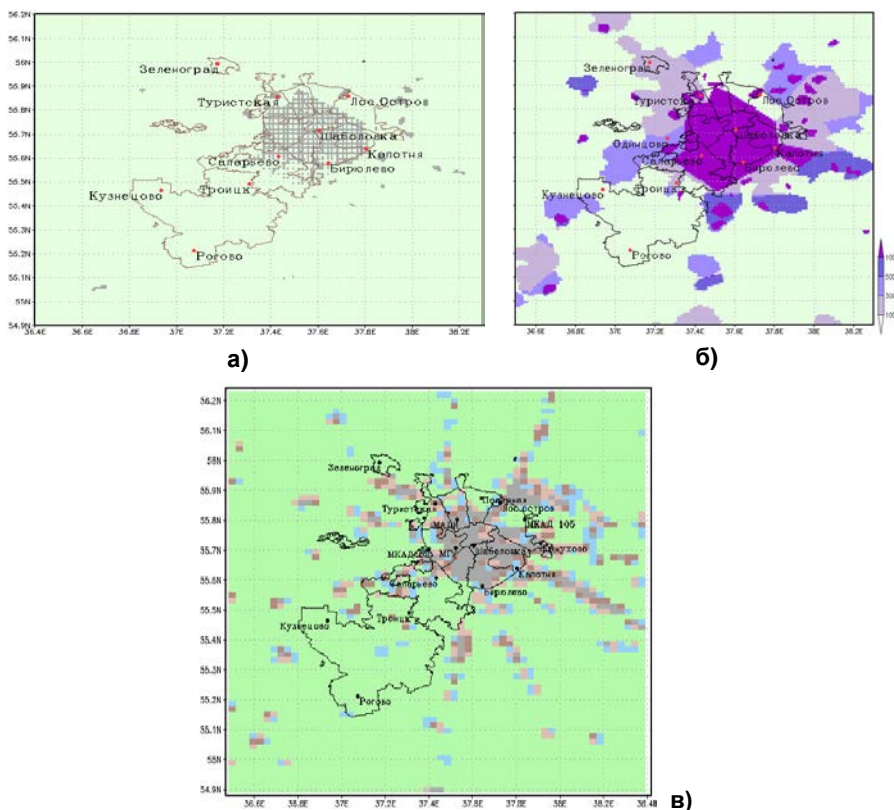


Рис. 4. Карта дорожной сети (а), плотности населения (б) и городской застройки (в) прокси-файлов для московского региона.

Fig. 4. Map of road network (а), population density (б) and urban development (в) of proxy files for the Moscow region.

Расчет газообразных веществ в CHIMERE-2023 производится по схеме MELCHIOR2 с 44 видами и около 120 реакциями. Поглощение воды нитратами, сульфатами и аммонием в ненасыщенных условиях представлено в модуле ISORROPIA. Скорости фотолиза обновляются каждые 5 минут вызовом модуля Fast-JX. Благодаря включению этого блока в модель CHIMERE-2023 появилась возможность учесть радиационное воздействие аэрозолей на фотохимию, при этом используются данные CHIMERE-2023 для всех видов аэрозолей и тропосферного озона до верхней границы модели и прогнозы метеорологических переменных (температуры, давления и облачного покрова).

Переход на сеточное разрешение CHIMERE-2023 выполняется с учетом землепользования из базы USGS (*United States Geological Survey*) с разрешением 30 угловых секунд ($0.0083^\circ \times 0.0083^\circ = \sim 1 \times 1$ км) и 24 категориями землепользования. Все данные из перечисленных баз поставляются вместе с моделью CHIMERE-2023, что значительно облегчает запуск модели.

При разработке блока препроцессора входных эмиссий было усовершенствовано управление антропогенными выбросами, связанное с уменьшением количества файлов, что очень важно для суперкомпьютеров; в новом формате каждому дню недели соответствует один файл соответствующего месяца и года.

Функционирование технологии

Разработанные модули препроцессинга позволили существенно обновить технологию прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе актуализированной ХТМ CHIMERE-2023 с усвоением региональных данных эмиссий ЕМЕР-2021. Актуализированная технология полностью автоматизирована на CRAY, позволяет рассчитывать прогностические концентрации загрязняющих веществ на территории московского региона с заблаговременностью 48 часа. После проверки завершения счета прогнозов метеорологической модели (конфигурация COSMO-Ru2ETR) запускается препроцессинг химической модели: считываются и обрабатываются метеорологические прогнозы, эмиссии загрязняющих веществ. По завершению препроцессинга запускается расчет прогностических концентраций загрязняющих веществ ХТМ. Полученные результаты визуализируются в виде карт, диаграмм, таблиц для всей области прогноза, а также для отдельных станций по заданному списку.

Аналогично CAMS, но с большей региональной детализацией, созданная технология позволяет визуализировать поля прогностических концентраций по расчетам CHIMERE-2023 на каждый час прогнозируемого периода. На рис. 5 представлены примеры прогностической продукции в виде карт. Хорошо выражена пространственная неоднородность концентраций загрязняющих веществ с различиями в очагах максимумов и окраинами до $35\text{--}50$ $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$.

На рис. 6 демонстрируется пример синхронизированного прогноза в пункте на двое суток вперед метеорологических характеристик и концентраций загрязняющих веществ. Видно, что пространственно-временная динамика загрязнений в целом согласована с изменчивостью метеорологических условий – с термической стратификацией и высотой атмосферного пограничного слоя, скоростью переноса и влажностью. Совместный анализ метеорологических условий и модельного воспроизведения загрязнения имеет особое значение для выявления причин недостаточно успешного прогноза отдельных загрязняющих веществ.

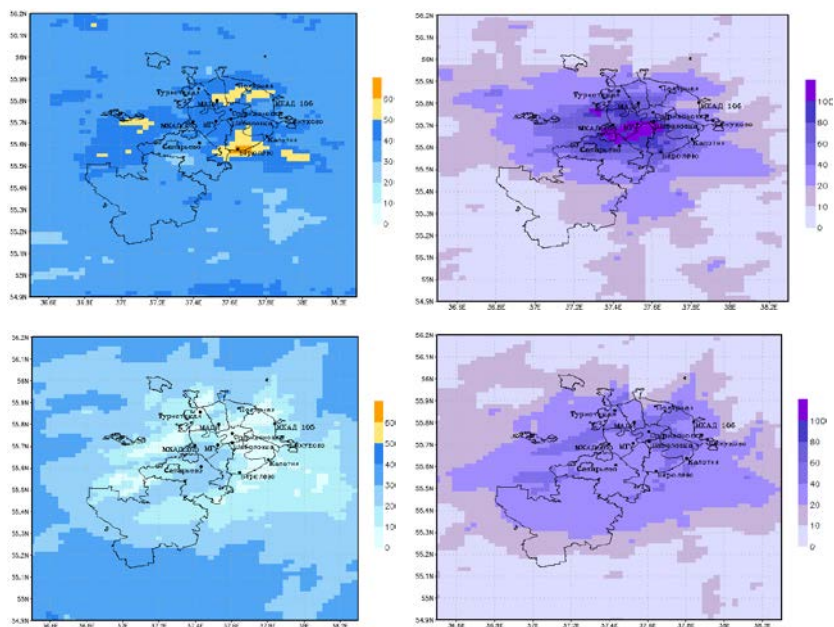


Рис. 5. Прогностические поля концентраций ($\mu\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$) O_3 (слева) и NO_2 (справа) по расчетам XTM CHIMERE-2023 на 9 ч ВСВ (верхний ряд) и 21 ч ВСВ 3 сентября 2024 г. (нижний ряд).

Fig. 5. Forecast fields of concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) of O_3 (left) and NO_2 (right) based on CHIMERE-2023 calculations for 9:00 a.m. on September 3 (top) and for 9:00 p.m. on September 3, 2024 (bottom row).

Верификация прогнозов загрязняющих веществ

Одним из важнейших блоков актуализированной технологии является верификация модельных прогнозов. Запуск обновленной технологии сопровождался проверкой результатов прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на ограниченных выборках в мае, июле и сентябре 2024 года, которые использовались для серии численных экспериментов по анализу чувствительности откликов модели CHIMERE-2023 к изменениям некоторых входных данных. Принималось во внимание, что исследования зарубежных авторов [12, 13] показали большую изменчивость концентрации в сценариях сокращения выбросов, например, изменчивость озона при сокращении выбросов достигает 10 %, а в озоновых эпизодах – 100 % или выше. Зарубежными авторами установлено, что комбинированное сокращение выбросов обычно более эффективно, чем сумма сокращений выбросов отдельных предшественников как для O_3 , так и для PM , кроме того, для озона отклики моделей с точки зрения линейности и аддитивности показали явное влияние нелинейных химических процессов.

Часть проведенных нами экспериментов была посвящена изучению отклика модельных расчетов на вариации объемов эмиссий загрязнителей.

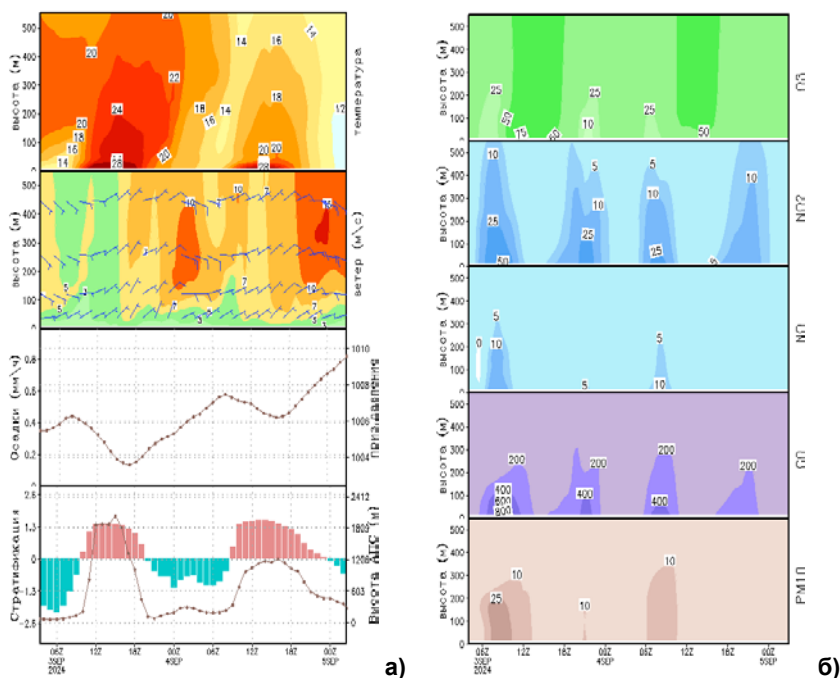


Рис. 6. Временная динамика температуры ($^{\circ}\text{C}$), направления и скорости ветра ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) в нижнем 500-метровом слое, давления (гПа), высоты АПС с градиентом температуры в слое 2–250 м по расчетам COSMO-Ru2ETR (а); концентраций ($\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) O_3 , NO_2 , NO , CO и PM_{10} (сверху вниз) по расчетам CHIMERE-2023 (б). Прогноз на 3-4 сентября 2024 г.

Fig. 6. Temporal dynamics of temperature ($^{\circ}\text{C}$), wind direction and speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in the lower 500-meter layer, pressure (hPa), ABL (atmospheric boundary layer) height with a temperature gradient in the 2–250 m layer based on COSMO-Ru2ETR calculations (a); concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) of O_3 , NO_2 , NO , CO and PM_{10} (from top to bottom) according to CHIMERE-2023 calculations (б). Forecast for September 3-4, 2024.

Оказалось, что при интенсивных атмосферных процессах модельные расчеты с увеличенными эмиссиями мало отличаются от базовых (оригинальных) прогнозов. Но при НМУ экспериментальное увеличение выбросов только на 10 % в транспортном секторе (эксперимент 1) и во всех секторах экономики (эксперимент 2) привело к увеличению концентраций загрязнений по сравнению с базовыми расчетами. В частном примере при НМУ 6–8 сентября 2024 г. концентрации NO_2 повысились в ночные часы на 10–15 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, днем – более существенно, на 40–70 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Наибольший эффект роста NO_2 зафиксирован при одновременном увеличении эмиссий на 10 % всех отраслевых источников (рис. 7). Заметим, что при НМУ добавка выбросов (10 %) дает увеличение средней суточной концентрации NO_2 на 40–70 %. Этот результат указывает на возможный инструмент влияния на модельные расчеты концентраций путем регулирования количества эмиссий.

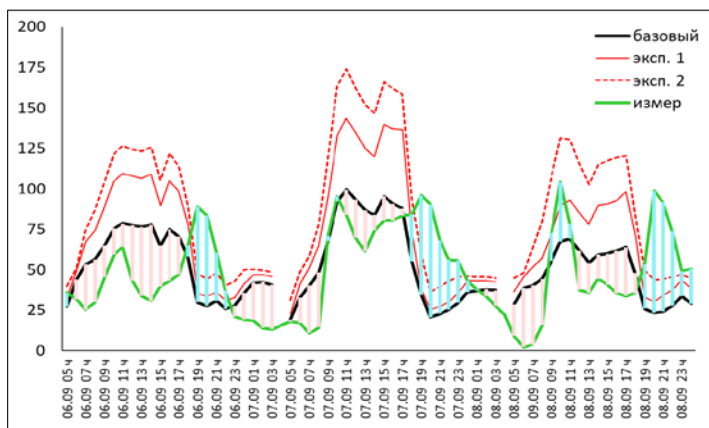


Рис. 7. Измеренные и модельные концентрации NO_2 XTM CHIMERE-2023: базовые, при увеличении эмиссий на 10 % транспортными источниками (эксперимент 1) и всеми антропогенными источниками (эксперимент 2). Розовая заливка – завышение модельных базовых концентраций, голубая – занижение модельных концентраций по базовой конфигурации. Эпизод НМУ 6–8 сентября 2024 г., Москва.

Fig. 7. Measured and model concentrations of NO_2 CHIMERE-2023: baseline, with a 10% increase in emissions from transport sources (experiment 1) and all anthropogenic sources (experiment 2). Pink fill – overestimation of model baseline concentrations, blue – underestimation of model concentrations according to the baseline configuration. AMC (adverse meteorological conditions) episode of September 6-8, 2024, Moscow.

Другим инструментом влияния на качество моделирования является коррекция внутрисуточного распределения эмиссий. В XTM CHIMERE-2023 используется показанное на рис. 8а почасовое распределение эмиссий с помощью коэффициента распределения (K_{cx}). Суточный ход K_{cx} в XTM CHIMERE хорошо согласуется с одномодальным суточным ходом модельных концентраций загрязнений при отсутствии выраженных максимумов утром и вечером, характерных для наблюдаемого загрязнения в мегаполисе. Результаты пяти вариантов коррекции базового распределения K_{cx} (рис. 8а) иллюстрируются на рис. 8б на примере расчетов концентраций NO_2 для одной АСКЗА городского типа.

Коррекция K_{cx} (1) и K_{cx} (2) проводилась только для транспортных источников (эксперименты 3, 4). В эксперименте 5 K_{cx} (2) применен для эмиссий всех источников. Установлено, что во всех трех экспериментах средняя суточная концентрация NO_2 немного уменьшилась, а в суточном ходе появились выраженные утренний и вечерний максимумы (рис. 8б). При этом в утренние часы концентрации по сравнению с базовыми понизились на 15–30 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, а в вечерние часы увеличились на 30–50 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Применение коррекции K_{cx} (2) ко всем источникам выбросов (эксперимент 5) привело к еще большему завышению вечернего максимума и резкому занижению NO_2 в околополуденное время.

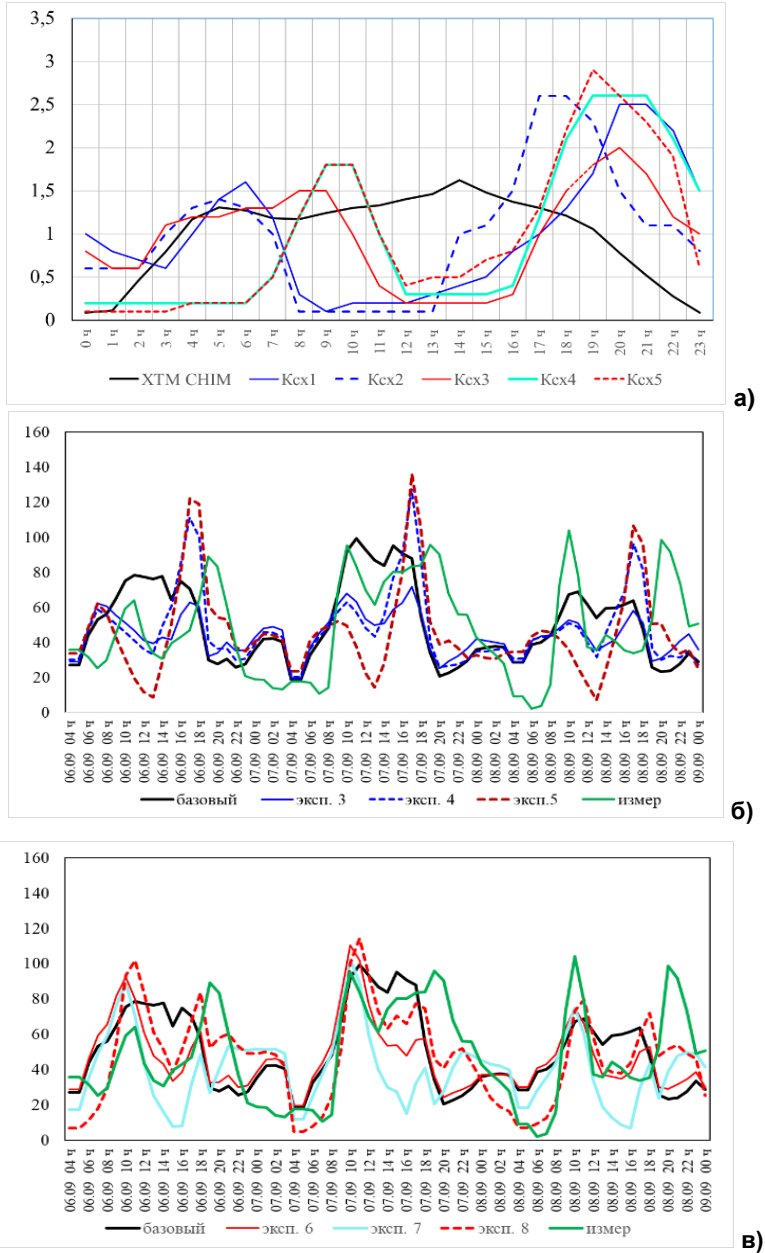


Рис. 8. Почасовые коэффициенты распределения эмиссий загрязняющих веществ: базовые (XTM CHIM) и экспериментальные K_{cx} (а); измеренные и модельные концентрации NO_2 по расчетам XTM CHIMERE-2023 с применением коррекции K_{cx} (б, в).

Fig. 8. Hourly distribution coefficients of pollutant emissions: baseline (CHIM) and experimental K_{cx} (a); measured and model NO_2 concentrations according to CHIMERE-2023 CHIM calculations using K_{cx} correction (б, в).

Таким образом, преобразованные K_{cx} (1) и K_{cx} (2) влияют на изменение формы суточного хода модельных расчетов, но по сравнению с измерениями приводят к заниженным утренним и завышенным вечерним концентрациям NO_2 .

Для усиления утреннего максимума, ослабления вечернего максимума и смещения его на более позднее время выполнены расчеты с применением K_{cx} (3–5). Оказалось, что наилучшее согласие с измеренными концентрациями дает применение K_{cx} (3) и K_{cx} (5), а K_{cx} (4) обеспечивает сильное уменьшение послеполуденных концентраций, что видно по динамике концентраций NO_2 на рис. 8в.

Полученный в серии экспериментальных расчетов наибольший положительный эффект в период НМУ зафиксирован при замене базовых K_{cx} на скорректированные коэффициенты внутрисуточного распределения эмиссий K_{cx} (5): модельная средняя за сутки концентрация NO_2 совпала с измеренной величиной, форма суточного хода NO_2 оказалась близкой к наблюдаемому ходу при небольшом завышении утреннего максимума и занижении вечернего. Безусловно, для применения результатов на практике необходимо на репрезентативном ряде в широком диапазоне метеорологических условий провести сравнительные оценки других загрязняющих веществ (CO , PM_{10}), обсуждение которых в условиях ограничений объема статьи здесь не предлагается.

За месячный период 1–30 сентября 2024 г. были выполнены модельные расчеты концентраций загрязняющих веществ по регионально адаптированной конфигурации CHIMERE-2023 (Chim-P) с увеличением на 10 % эмиссий оксидов азота и с измененным суточным распределением эмиссий и в базовой конфигурации CHIMERE-2023 (Chim). Оценивались прогнозы O_3 , NO_2 и PM_{10} на первые и вторые сутки с использованием измерений концентраций загрязняющих веществ на АСКЗА Москвы.

Ориентируясь на гигиенический норматив – максимальную за сутки концентрацию O_3 , оценивались прогнозы суточного максимума O_3 (O_{3max}) для станций жилого типа. Оказалось, что при средней за месяц O_{3max} по наблюдениям на АСКЗА 35–43 $мкг \cdot м^{-3}$ систематическая ошибка прогнозов O_{3max} составила -5 и -7 $мкг \cdot м^{-3}$ (на первые и вторые сутки соответственно). Незначительно отличаются и другие характеристики прогнозов на первые и вторые сутки: средняя абсолютная ошибка на отдельных АСКЗА находится в диапазоне 16–25 $мкг \cdot м^{-3}$, среднеквадратическая ошибка (RMSE) немного больше 19–33 $мкг \cdot м^{-3}$. Следует отметить, что из-за аномально теплой и сухой погоды в Москве наблюдавшиеся уровни O_{3max} в сентябре 2024 г. были выше многолетних величин на 15–18 % [4] с соответствующими увеличенными межсуточными колебаниями приземного озона.

При интерпретации результатов экспериментального тестирования твердых взвешенных частиц PM_{10} также необходимо принимать во внимание, что из-за преобладающего в течение месяца поступления в Москву насыщенных пылевыми частицами воздушных масс уровень PM_{10}

по наблюдениям на АСКЗА оказался в 1,4–1,8 раз выше многолетних значений [5]: на АСКЗА городского типа средняя за месяц концентрация PM_{10} оказалась в диапазоне 30–46 $мкг \cdot м^{-3}$. Адвекция PM_{10} осуществлялась из охваченных засухой приволжских и южных районов ЕТР, а в конце сентября зафиксирован эпизод повышения PM_{10} из-за дальнего переноса частиц из районов пыльных бурь Прикаспия и Нижней Волги. Заметим, что средняя месячная величина PM_{10} на АСКЗА городского типа в предшествующем августе 2024 г. составила 25 $мкг \cdot м^{-3}$, такой же является осредненная за 15 лет (2005–2020 гг.) концентрация PM_{10} в сентябре – около 25 $мкг \cdot м^{-3}$ [5]. Таким образом, можно говорить, что в сентябре 2024 г. вклад адвективного аэрозоля в загрязнение PM_{10} воздуха в Москве сравним с величиной фона, который и воспроизводился CHIMERE-2023. При этом результаты счета Chim-P и на первые, и на вторые сутки оказались ближе к измерениям, чем расчеты Chim, но указывали на значительную недооценку моделью концентраций PM_{10} даже с учетом погрешности измерений (15–20 %). И необходимо подчеркнуть, что эффективность выполненной коррекции возростала в периоды НМУ, когда фиксировался наибольший рост концентраций PM_{10} .

Похожий результат получен и при проверке расчетов средней суточной концентрации NO_2 в конфигурациях Chim и Chim-P, принимая во внимание, что в сентябре 2024 г. средняя за месяц концентрация NO_2 на станциях городского типа была примерно в 1,5 раза больше средней многолетней величины, примерно равной 30 $мкг \cdot м^{-3}$ [5]. ХТМ CHIMERE-2023 значительно занижала в прогнозах концентрацию NO_2 , что следует расценивать не только как неспособность ХТМ отражать аномальный уровень загрязнения, но и как необходимость последовательной региональной коррекции эмиссий NO_x .

В заключение следует признать, что несмотря на аномальность периода месячной проверки (сентябрь 2024 г.) экспериментальное тестирование обновленной ХТМ позволило обозначить ключевые направления последующей региональной адаптации CHIMERE-2023 с применением отлаженных механизмов регулирования сезонных и внутрисуточных эмиссий загрязняющих веществ в различных отраслевых секторах.

Заключение

На вычислительной платформе CRAY Росгидромета актуализирована одна из последних версий химической транспортной модели CHIMERE-2023 с обновленным интерфейсом. С учетом того, что ХТМ CHIMERE-2023 разрабатывалась и настраивалась в первую очередь для использования в странах Евросоюза, установка обновленной версии сопровождалась серией численных экспериментов по оптимизации расчетов для московского региона, региональным подбором параметров сезонного и суточного распределения эмиссий используемого кадастра ЕМЕП-2021. Результаты экспериментального тестирования обновленной технологии указывают

в целом на удовлетворительное качество прогнозирования приоритетных загрязняющих веществ и указывают на целесообразность исследований и работ по региональной адаптации технологии прогнозирования с соответствующей проверкой на репрезентативных рядах моделирования и наблюдений в разные сезоны.

Список литературы

1. Борисов Д.В., Кузнецова И.Н. Интегрирование химической транспортной модели и искусственной нейронной сети для прогноза концентрации PM_{10} // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 3 (393). С. 42-63. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-41-62>.

2. Борисов Д.В., Кузнецова И.Н. Постпроцессинг численных прогнозов концентраций приземного озона с использованием машинного обучения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 4 (390). С. 86-104. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-86-104>.

3. Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 31-40. DOI: [10.3103/S1068373917090047](https://doi.org/10.3103/S1068373917090047).

4. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2024 г. // Метеорология и гидрология. 2025. № 3. С. 136-141. DOI: [10.52002/0130-2906-2025-1-136-141](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-1-136-141).

5. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Известия РАН. ФАО. 2022. Т. 58, № 1. С. 92-108. DOI: [10.31857/s0002351522010023](https://doi.org/10.31857/s0002351522010023)

6. 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/10.37162/2618-9631-2022-4-147-170>.

7. 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. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2019-4-203-218>.

8. Официальный сайт CEIP (Centre on Emission Inventories and Projections, Центр кадастров и прогнозов выбросов). Режим доступа: URL: <https://www.ceip.at/the-emep-grid/grid-ded-emissions>.

9. 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.

10. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Багров А.Н., Блинов Д.В. и др. Конфигурация COSMO-Ru2Bu модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов и γ -мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 6-34. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>

11. Chubarova N.E., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Varentsov M.I., Rivin G.S. Urban aerosol, its radiative and temperature response in comparison with urban canopy effects in megacity based on COSMO-ART modeling // Urban Climate. 2024. Vol. 53. С. 101762. DOI: [10.1016/j.uclim.2023.101762](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101762).

12. Bessagnet B., Bossiol E., Cholakian A., Vivanco M.G. et al. Impact of air quality model settings for the evaluation of emission reduction strategies to curb air pollution // *Environ. Res.* 2024. Vol. 255. P. 119112. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119112.

13. Bessagnet B., Cuvelier K., de Meij A., Monteiro A. et al. Assessment of the sensitivity of model responses to urban emission changes in support of emission reduction strategies // *Air Quality, Atmosphere and Health.* 2024. Vol. 17, is. 4. P. 681-706.

14. Lee P., Tong D. et al. World Meteorological Organization, Training Materials and Best Practices for Chemical Weather /Air Quality Forecasting (ETR-26). Geneva: WMO, 2020. 1152 p. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10439.

15. Mailler S., Pennel R., Menut L., Lachatre M. Using an antidiffusive transport scheme in the vertical direction: a promising novelty for chemistry-transport models // *Geosci. Model Dev.* 2021. Vol. 14. P. 2221-2233. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2221-2021>.

16. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M. et al. CHIMERE 2013: A model for regional atmospheric composition modelling // *Geosci. Model Dev.* 2013. Vol. 6, is.4. P. 981-1028.

17. Menut L., Cholakian A., Pennel R., Siour G. et al. The CHIMERE chemistry-transport model v2023r1 // *Geosci. Model Dev.* 2024. Vol. 17. P. 5431-5457. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024>.

18. Menut L., Goussebaile A., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. Impact of realistic hourly emissions profiles on air pollutants concentrations modelled with CHIMERE // *Atmospheric Environment.* 2012. Vol. 49. P. 233-244.

19. Valari M., Menut L. Transferring the heterogeneity of surface emissions to variability in pollutant concentrations over urban areas through a chemistry-transport model // *Atmospheric Environment.* 2010. Vol. 44, is. 27. P. 3229-3238. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.001>.

References

1. Borisov D.V., Kuznetsova I.N. Integration of a chemical transport model and an artificial neural network for PM10 concentration forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 393, no. 3, pp. 42-63. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-3-41-62 [in Russ.].

2. Borisov D.V., Kuznetsova I.N. Post-processing of ground-level ozone numerical forecasts using machine learning. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 390, no. 4, pp. 86-104. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-4-86-104 [in Russ.].

3. Vil'fand, R.M., Kirsanov, A.A., Revokatova, A.P., Rivin G.S., Surkova G.V. Forecasting the transport and transformation of atmospheric pollutants with the COSMO-ART model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 5, pp. 292-298. DOI: 10.3103/S106837391705003X.

4. Ivanova N.S., Kuznetsova I.N., Lezina E.A. Soderzhanie ozona nad territoriyey Rossiyskoy Federacii v 2024 g. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2025, no. 3, pp. 136-141. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-1-136-141 [in Russ.].

5. Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Zakharova P.V., Kachko M.D., Poliakov T.I. Spatiotemporal Variations in the Content of Pollutants in the Moscow Air Basin and Their Emissions. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2022, vol. 58, pp. 80-94. DOI: 10.1134/S00014338220100296.

6. 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, no. 4, pp. 147-170. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-147-170 [in Russ.].

7. 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, no. 4, pp. 203-218. DOI: 10.37162/2618-9631-2019-4-203-218 [in Russ.].

8. CEIP (Centre on Emission Inventories and Projections). Available at: <https://www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions>.

9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Samsonov T.E., Repina I.A. 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, no. 7, pp. 455-465. DOI: 10.3103/S1068373920070018.

10. 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. The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of B- and y-mesoscale processes. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 388, no. 2, pp. 6-34. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-2-6-34 [in Russ.].

11. Chubarova N.E., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Varentsov M.I., Rivin G.S. Urban aerosol, its radiative and temperature response in comparison with urban canopy effects in megacity based on COSMO-ART modeling. *Urban Climate*, 2024, vol. 53, pp. 101762. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101762.

12. Bessagnet B., Bossiol E., Cholakian A., Vivanco M.G. et al. Impact of air quality model settings for the evaluation of emission reduction strategies to curb air pollution. *Environ. Res.*, 2024, vol. 255, pp. 119112. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119112.

13. Bessagnet B., Cuvelier K., de Meij A., Monteiro A. et al. Assessment of the sensitivity of model responses to urban emission changes in support of emission reduction strategies. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 681-706.

14. Lee P., Tong D. et al. World Meteorological Organization, Training Materials and Best Practices for Chemical Weather /Air Quality Forecasting (ETR-26). Geneva: WMO, 2020, 1152 p. Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10439.

15. Mailler S., Pennel R., Menut L., Lachatre M. Using an antidiffusive transport scheme in the vertical direction: a promising novelty for chemistry-transport models. *Geosci. Model Dev.*, 2021, vol. 14, pp. 2221-2233. DOI: 10.5194/gmd-14-2221-2021.

16. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M. et al. CHIMERE 2013: A model for regional atmospheric composition modeling. *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 981-1028.

17. Menut L., Cholakian A., Pennel R., Siour G. et al. The CHIMERE chemistry-transport model v2023r1. *Geosci. Model Dev.*, 2024, vol. 17, pp. 5431-5457. DOI: doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024

18. Menut L., Goussebaile A., Bessagnet B., Khvorostyanov D. et al. Impact of realistic hourly emissions profiles on air pollutants concentrations modelled with CHIMERE. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 49, pp. 233-244.

19. Valari M., Menut L. Transferring the heterogeneity of surface emissions to variability in pollutant concentrations over urban areas through a chemistry-transport model. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, no. 27, pp. 3229-3238. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.001.

Поступила 20.02.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 20.02.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-85-104>

УДК 551.578.467

Исследование состава снежного покрова в различных геоморфологических зонах Кавказского региона

Э.А. Агоева^{1,2}, Л.С. Ламашвили^{1,2}, Р.М. Кумыков³

¹*Кабардино-Балкарский Государственный высокогорный заповедник, п. Капхатау, Россия;*

²*Кабардино-Балкарский Государственный университет имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия;*

³*Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Коква, г. Нальчик, Россия
eleonora_agoeva@mail.ru*

Проведены исследования химического состава снежного покрова в различных геоморфологических зонах Кабардино-Балкарской Республики фонового и импактного воздействия. Проведён анализ пространственного распределения концентраций компонентов и сравнение полученных данных с нормативно-техническими документами, регламентирующими гигиенические требования. Исследования показали, что снежный покров в соответствии с классификацией Алёкина О.А. можно отнести к следующему типу: гидрокарбонатно-натриевому I типа, гидрокарбонатно-кальциевому и гидрокарбонатно-аммониевому. Общая жёсткость характеризует талые снежные воды как мягкие. Агрохимические расчётные показатели – коэффициент адсорбции натрия (SAR) и ирригационный коэффициент Стеблера – характеризуют пробы как имеющие низкую опасность для осолонцевания почв и хорошие для применения в орошении. Выявлено, что высокогорная и горная территории являются фоновыми, так как для них определяющим фактором в формировании состава снежного покрова является дальний и региональный перенос растворимых форм компонентов. Преобладающее влияние на химизм снежного покрова фоновых высокогорных и горных территорий оказывает трансграничный перенос морских солей через Главный Кавказский хребет. Химизм снежного покрова равнинных зон Кабардино-Балкарской Республики связан с локальным загрязнением в основном малорастворимыми соединениями.

Ключевые слова: Кавказ, Верхне-Балкарское и Черекское ущелья, снежный покров, химический состав, геоморфологические зоны

Studying the composition of the snow cover in different geomorphological zones in the Caucasus region

E.A. Agoeva^{1,2}, L.S. Lamashvili^{1,2}, R.M. Kumykov³

¹*Kabardino-Balkar State Alpine Reserve, Kashkhatau, Russia;*

²*Kabardino-Balkarian State University named
after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia;*

³*Kabardino-Balkarian State Agrarian University named
after V.M. Kokov, Nalchik, Russia
eleonora_agoeva@mail.ru*

The composition of the snow cover in different geomorphological zones of the Kabardino-Balkarian Republic (KBR) characterized as zones of background and impact effects is studied. The spatial distribution of component concentrations was analyzed, and the resulting data were compared with regulatory and technical documents regulating hygienic requirements. The studies showed that the snow cover in accordance with the classification of O.A. Alekin belongs to the following types: sodium bicarbonate type I, calcium bicarbonate, and ammonium bicarbonate. The total hardness characterizes the snowmelt water as soft. The agrochemical calculated parameters – the sodium adsorption coefficient (SAR) and the Stebler irrigation coefficient – characterized the samples as the ones having a low risk of soil salinization and good for irrigation applications. It was revealed that the high-altitude and mountainous territories are background ones, for which the determining factor in the formation of the snow cover composition is the long-range and regional transfer of soluble forms of components. The predominant influence on the snow cover chemistry in the background high-altitude and mountainous territories is exerted by the transboundary transport of sea salts through the Main Caucasian Ridge. The chemistry of the snow cover of the lowland zones of the KBR is associated with local pollution, mainly with poorly soluble compounds.

Keywords: Caucasus, Upper Balkar and Cherek gorges, snow cover, chemical composition, geomorphological zones

Введение

Лёд и снег – это величайшие творения природы, покрывающие ежегодно 1/4 поверхности Земли. В России 80 % необъятных её просторов покрыто снегом в течение 5–10 месяцев в году.

Снег – форма атмосферных осадков, состоящая из мелких кристаллов льда. Это решающий погодный фактор, оказывающий влияние на все отрасли человеческой деятельности, особенно в районах сурового климата. При этом снежный покров можно рассматривать и как часть нивально-гляциальной системы, т. е. как определённое звено в цепи круговорота воды.

Сезонный снежный покров является геологической средой, формирующейся в различных регионах Земли. При формировании снежного покрова в результате протекания адсорбционных процессов происходит очистка атмосферного воздуха, при этом снег является индикатором экологического состояния региона [16, 18, 24].

Для правильной интерпретации данных о химическом составе снежного покрова необходимо знать содержание определяемых компонентов в местах, не испытывающих прямого воздействия антропогенных факторов, т. е. в высокогорной и горной зонах. В связи с этим целью проводимых исследований стало изучение органолептических, химических и радиологических показателей в различных геоморфологических зонах Кабардино-Балкарской Республики (КБР) фонового (1–2 пункта отбора) и импактного (3–5 пунктов отбора) воздействия. Также рассмотрено пространственное распределение концентраций и проведено сравнение полученных данных с нормативно-техническими документами, регламентирующими гигиенические требования.

Объектом исследований стал снежный покров Верхне-Балкарского ущелья, Черекского и Урванского районов (рис. 1, табл. 1).

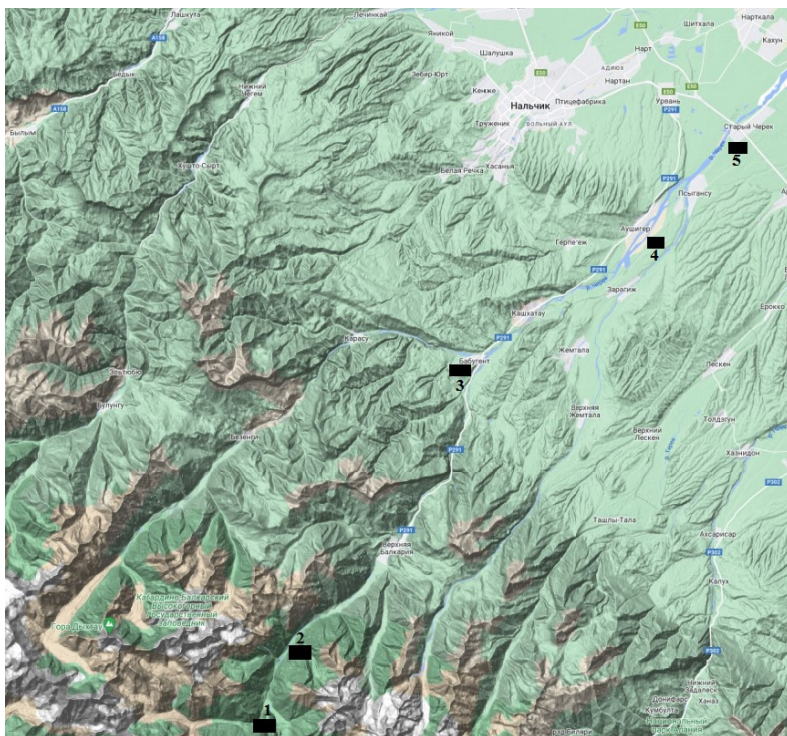


Рис. 1. Карта-схема пунктов отбора проб снежного покрова:

- 1 – Ущелье Верхняя Балкария – “Уштулу”;
 2 – Ущелье Верхняя Балкария – кордон; 3 – Черекский район, с. Бабугент;
 4 – Черекский район, с. Аушигер; 5 – Урванский район, с. Старый Черек.

Fig. 1. Map diagram of snow cover sampling points.

- 1 – Upper Balkaria Gorge – “Ushtulu”; 2 – Upper Balkaria Gorge – cordon;
 3 – Cherek district, Babugent village; 4 – Cherek district, village of Aushiger;
 5 – Urvan district, Stary Cherek village.

Табл. 1. Характеристики пунктов отбора проб снежного покрова

Table 1. Characteristics of snow cover sampling points

№ зоны	Пункт отбора проб	Геоморфологическая зона	Координаты по GPS	Высота над уровнем моря, м
1.	Ущелье Верхняя Балкария – “Уштулу”	Высокогорье	42°59'02" с. ш. 43°19'37" в. д.	1850
2.	Ущелье Верхняя Балкария – кордон	Горная зона	42°80'60" с. ш. 43°21'50" в. д.	1504
3.	Черекский район, с. Бабугент	Предгорье	43°16'45" с. ш. 43°33'00" в. д.	768
4.	Черекский район, с. Аушигер	Равнина	43°23'45" с. ш. 43°43'54" в. д.	566
5.	Урванский район, с. Старый Черек	Равнина	43°28'17" с. ш. 43°50'48" в. д.	384

Как показано в [9], пространственное распределение загрязняющих веществ в снежном покрове удобно характеризовать тремя картами: распределения концентрации загрязняющих веществ (мг/дм^3); количества загрязняющих веществ, выпавших за время от образования снежного покрова до момента накопления максимума влагозапаса в снеге, так называемой поверхностной плотности (т/км^2); интенсивности выпадения загрязняющих веществ, т. е. плотности солей ($\text{кг/км}^2 \cdot \text{сут}$).

В связи с этим в задачи исследования снежного покрова входило:

- 1) определение пунктов отбора проб и наглядное их отображение на карта-схеме в программе Аксиома 5;
- 2) определение координатной привязки пунктов отбора с помощью GPS;
- 3) отбор проб и изучение состава снежного покрова из разных геоморфологических зон КБР;
- 4) выявление критериев оценки степени загрязнения по показателям, регламентированным в нормативно-технических документах;
- 5) изучение качественного состава для определения дальнейшей программы исследований с целью обнаружения изменений долгосрочного характера;
- 6) определение качества талых снежных вод с точки зрения агрохимии и воздействия на поверхностный слой Земли.

Научная новизна

Впервые для высокогорной, предгорной, горной и равнинной территорий КБР, а именно Верхне-Балкарского ущелья, Черекского и Урванского районов проведена оценка экологического состояния снежного покрова по органолептическим, химическим и радиометрическим показателям. Ранее результаты проведённых исследований не были опубликованы.

Особо чувствительными ландшафтами, реагирующими на изменения в биосфере в целом, являются высокогорья Кавказа, которые ввиду своей труднодоступности остаются малоизученными [30]. В связи с этим данные исследования актуальны и могут быть использованы в целях получения оценок социально-гигиенического и экологического мониторинга количества токсикантов, выносимых снежным покровом в поверхностные водоёмы и мигрирующих в почву и подземные воды.

Методология и методы анализа

Ввиду того, что ПДК для токсикантов снежного покрова не регламентированы, оценку качества проб проводили по обоснованным нормативам в воде для рыбохозяйственных водоёмов [22], а также для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [12, 27, 28]. Данный подход оправдан тем, что талые снежные воды поступают в период весеннего половодья в высокогорные реки и далее питают по ходу своего

течения равнину западной части КБР. Таким образом, исследования состава снежного покрова включали следующие этапы: отбор проб, поддержание условий их хранения и проведение химического анализа. Гигиенические требования к качеству образцов устанавливались в соответствии с существующими нормативно-техническими документами.

Для более детального и наглядного представления данных о составе снежного покрова нами проведены углублённые исследования, позволяющие рассмотреть его химизм с точки зрения эколого-токсикологического анализа. В соответствие с этим были проведены следующие расчеты:

- плотность солей в снежном покрове (P мг/м²·час);
- среднее поступление компонентов на подстилающую поверхность (P_n г/м²).

- коэффициент концентрации компонента (K_c). Данный параметр рассчитывается как отношение реального (аномального) содержания загрязнителя в природном объекте к его фоновому уровню в аналогичном объекте;

- общая нагрузка, создаваемая поступлением каждого компонента в окружающую среду ($P_{\text{общ}}$ мг/км²). Используется при определении поступления конкретных химических элементов в ландшафты воздушным путем;

- коэффициент относительного увеличения общей нагрузки компонента (K_p);

- коэффициент опасности исследуемых веществ (K_o), определяется отношением фактического уровня содержания контролируемого вещества в покровных снежных отложениях к его предельно допустимой концентрации (ПДК);

- сумма коэффициентов опасности исследуемых веществ ($\sum K_o$).

Данный параметр очень важен с точки зрения агрохимии, так как позволяет оценить поступление компонентов с талыми водами в водоёмы и степень опасности таких вод [5, 8, 29];

- суммарный показатель нагрузки компонентов на территорию Z_p .

В период снеготаяния находящиеся в снеге катионы и анионы мигрируют в поверхностные и подземные воды, донные осадки, почвы и подстилающие их горные породы, причём ареал их распространения значительно превышает контуры геохимических аномалий в снежном покрове. Поэтому исследовано качество талых снежных вод с точки зрения агрохимии и их воздействия на поверхностный слой Земли.

Определён ирригационный коэффициент Стеблера по формуле:

$$K_a = 288 / (10rNa^+ - 5rCl^- - 9rSO_4^{2-}), \quad (1)$$

где rNa^+ , rCl^- , rSO_4^{2-} – концентрация ионов, мг-экв/дм³.

Коэффициент адсорбции натрия (SAR), показатель пригодности воды для использования в сельскохозяйственном орошении, определяется

по концентрациям основных щелочных и щелочноземельных катионов, присутствующих в воде по формуле:

$$SAR=rNa^+ / \sqrt{0,5 \cdot (rCa^{2+}+rMg^{2+})}, \quad (2)$$

где rNa^+ , rCa^{2+} , rMg^{2+} – концентрация катионов, мг·экв/дм³ [26, 32].

Особое внимание было уделено процессу отбора пробы снежного покрова. Отбор проб проводился в 1-й декаде января 2024 года на открытых, визуально ровных площадках. В каждой геоморфологической зоне отбирались по три объединённых пробы снега конвертным методом. Пробы снега отбирали вдали от препятствий, создающих ветровую тень, лесных насаждений, а также от автомобильных и железных дорог для исключения возможного локального загрязнения. Отбор проб проводили на участках размером 1×1 м на всю глубину залегания снежного покрова пластиковой трубой с внутренним диаметром 5,50 см и площадью сечения 24 см². При этом отслеживалось, чтобы нижняя часть керна не была загрязнена частицами почвы [15, 25].

В соответствии с определяемым перечнем основных ионов, принятым для сети Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО, в пробах снежного покрова были измерены концентрации основных ионов: сульфатов, хлоридов, нитратов, гидрокарбонатов, аммония, натрия, калия, кальция, магния, фосфатов (в форме растворенных ортофосфатов), фторидов, бария, лития, стронция. Определена удельная электропроводность (УЭП), общая минерализация в пересчёте на концентрацию хлоридов натрия и калия, а также гидроксида натрия. Определена расчётная величина минерализации, общая жёсткость, щёлочность свободная и общая, величина pH. Кроме того, произведено определение плотности потока гамма-частиц, удельной суммарной альфа и бета-активности [15, 31].

Для анализа проб снежного покрова применены следующие методы:

- 1) потенциметрический на приборе Эксперт-001.3.01 [19];
- 2) титриметрический на приборе титратор АТП-02 [13-14];
- 3) кондуктометрический на приборе кондуктометр Эксперт-002;
- 4) радиометрический на приборе дозиметр-радиометр МКС-03СА;
- 5) капиллярный электрофорез на приборе Капель-105М [20, 21].

Ранее проведённые гидрометеорологические исследования показали, что климат Черекского и Верхне-Балкарского ущелий по колебанию температур приземного слоя атмосферы, уровню осадков и направлению ветров относится к умеренному субтропическому климатическому поясу и является переменнно-влажным, с большим количеством тёплых дней, даже в зимние месяцы. Средняя температура приземного слоя атмосферы сохраняется часто выше нуля, годовое суммарное выпадение осадков составляет 750 мм, а преобладающее направление ветра для данной местности – северо-восточное, юго-западное и южное [1–3, 6, 7]. Как показали исследования, в январе 2024 года выпало 262 мм осадков, а среднемесячная температура приземного слоя воздуха составила +3,4 °С.

Результаты анализов и их обсуждение

Как видно из представленных данных, наблюдается пространственное увеличение количества и содержания некоторых выявленных параметров, что указывает на увеличение антропогенной нагрузки по мере перехода из высокогорной фоновой геоморфологической зоны в равнинную антропогенную (рис. 2). На повышение нагрузки указывает также пространственное увеличение плотности солей в снежном покрове от 4,5 до 12,0 мг/м²·час (табл. 2, 3).

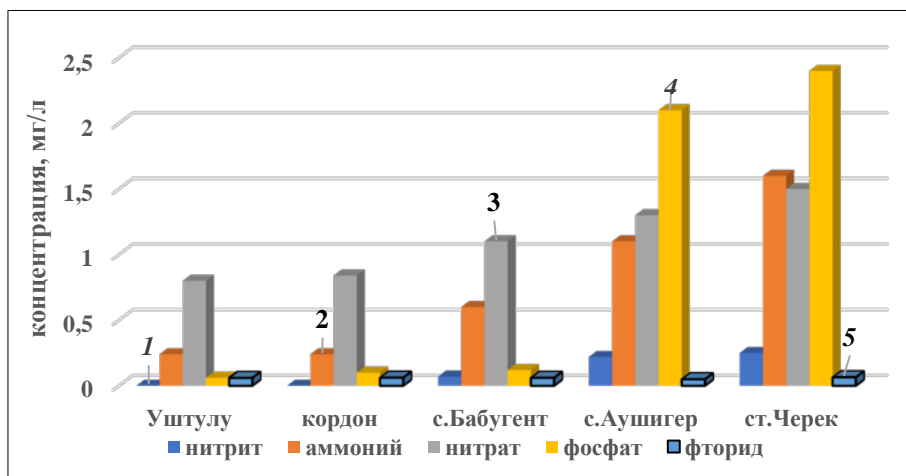


Рис. 2. Концентрация биогенных веществ в снежном покрове: 1 – нитрит ион; 2 - аммоний ион; 3 – нитрат ион; 4 – фосфат ион; 5 – фторид ион.

Fig. 2. Concentration of nutrients in the snow cover: 1 – nitrite ion; 2 ammonium ion; 3 – nitrate ion; 4 – phosphate ion; 5 – fluoride ion.

Результаты исследований показали, что интегральными параметрами химического состава исследуемых талых снежных вод являются УЭП, расчётная величина минерализации (суммарное содержание всех макрокомпонентов) и значение водородного показателя (pH), которые тесно взаимосвязаны и подвергаются постоянному влиянию других, не измеренных компонентов почвы, воздуха и аэрозолей.

Известно, что снежный покров имеет слабокислую реакцию pH, на величину которой оказывает влияние CO₂, так как от его содержания зависит концентрация водорода в воде. Таким образом, при прочих равных условиях, чем выше содержание CO₂, тем больше концентрация ионов водорода и тем ниже значение pH. В то же время с увеличением концентрации гидрокарбонат-иона происходит смещение pH в сторону щелочной реакции, обусловленное появлением ионов OH⁻ [23].

С точки зрения токсичности для экосистем показательна величина pH осадков. Известно [17], что существует степень воздействия кислотности водной среды на рыб, растения и микроорганизмы, на их размножение

и развитие. Так, при $pH=3,0-3,5$ и ниже погибают практически все виды рыб, выживают некоторые виды растений и беспозвоночные; при величине $pH=4,0-5,0$ задерживается развитие икры и некоторых видов рыб с последующей их гибелью.

Табл. 2. Соотношение суммы концентраций катионов и анионов в снежном покрове

Table 2. The ratio of the sum of the concentrations of cations and anions in the snow cover

№ зоны	Соотношение суммы концентраций катионов (К) и анионов (А)	Средняя концентрация, мг/л
1	$K=[Na^+]+[K^+]+[Ca^{2+}]+[NH_4^+]+[Ba^{2+}]+[Li^+]$	1,11
	$A=[HCO_3^-]+[NO_3^-]+[SO_4^{2-}]+[Cl^-]+[PO_4^{3-}]+[F^-]$	1,67
	K<A $[HCO_3^-]>[Na^+]>[K^+]>[Ca^{2+}]>[NO_3^-]>[SO_4^{2-}]>[NH_4^+]+[Cl^-]>[Ba^{2+}]>[PO_4^{3-}]>[F^-]>[Li^+]$ Плотность солей в снежном покрове – 4,5 мг/м²*час	
2	$K=[Na^+]+[Ba^{2+}]+[K^+]+[NH_4^+]+[Li^+]$	1,67
	$A=[HCO_3^-]+[Cl^-]+[SO_4^{2-}]+[PO_4^{3-}]+[NO_3^-]+[F^-]$	1,66
	K>A $[Na^+]>[HCO_3^-]>[Ba^{2+}]>[Cl^-]>[SO_4^{2-}]>[NO_3^-]>[K^+]>[NH_4^+]>[Li^+]>[PO_4^{3-}]>[F^-]$ Плотность солей в снежном покрове – 5,0 мг/м²*час	
3	$K=[Na^+]+[Ca^{2+}]+[K^+]+[NH_4^+]+[Mg^{2+}]$	1,5
	$A=[HCO_3^-]+[Cl^-]+[NO_3^-]+[SO_4^{2-}]+[PO_4^{3-}]+[NO_2^-]+[F^-]$	1,8
	K<A $[HCO_3^-]>[Na^+]>[Ca^{2+}]>[Cl^-]>[NO_3^-]>[SO_4^{2-}]>[K^+]+[NH_4^+]>[Mg^{2+}]>[PO_4^{3-}]>[NO_2^-]>[F^-]$ Плотность солей в снежном покрове – 6,1 мг/м²*час	
4	$K=[Ca^{2+}]+[NH_4^+]+[Mg^{2+}]+[Na^+]+[K^+]$	2,0
	$A=[HCO_3^-]+[NO_3^-]+[SO_4^{2-}]+[PO_4^{3-}]+[Cl^-]+[F^-]$	2,4
	K<A $[HCO_3^-]>[Ca^{2+}]>[NH_4^+]>[NO_3^-]>[Mg^{2+}]>[SO_4^{2-}]>[PO_4^{3-}]>[Na^+]>[Cl^-]>[K^+]>[F^-]$ Плотность солей в снежном покрове – 9,7 мг/м²*час	
5	$K=[NH_4^+]+[Ca^{2+}]+[Mg^{2+}]+[Na^+]+[K^+]$	2,3
	$A=[HCO_3^-]+[NO_3^-]+[SO_4^{2-}]+[Cl^-]+[PO_4^{3-}]+[NO_2^-]+[F^-]$	2,6
	K<A $[HCO_3^-]>[NH_4^+]>[Ca^{2+}]>[NO_3^-]>[SO_4^{2-}]>[Mg^{2+}]>[Cl^-]>[PO_4^{3-}]>[Na^+]>[K^+]>[NO_2^-]>[F^-]$ Плотность солей в снежном покрове – 12,0 мг/м²*час	

При этом величина pH сохраняется в течение 5–10 суток, а остатки нитритов могут сохраняться в объектах экосистем около месяца.

Характер распределения значений pH талой снежной воды показал, что оно находится в диапазоне 4,6–6,6 ед. pH , среднее же значение pH составило 5,4 ед. Также наблюдается смещение pH в сторону наибольших

значений с севера на юг КБР, т. е. с высокогорной в равнинные зоны. Выявлено, что с повышением величины минерализации ионов и УЭП, значение pH осадков также возрастает. Результаты исследований показали, что талая снежная вода в высокогорной и горной фоновых зонах (пункты 1 и 2) характеризуется слабокислой реакцией (рис. 3).

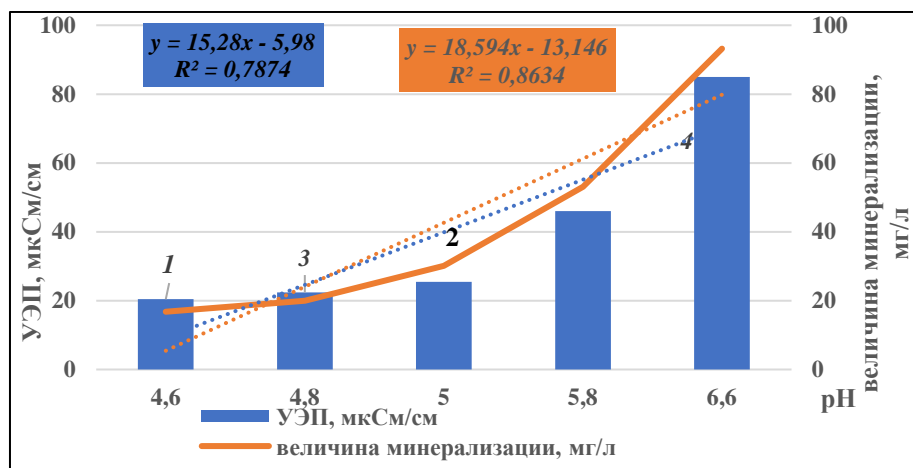


Рис. 3 Соотношение между pH, УЭП и величиной минерализации талой снежной воды: 1 – УЭП, мкСм/см; 2 – величина минерализации, мг/л; 3 – линия тренда величины минерализации (оранжевая); 4 – линия тренда УЭП (синяя).

Fig. 3. The ratio between pH, UEP and the amount of mineralization of snowmelt water: 1 – UEP, MSM/cm; 2 – mineralization value, mg/l; 3 – mineralization value trend line (orange); 4 – UEP trend line (blue).

Известно, что значение общей минерализации в значительной степени зависит от физико-географических условий, количества выпадающих осадков, ветрового режима и т. д. В работе Н.Ф. Глазовского [10, 11] отмечено, что повышенная степень минерализации атмосферных осадков в горной местности обусловлена естественным геохимическим накоплением в результате конденсации, а также, как в нашем случае, в результате трансграничного переноса морских солей через Главный Кавказский хребет.

Хотя минерализация и УЭП характеризуют суммарное загрязнение осадков, их непосредственное влияние на токсичность осадков невелика. С другой стороны, следует отметить, что эти величины служат удобным показателем возможного количества в осадках отдельных ингредиентов.

Так, в пределах исследуемых зон – высокогорной, горной, предгорной и равнинной – определено, что УЭП повышается от высокогорной к равнинной зоне (в мкСм/см): 20,4 (1 пункт отбора); 22,4 (2 пункт отбора); 25,5 (3 пункт отбора); 46,0 (4 пункт отбора); 85,0 (5 пункт отбора), т. е. выявлено пространственное увеличение содержания компонентов в 4,2 раза.

Общая минерализация, определённая кондуктометрическим методом, в пересчёте на концентрацию хлорида натрия ($15,9 \rightarrow 17,7 \rightarrow 18,0 \rightarrow 22,0 \rightarrow 26,0$) и хлорида калия ($17,1 \rightarrow 19,0 \rightarrow 19,3 \rightarrow 21,0 \rightarrow 23,5$), указывает на морское происхождение состава снежного покрова.

Расчётное же значение величины минерализации снежного покрова по нашим данным составило 16,8, 20,0, 30,1, 53,1 и 93,2 мг/дм³ соответственно. Таким образом, для величины минерализации выявлено пространственное увеличение от высокогорной к равнинной зоне, в 5,5 раз.

Формирование кислотности снежного покрова оценивалось через отношение суммы концентраций с учётом определённых катионов и анионов каждого пункта отбора по отдельности с представлением общего распределения параметров (см. табл. 2). Наблюдается широтная дифференциация в распределении катионов и анионов в снежном покрове с юга на север, выраженная в пропорциональном увеличении суммарного их содержания. Причиной этого является увеличение доли антропогенной нагрузки на снежный покров и дополнительных источников поступления веществ в атмосферу.

Как видно из табл. 2, соотношение катионов и анионов находится почти на одном уровне, за исключением первого и третьего пункта отбора, где содержание анионов в 1,5 и 1,2 раза соответственно выше, чем катионов. Данный факт можно объяснить выходом подземных минеральных вод “Уштулу” в районе отбора первой пробы снега, имеющих щелочную реакцию, а также приносом антропогенного фактора в 3-5-й пункты отбора. Отмечено, что с увеличением высоты над уровнем моря, т.е. высокогорных и горных районах, наблюдается тенденция к уменьшению плотности снежного покрова по сравнению с равниной.

Результаты анализа модулей поступления ионов позволили объяснить взаимосвязи между минеральными компонентами снежного покрова (табл. 3).

Существенный вклад в кислотность талых снежных вод исследуемых территорий приносят анионы сульфат- и нитрат-ионов, о чём свидетельствуют высокие значения отношения концентраций ($[SO_4^{2-}]/[NO_3^-] > 0,6$ (1 пункт отбора); ($[SO_4^{2-}]/[NO_3^-] > 1,2$ (2 пункт отбора); ($[SO_4^{2-}]/[NO_3^-] > 0,8$ (3 пункт отбора); ($[SO_4^{2-}]/[NO_3^-] > 1,3$ (4 пункт отбора); ($[SO_4^{2-}]/[NO_3^-] > 2,0$ (5 пункт отбора) по отношению к другим ионам.

Элементы магний и натрий имеют, как правило, морское происхождение в снежном покрове, калий – терригенное. Значение соотношения ($[Mg^{2+}] + [Na^+] / [Ca^{2+}] + [K^+]$) отражает преобладание морской (> 1) или терригенной составляющей (< 1). Так, данное соотношение для исследуемого снежного покрова подтверждает его происхождение как морское.

Известно, что ионы $Mg^{2+} + K^+ + Cl^-$ имеют почвенно-эрозионное происхождение и, как видно, доля их вклада в состав талых снежных вод увеличивается по мере перехода от высокогорной зоны к равнинной.

Таблица 3. Соотношения модулей поступления главных ионов в снежном покрове**Table 3.** Ratios of the modules of the main ion intake in the snow cover

Показатель	Пункт отбора проб				
	1	2	3	4	5
$\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$	4,2	3,3	2,0	1,8	1,6
$\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$	0,6	1,2	0,8	1,3	2,0
$\text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{K}^+$	3,9	2,0	2,0	1,5	1,2
$\text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$	1,1	1,94	2,5	2,9	3,2
$\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	20,0	7,1	2,6	2,0	1,5
$\text{Cl}^- / \text{Na}^+$	0,05	0,1	0,4	0,55	0,7
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{PO}_4^{3-}$	0,5	0,18	2,0	2,5	2,9
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$	0,9	0	2,1	2,6	3,0

Внутриконтинентальное происхождение осадков характеризуется соотношением $\text{Cl}^-/\text{Na}^+ \approx 1$. В наших исследованиях оно имеет следующее распределение: $0,05 \rightarrow 0,1 \rightarrow 0,4 \rightarrow 0,55 \rightarrow 0,7$.

Ионы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{PO}_4^{3-}$ накапливаются в снежном покрове в результате растворения в кислой среде фосфатов. Поступление этих компонентов в снежный покров обусловлено главным образом как естественными процессами выветривания горных пород, содержащих фосфаты магния и кальция, так и техногенными факторами. Так, видно, что пространственное изменение соотношений данных ионов происходит в сторону увеличения следующим образом: $0,5 \rightarrow 0,18 \rightarrow 2,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 2,9$.

Содержание гидрокарбонат-ионов характеризуется пространственным увеличением от высокогорной области к равнинной в 1,8 раза: $8,40 \rightarrow 8,42 \rightarrow 8,54 \rightarrow 10,2 \rightarrow 15,0$.

Ввиду того, что рН исследуемых талых снежных вод находится в интервале 4,6–6,6 ед., свободная щёлочность равна 0 ммоль/дм³, тогда как пространственное изменение общей щёлочности имеет следующие значения: 0,10 ммоль/дм³ или 5,3 мг/дм³ (1 пункт отбора); 0,12 ммоль/дм³ или 6,0 мг/дм³ (2 пункт отбора); 0,14 ммоль/дм³ или 7,0 мг/дм³ (3 пункт отбора); 0,18 ммоль/дм³ или 9,0 мг/дм³ (4 пункт отбора); 0,22 ммоль/дм³ или 11,0 мг/дм³ (5 пункт отбора).

Общая жёсткость исследуемых талых снежных вод в первых трёх пунктах равна 1,0 мг-экв/л, а в 4 и 5 пунктах подрастает до 1,5 и 1,7 мг-экв/л соответственно, что относит их к мягким.

Накопление биогенных аммоний- и нитрат-ионов обусловлено поступлением их в снежный покров из атмосферы в результате миграции из почвы, выделения их в процессе жизнедеятельности растений, а также в результате техногенной эмиссии при сжигании различных видов топлива.

Поступления фосфатов и фторидов в снежный покров обусловлено главным образом как естественными процессами выветривания горных пород, так и техногенными факторами.

Атмосферные осадки играют важную роль в поступлении основных биогенных веществ на Землю, которые ввиду своей токсичности заслуживают особого внимания в исследованиях талых снежных вод. Они представлены азотсодержащими (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-), фосфорсодержащими (PO_4^{3-} – в форме растворенных ортофосфатов) и фторсодержащим (F^-) соединениями (рис. 3). Так, в 1 и 2 пунктах отбора выявлены следующие формы биогенов: NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , F^- в сумме 1,16 и 1,24 мг/дм³ соответственно, в 3, 4 и 5 пунктах – NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- , F^- в количестве 2,0, 4,8 и 5,8 мг/дм³ соответственно. В 1–3 и 5 пунктах отбора выявлено превышение ПДК_{р.х.} 0,05 мг/дм³ по фторид ионам в 1,2–1,3 раза.

Ион Ba^{2+} выявлен в первых двух фоновых точках отбора проб – 0,11 и 7,0 мг/дм³ соответственно. Лимитирующим признаком вредности бария является санитарно-токсикологический норматив и ПДК вод рыбохозяйственного назначения (ПДК_{р.х.}), равный 0,74 мг/дм³. Этот показатель превышен во второй точке отбора в 9,5 раз.

Ион Li^+ выявлен также в первых двух фоновых точках отбора в концентрациях равных 0,04 мг/дм³ и 0,20 мг/дм³. Лимитирующим признаком вредности лития является санитарно-токсикологический и показатель ПДК_{р.х.} в воде водоёмов равный 0,08 мг/дм³. Превышение во второй точке отбора составляет 2,5 раза, а при нормативе для питьевой воды (ПДК_{п.в.}) равном 0,03 мг/дм³ превышения выявлены в первой (в 1,3 раза) и во второй точке (в 6,6 раза).

Стронций-ионы в исследуемых талых снежных водах не выявлены.

Органолептические величины – запах и привкус – талых снежных вод оценены на уровне 0 баллов.

Удельная суммарная альфа, бета активность в анализируемых пробах не выявлены, а плотность потока гамма-частиц находилась на уровне 0,23–0,24 мкЗв/час. Необходимо отметить, что последний параметр мы не можем охарактеризовать с точки зрения превышения ПДК, т.к. он не нормируется.

При сравнении со средним составом ранее исследованных в течение 20 лет поверхностных вод западной части северного склона Центрального Кавказа [2, 3], проведённый химический анализ снежного покрова показал значительно большую долю хлоридов (0,24; 1,43; 1,7; 1,85; 1,9 мг/дм³), натрия (5,0; 10,1; 4,4; 4,0; 3,8 мг/дм³) и калия (0,82; 0,51; 0,63; 0,58; 0,50 мг/дм³). Причём доля хлоридов составляла 1,4; 5; 9,3; 10,1, 12 %; калия – 5; 1,7; 3,2; 3,8, 4,0 %; натрия – 42, 50, 28, 20, 17 %. При этом натрий- и хлорид-ионы проявляют высокую степень сродства и мигрируют в геохимическом цикле в виде аэрозолей морского происхождения через Главный Кавказский хребет. Наглядным подтверждением данному факту является распределение соотношений Na/Cl от высокогорной к равнинной зоне: 20,0→7,1→2,6→2,0→1,5 (см. табл. 3).

Расчётные значения компонентов снежного покрова (табл. 4) показывают, в целом, динамику как поступления, так и нагрузки их на окружающую среду.

Как видно (рис. 4), вклад отдельных компонентов в суммарное поступление на подстилающую земную поверхность во всех изучаемых геоморфологических зонах КБР распределяется следующим образом: $\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{PO}_4^{3-} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_2^- > \text{F}^- > \text{Li}^+$. Причём на долю первых пяти главенствующих ионов приходится 81,4 % от общей суммы поступления компонентов на подстилающую земную поверхность.

Таблица 4. Расчётные значения компонентов снежного покрова
Table 4. Calculated values of snow cover components

Пункт отбора проб						Сумма 1-5
	1	2	3	4	5	
Среднее значение поступления компонентов на подстилающую поверхность P_n						
pH	-	-	-	-	-	-
HCO_3^-	1,4	1,4	1,42	1,7	2,5	8,42
Ca^{2+}	0,08	0	0,29	0,4	0,42	1,91
Mg^{2+}	0	0	0,03	0,04	0,045	0,12
Na^+	0,83	1,7	0,73	0,7	0,63	4,6
K^+	0,14	0,085	0,1	0,1	0,08	0,51
SO_4^{2-}	0,09	0,17	0,15	0,18	0,22	0,81
Cl^-	0,04	0,23	0,28	0,31	0,32	1,2
NO_3^-	0,13	0,14	0,18	0,22	0,25	0,92
NO_2^-	0	0	0,012	0,04	0,042	0,094
NH_4^+	0,04	0,04	0,1	0,22	0,25	0,65
PO_4^{3-}	0,01	0,017	0,02	0,35	0,4	0,8
F^-	0,01	0,01	0,01	0,008	0,011	0,05
Li^+	0,007	0,03	0	0	0	0,037
Ba^{2+}	0,18	1,2	0	0	0	1,38
Коэффициент концентрации компонента K_c						
pH			1,1	1,2	1,4	3,7
HCO_3^-	Фон	Фон	1,0	1,2	1,8	4,0
Ca^{2+}			3,6	4,7	5,3	13,6
Mg^{2+}			0	0	0	0
Na^+			0,6	0,53	0,5	1,63
K^+			0,95	0,88	0,76	2,6
SO_4^{2-}			1,2	1,4	1,7	4,3
Cl^-			2,0	2,2	2,3	6,5
NO_3^-			1,3	1,6	1,8	4,7
NO_2^-			-	-	-	-
NH_4^+			2,5	4,6	6,7	13,8
PO_4^{3-}			0,22	4,0	4,5	8,72
F^-			1,0	0,8	1,0	2,8
Li^+			0	0	0	0
Ba^{2+}	0	0	0	0		

Коэффициент относительного увеличения общей нагрузки компонента K_p						
pH	Фон	Фон	1,1	1,23	1,4	3,7
HCO ₃ ⁻			1,0	1,2	1,8	4,0
Ca ²⁺			3,6	5,0	5,3	14,0
Mg ²⁺			0,03	0,04	0,045	0,12
Na ⁺			0,6	0,5	0,5	1,36
K ⁺			0,9	0,9	0,7	2,5
SO ₄ ²⁻			1,1	1,4	1,7	4,2
Cl ⁻			2,1	2,3	2,4	6,8
NO ₃ ⁻			1,3	1,6	1,8	4,7
NO ₂ ⁻			0,01	0,04	0,042	0,092
NH ₄ ⁺			2,5	5,5	6,2	14,2
PO ₄ ³⁻			1,5	26,0	30,0	57,5
F ⁻			1,0	0,8	1,1	2,9
Li ⁺			0	0	0	0
Ba ²⁺			0	0	0	0
Пункт отбора проб						
	1	2	3	4	5	
Коэффициент опасности (загрязнения) исследуемых компонентов K_0						
pH	-	-	-	-	-	
HCO ₃ ⁻	-	-	-	-	-	
Ca ²⁺	-	-	-	-	-	
Mg ²⁺	-	-	-	-	-	
Na ⁺	-	-	-	-	-	
K ⁺	-	-	-	-	-	
SO ₄ ²⁻	-	-	-	-	-	
Cl ⁻	-	-	-	-	-	
NO ₃ ⁻	-	-	-	-	-	
NO ₂ ⁻	-	-	-	-	-	
NH ₄ ⁺	-	-	-	-	-	
PO ₄ ³⁻	-	-	-	-	-	
F ⁻		1,2 _{р.х.}	1,2 _{р.х.}	-	-	
Li ⁺	1,3 _{р.х.} *	6,7 _{п.в./2,5_{р.х.}}	-	-	-	
Ba ²⁺	0,15 _{п.в./0,15_{р.х.}}	10 _{п.в./9,5_{р.х.}}	-	-	-	

Пункт отбора проб					
1	2	3	4	5	
Сумма коэффициентов опасности исследуемых компонентов ΣK_0					
0,15 _{п.в.} Ba ²⁺ / 1,45 _{р.х.} Li ⁺ +Ba ²⁺	16,7 _{п.в.} Li ⁺ +Ba ²⁺ / 13,2 _{р.х.} F ⁻ +Li ⁺ +Ba ²⁺	1,2 _{р.х.} F ⁻	-	-	
Суммарный показатель нагрузки компонентов на территорию Z_p					
Фон	Фон	5,1	35,0	41,2	
Ирригационный коэффициент Стеблера					
14,0	182,0	72,0	65,0	50,0	
Коэффициент адсорбции натрия SAR					
2,0	0,44	0,86	0,66	0,55	

Примечание. * Расчётные значения компонентов снежного покрова для питьевых вод и вод рыбохозяйственного назначения.

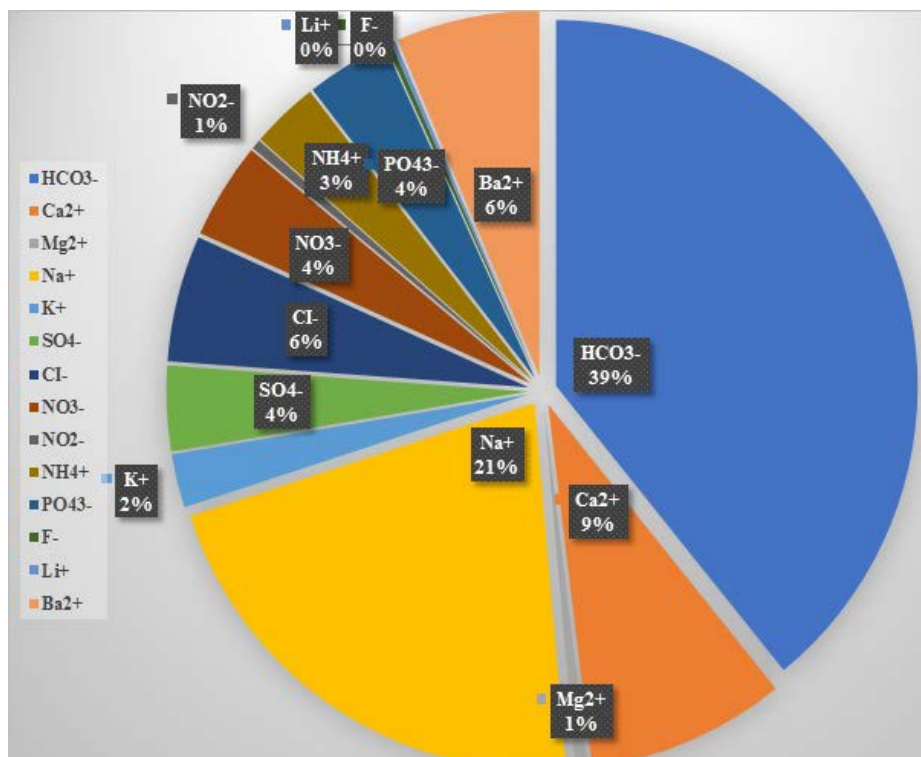


Рис. 4. Распределение суммарного поступления компонентов на подстилающую поверхность.

Fig. 4. Distribution of the total intake of components to the underlying surface.

Распределение суммарного коэффициента концентрации (K_c) компонентов от высокогорной к равнинной зоне выглядит следующим образом: $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{PO}_4^{3-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{F}^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+$.

Распределение суммарного коэффициента относительного увеличения общей нагрузки (K_p) компонентов от высокогорной к равнинной зоне выглядит следующим образом: $\text{PO}_4^{3-} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{F}^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_2^-$.

В соответствии с нормативами ПДК для питьевых вод и вод рыбохозяйственного назначения коэффициент опасности (загрязнения) исследуемых компонентов (K_o) определён только для трёх компонентов снежного покрова: F^- , Li^+ , Ba^{2+} высокогорной, горной и предгорной зон. Данный факт объясним с точки зрения геологии районов исследований и диффузии составляющих горных пород в атмосферу.

Пространственное изменение коэффициента адсорбции натрия (SAR) от высокогорной зоны к равнинной позволяет охарактеризовать пробы как низко опасные для осолонцевания почв, а ирригационный коэффициент Стеблера – как хорошие для применения в орошении.

Заключение

Таким образом, выявлены закономерности формирования химического состава снежного покрова в разных геоморфологических зонах КБР. Талая снежная вода исследуемых областей характеризуется, как мягкая, низкой минерализации с кислой реакцией среды, что обусловлено преобладанием в снежном покрове сильных минеральных кислот и дефицитом нейтрализующих соединений. Выявлена широтная дифференциация в распределении ионов в снежном покрове с юга на север.

Проведённые исследования показали, что снежный покров Верхне-Балкарского и Черекского ущелий в соответствии с классификацией [4] можно отнести к гидрокарбонатно-натриевому I типу (1–3 пункт отбора), гидрокарбонатно-кальциевому (4 пункт отбора) и гидрокарбонатно-аммониевому типу (5 пункт отбора). Состав снежного покрова показал, что преобладающее влияние на химизм оказывает трансграничный перенос морских солей через Главный Кавказский хребет.

Список литературы

1. Агоева Э.А., Иттиев А.Б. Исследование метеорологических и гидрологических параметров в Кавказском регионе // Геология, география и глобальная энергия. 2021. № 2 (81). С. 114-124. <https://doi.org/10.21672/2077-6322-2021-81-2-114-124>.
2. Агоева Э.А., Бозиева Ж.Ч., Иттиев А.Б. Исследования метеорологических и гидрохимических параметров в Безенгийском ущелье // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 4 (71). С. 166-177. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36683877>.
3. Агоева Э.А., Иттиев А.Б., Газаев М.М. Микроэлементы в поверхностных водах Чегемского ущелья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Том 24, № 8. С. 16-28. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36486935>.
4. Алевин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 445 с.
5. Баранов А.Н., Савченко Е.И., Пескова Т.А. Математическая обработка результатов исследования снежного покрова // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли. Материалы V Байкальской международной научной конференции – стратегической сессии. 2023. С. 41-44.
6. Бозиева Ж.Ч., Агоева Э.А., Газаев М.А. Изменение приземной температуры воздуха и суммы выпавших осадков в Верхне-Балкарском ущелье // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Том 25, № 8. С. 14-23. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-8-14-23>.
7. Бозиева Ж.Ч., Агоева Э.А., Иттиев А.Б. Исследование уровня атмосферных осадков в Кавказском регионе // Геология, география и глобальная энергия. 2020. Т. 78, № 3. С. 46-53. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44177173>.
8. Бондаревич Е.А., Коцюржинская Н.Н., Жилыева О.А., Самойленко Г.Ю., Климович К.И., Игумнов С.А. Мониторинг загрязнения снежного покрова г. Читы тяжелыми металлами // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Том 8, № 2. С. 132-144. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-132-144>.
9. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат. 1985. 184 с.
10. Глазовский Н.Ф., Злобина А.И., Учватов В.П. Химический состав снежного покрова некоторых районов Верхнеокского бассейна // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 67-86.
11. Глазовский Н.Ф. Учватов В.П. Химический состав атмосферной пыли некоторых районов ЕТС. Пушкино: Науч. центр биологических исследований АН СССР, 1981. 31 с.

12. ГН 2.1.5.1315 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования гигиенические нормативы

13. ГОСТ 31954-2012 Вода питьевая. Методы определения жёсткости

14. ГОСТ 31957-2012 Вода. Методы определения щёлочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов

15. ГОСТ 17.1.5.05-85 Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков

16. *Грей Д.М., Мэйл Д.Х.* Снег. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 751 с.

17. *Майстренко В.Н.* Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов. М.: Химия, 1996. 319 с.

18. *Мухаметдинова Э.А. (Кузнецова Э.А.)* Геосистемная сущность снежного покрова // Естественные и технические науки. 2009. № 4. С. 274-277.

19. ПНД Ф 14.1:2:3:4:121 Методика выполнения измерений pH в водах потенциометрическим методом

20. ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов, нитрит-ионов, сульфат-ионов, нитрат-ионов, фторид-ионов и фосфат-ионов в пробах природных, питьевых и сточных вод с применением системы капиллярного электрофореза "Капель-105М"

21. ПНДФ 14.1:2:4.167-2000 Количественный химический анализ вод методика измерений массовой концентрации катионов аммония, калия, натрия, лития, магния, стронция, бария и кальция в пробах питьевых, природных (в том числе минеральных) и сточных вод методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель-105М"

22. Приказ от 13 декабря 2016 года N552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 22 августа 2023 г.)

23. *Прокачёв В.Г., Усачёв В.Ф.* Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 192 с.

24. *Роджер Г.* Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 311 с.

25. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы

26. *Рив Р.К., Байэр К.А., Брукс Р.Х.* Сравнение влияния обменных натрия и калия на физическое состояние почв // Журнал Американского общества почвоведов. 1954. № 8 (2). С. 130. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800020004x>.

27. СанПин 2.1.5.980-00 Водоотведение населённых мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод Санитарные правила и нормы

28. СанПин 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий

29. *Семакина А.В., Сырых И.В., Платунова Г.Р.* К аэрогенному загрязнению снежного покрова города Ижевска // Вестник Удмуртского университета. Серия биология. Науки о Земле. 2018. Том 28, вып. 3. С. 257-268.

30. *Цвигун Ю.С., Галичева Л.А.* Климатические особенности территории Кабардино-Балкарской Республики и динамика их изменения. Нальчик: Перспектива, 2010. Том 1. 405 с.

31. GAW report No. 160. Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme. Geneva: WMO, 2004. 170 p.

32. *Oster J., Sposito G.* The Gapon Coefficient and the exchangeable sodium percentage-sodium adsorption ratio relation // Soil Science Society of America Journal. 1980. No. 44 (2). P. 258. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020011x>

References

1. Agoeva E.A., Ittiev A.B. Issledovanie meteorologicheskikh i gidrologicheskikh parametrov v Kavkazskom regione [The study of meteorological and hydrological parameters in the Caucasus region]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, geography and global energy], 2021, vol. 81, no. 2, pp. 114-124 [in Russ]. DOI: 10.21672/2077-6322-2021-81-2-114-124.
2. Agoeva E.A., Bozieva Zh.Ch., Ittiev A.B. Space-timporary changes of meteorological and hydrochemical parameters in the Bezengi corge. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, geography and global energy], 2018, vol. 71, no. 4, pp. 166-177 [in Russ].
3. Agoeva E.A., Ittiev A.B., Gazaev M.M. Mikroelementy v poverhnostnykh vodah Chegemskogo ushel'ya. [Trace elements in the surface waters of the Chegem gorge]. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Trans-Baikal State University], 2018, vol. 24, no. 8, pp.16-28 [in Russ].
4. Alekin O.A. Osnovygidrohimii [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1970, 445 p. [in Russ].
5. Baranov A.N., Savchenko E.I., Peskova T.A. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov issledovaniya snezhnogo pokrova [Mathematical processing of the results of the snow cover study]. *Snezhnyy pokrov, atmosferye osadki, aerzoli. Materialy V Baykal'skoy mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii – strategicheskoy sessii* [Snow cover, precipitation, aerosols: Materials of the V Baikal International Scientific Conference – strategic session], June 19-23, 2023, pp. 41-44 [in Russ].
6. Bozieva Zh. Ch., Agoeva E. A., Gazaev M. A. Changes in surface air temperature and the amount of precipitation in the Upper Balkar Gorge. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Trans-Baikal State University], 2019, vol. 25, no. 8, pp. 14-23 [in Russ]. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-8-14-23.
7. Bozieva Zh.Ch. Agoeva E.A.,Ittiev A.B Issledovanie urovnya atmosferynykh osadkov v Kavkazskom regione [Investigation of precipitation levels in the Caucasus region]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, geography and global energy], 2020, vol. 78, no. 3, pp. 46-53 [in Russ].
8. Bondarevich E.A., Kocjurzhinskaja N.N., Zhiljaeva O.A., Samojlenko G.Ju., Klimovich K.I., Igumnov S.A. Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova g. Chity tyazhelymi metallami [Monitoring of pollution of the snow cover of Chita with heavy metals] *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 132-144 [in Russ]. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-2-132-144.
9. Vasilenko V., Nazarov I., Fridman Sh Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1985, 184 p. [in Russ].
10. Glazovskiy N.F., Zlobina A.I., Uchvatov V.P. Himicheskij sostav snezhnogo pokrova nekotorykh rayonov Verkhneokskogo basseyna [The chemical composition of the snow covers in some areas of the Verkhneoksky basin]. *Regional'nyy ekologicheskij monitoring*, Moscow, Nauka publ., 1983, pp. 67-86 [in Russ].
11. Glazovskiy N.F. Uchvatov V.P. Himicheskij sostav atmosferynoy pyli nekotorykh rayonov ETS [The chemical composition of atmospheric dust in some areas of the ETC]. Pushchino: Nauch. centr biologicheskikh issledovaniy AN SSSR [Pushchino: Scientific Center for Biological Research of the USSR Academy of Sciences], 1981, 31 p. [in Russ].
12. GN 2.1.5.1315 Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) himicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'ektov hozyaystvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya gigienicheskie normativy. [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the water of water bodies of economic, drinking and cultural water use hygienic standards. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the water of water bodies for economic, drinking and cultural water use hygienic standards], Moscow, Ministry of Health of Russia, 2003, 153 p. [in Russ].
13. GOST 31954-2012 Voda pit'evaya. Metody opredeleniya zhestkosti [Drinking water. Methods for determining stiffness], Moscow, Standartinform publ., 2018, 18 p. [in Russ].
14. GOST 31957-2012 Voda. Metody opredeleniya shchelochnosti i massovoy koncentracii karbonatov i gidrokarbonatov [Water. Methods for determining the alkalinity and mass concentration of carbonates and bicarbonates]. Moscow, Standartinform publ., 2013, 30 p. [in Russ].

15. GOST 17.1.5.05-85 Obshchie trebovaniya k otboru prob poverhnostnyh i morskikh vod, l'da i atmosferynyh osadkov [General requirements for sampling surface and marine waters, ice and precipitation]. Moscow, 1985, 12 p. [in Russ].

16. Grej D.M., Mjejl D.H. Sneg [Snow]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 751 p. [in Russ].

17. Maystrenko V.N. Ekologo-analicheskij monitoring supertoksikantov. [Ecological and analytical monitoring of supertoxicants]. Moscow, Himiya publ., 1996, 319 p. [in Russ].

18. Muhametdinova E.A. (Kuznecova E.A.) Geosistemnaya sushchnost' snezhnogo pokrova [The geosystem nature of the snow cover]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences]*, 2009, no. 4, pp. 274-277 [in Russ].

19. PND F 14.1.2:3:4:121 Metodika vypolneniya izmereniy rN v vodah potentsiometricheskim metodom [The method of performing pH measurements in waters by the potentiometric method]. FBU "FCAO", 2018, 26 p. [in Russ].

20. PND F 14.1.2:3:4.282-18 Kolichestvennyy himicheskij analiz vod. Metodika izmereniy massovoy koncentracii kationov i anionov, nitrit-ionov, sul'fat-ionov, nitrat-ionov, florid-ionov i fosfat-ionov v probah prirodnyh, pit'evykh i stochnykh vod s primeneniem sistemy kapillyarnogo elektroforeza "Kapel'-105M". [Quantitative chemical analysis of waters. Method of measuring the mass concentration of chloride ions, nitrite ions, sulfate ions, nitrate ions and phosphate ions in samples of natural, drinking and wastewater using the Kapel'-105M capillary electrophoresis system]. Moscow, Standartinform publ., 2019, 26 p. [in Russ].

21. PNDF 14.1.2:4.167-2000 Kolichestvennyy himicheskij analiz vod metodika izmereniy massovoy koncentracii kationov ammoniya, kaliya, natriya, litiya, magniya, stronciya, bariya i kal'ciya v probah pit'evykh, prirodnykh (v tom chisle mineral'nykh) i stochnykh vod metodom kapillyarnogo elektroforeza s ispol'zovaniem sistemy kapillyarnogo elektroforeza "Kapel'-105M" [Quantitative chemical analysis of waters a method for measuring the mass concentration of ammonium, potassium, sodium, lithium, magnesium, strontium, barium and calcium cations in samples of drinking, natural (including mineral) and wastewater by capillary electrophoresis using the Kapel'-105M capillary electrophoresis system]. Moscow, Standartinform publ., 2020, 24 p. [in Russ].

22. Prikaz ot 13 dekabrya 2016 goda N552 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybohozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh koncentraciy vrednykh veshchestv v vodah vodnykh ob'ektov rybohozyaystvennogo znacheniya» (s izmeneniyami na 22 avgusta 2023 g.) [Order No. 552 dated December 13, 2016 On Approval of Water Quality Standards for Water Bodies of Fisheries Importance, including Standards for Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Waters of Water Bodies of Fisheries Importance (as amended on August 22, 2023)], 153 p. [in Russ].

23. Prokachjov V.G., Usachjov V.F. Snezhnyypokrov v sferevljanijagoroda. [Snow cover in the sphere of influence of the city]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 191 p. [in Russ].

24. Rodzher G. Pogoda i klimat v gorah. [Weather and climate in the mountains]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1984, 311 p. [in Russ].

25. RD 52.04.186-89 Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [Guidelines for the control of atmospheric pollution]. Moscow, 1991, 556 p. [in Russ].

26. Reeve R.C., Bower, C.A., Brooks R.H., Gschwend F.B. A Comparison of the Effects of Exchangeable Sodium and Potassium upon the Physical Condition of Soils. *Journal of the American Society of Soil Scientists*, 1954, no. 8(2), 130 p. DOI: 10.2136/sssaj1954.03615995001800020004x

27. SanPin 2.1.5.980-00 Vodootvedenie naseleennykh mest, sanitarnaya ohrana vodnykh ob'ektov. Gigienicheskie trebovaniya k ohrane poverhnostnykh vod Sanitarnye pravila i normy [Sanitation of populated areas, sanitary protection of water bodies. Hygienic requirements for the protection of surface waters Sanitary rules and regulations], 2017, 13 p. [in Russ].

28. SanPiN 2.1.3684-21 Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k sodержaniyu terri-toriy gorodskikh i sel'skikh poseleniy, k vodnym ob'ektam, pit'evoy vode i pit'evomu vodosnab-zheniyu, atmosfernomu vozduhu, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy [Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance

of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures], 2021, 63 p. [in Russ].

29. Semakina A.V., Syryh I.V., Platunova G.R. K aerogennomu zagryazneniyu snezhnogo pokrova goroda Izhevsk [To aerogenic pollution of the snow cover of the city of Izhevsk]. Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya biologiya. Nauki o Zemle [*Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Earth Sciences*], 2018, vol. 28, no. 3, pp. 257-268 [in Russ].

30. Cvigun Yu.S., Galicheva L.A. Klimaticheskie osobennosti territorii Kabardino-Balkarskoy Respubliki i dinamika ih izmeneniya [Climatic features of the territory of the Kabardino-Balkarian Republic and the dynamics of their changes]. Nal'chik: Perspektiva, 2010, 405 p. [in Russ].

31. GAW report No. 160. Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme. Geneva, WMO, 2004, 170 p.

32. Oster J., Sposito G. The Gapon Coefficient and the exchangeable sodium percentage-sodium adsorption ratio relation. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, no. 44 (2), 258 p. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400020011x.

*Поступила 17.03.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.*

*Submitted 17.03.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-105-120>

УДК 551.515.4

Тенденции изменения среднегодовых осадков в Азово-Черноморском регионе по данным моделей проекта CMIP6

А.Б. Полонский, П.А. Сухонос

*Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия
apolonsky5@mail.ru*

С использованием результатов численных расчётов по глобальным климатическим моделям CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G-p3, входящим в проект CMIP6, получены проекции изменения количества среднегодовых величин месячных сумм осадков для Азово-Черноморского региона в 21 веке и наиболее вероятного климатического сценария SSP2-4.5. Модели, выбранные из ансамбля 36 глобальных численных моделей, адекватно воспроизводят режим осадков над Азово-Черноморским регионом. Рассчитаны тенденции изменения среднегодовых величин месячных сумм осадков в период 2030–2099 гг. и изменение медианы осадков в краткосрочной (2030–2049 гг.), среднесрочной (2060–2079 гг.) и долгосрочной (2080–2099 гг.) перспективе по отношению к базовому периоду (1995–2014 гг.). Получено, что в среднем над Черным морем к концу 21 века вероятно уменьшение среднегодовых величин месячных сумм осадков от 1,8 мм (согласно модели CNRM-CM6-1-HR-f2) до 2,8 мм (согласно модели GISS-E2-1-G-p3). При этом в отдельных районах Азово-Черноморского региона (в частности, в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий) вероятное уменьшение количества среднегодовых величин месячных сумм осадков составит к концу 21 века почти 7 мм, годовых – более 80 мм.

Ключевые слова: среднегодовые осадки, климатические проекции, долговременные тренды количества осадков, Черное море

Trends in annual precipitation in the Azov-Black Sea region from CMIP6 models

A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos

*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia
apolonsky5@mail.ru*

Using the results of numerical simulations with the CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4, and GISS-E2-1-G-p3 CMIP6 global climate models, projections of annual precipitation changes in the Azov-Black Sea region in the 21st century under the SSP2-4.5 climate scenario were obtained. The models were selected from the ensemble of 36 global numerical models as they adequately represent the regional precipitation regime. Trends in annual mean values of monthly total precipitation for the period of 2030–2099 and the change in the median of precipitation in the short (2030–2049), medium (2060–2079), and long term (2080–2099) with respect to the base climate period (1995–2014) were calculated. It was found that on average over the Black Sea by the end of the 21st century, a decrease in the annual values of monthly precipitation from 1,8 mm (based on the CNRM-CM6-1-HR-f2

model data) to 2,8 mm (based on the GISS-E2-1-G-p3 model data) is expected. At the same time, in certain areas of the Azov-Black Sea region (in particular, in the vicinity of the Anatolian and Caucasian coasts), a probable decrease in the annual values of monthly (annual) precipitation by the end of the 21st century will be almost 7 mm (>80 mm).

Keywords: annual precipitation, climate projections, long-term trends in precipitation, Black Sea

Введение

Водный баланс Черного и Азовского морей в условиях современных и вероятных будущих климатических изменений на протяжении 21 века изучался в достаточно большом количестве работ (см., например, [2–7, 26]). Известно, что в современных климатических условиях основной вклад в приток пресных вод в Черное и Азовское моря вносит речной сток. Для Черного моря превышение этого вклада над вкладом осадков по оценкам различных авторов составляет от 1,2 до 2,9 раз. Если принять суммарный поверхностный приток пресных вод в этот водоём за 1, то соотношение речного стока и осадков в этот приток для современных климатических условий оценивается в среднем как 0,65:0,35 [6]. Для Азовского моря соответствующее соотношение указывает на ещё большее преобладание речного стока над осадками в общем балансе пресных вод, что является следствием относительно небольшой площади акватории моря [8].

Что касается долговременных тенденций, то многочисленные оценки, выполненные различными авторами, показывают, что статистически значимые тренды столетнего масштаба в стоках крупнейших Азово-Черноморских рек отсутствуют [26, 27]. Вместе с тем в ряде работ показано, что количество осадков над Азово-Черноморским регионом имеет тенденцию к уменьшению, которое до конца 21 века может достигнуть 20–30 % по сравнению с концом 20 века. На первый взгляд полученные тенденции речного стока и осадков противоречат друг другу. На самом деле это не соответствует действительности, поскольку крупнейшие реки Азово-Черноморского бассейна характеризуются смешанным типом питания. Например, Дунай (вторая по величине расхода река Европы) берёт своё начало в Альпах, ледники которых тают в процессе потепления, что вызывает увеличение части стока Дуная ледникового происхождения. Если при этом количество осадков над площадью водосбора Дуная и соответствующая часть его стока уменьшаются, суммарный сток может оставаться неизменным. Кроме этого, всё большая часть речных вод Азово-Черноморского региона расходуется на промышленные и хозяйственные нужды, что нарушает естественный региональный круговорот воды и связанный с ним пресный баланс Черного и Азовского морей [8, 27].

Таким образом, осадки, как следует из приведенных выше данных, являются важнейшим фактором, определяющим долговременные тенденции изменения пресного баланса Черного моря. В настоящей работе рассчитаны и проанализированы наиболее вероятные тенденции изменения

среднегодовых осадков в Азово-Черноморском регионе до конца 21 века. Для этих расчётов использованы результаты численного моделирования будущих климатических изменений (т. е. климатические проекции), которые являются основным инструментом для количественной оценки возможных изменений климата в 21 веке. В последнее время достигнут существенный прогресс в многомодельном подходе к численному моделированию будущих изменения климата. Для понимания закономерностей климатических изменений, рассчитанных с использованием различных численных моделей по определенным сценарным траекториям, реализуется международный исследовательский проект сравнения таких моделей (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) [19]. К настоящему времени выполнены расчеты по результатам 6-й фазы этого проекта. Участвующие в нем численные модели характеризуются повышенным пространственным разрешением, улучшенными схемами параметризации физических процессов подсеточных масштабов и добавлением дополнительных эффектов, влияющих на климатические характеристики и не учитываемых ранее [20].

Проекция изменения среднегодовых осадков по данным моделей проекта CMIP6 проанализированы для многих регионов земного шара. В частности, анализ проекций изменения осадков, полученных по данным 15 моделей проекта CMIP6 в рамках сценария SSP2-4.5, показал значимое увеличение среднегодовых осадков для территории Центральной Азии. К концу 21 века эти осадки увеличатся более чем на 10 % [24]. Согласно данным 27 моделей проекта CMIP6, среднегодовое количество осадков в Южной Азии увеличится в 21 веке по всем сценариям изменения климата [16]. При этом в разных регионах Южной Азии скорость увеличения среднегодового количества осадков значительно различается. Так, к концу 21 века в соответствии со сценарием SSP5-8.5 диапазон увеличения среднегодового количества осадков (с учетом статистической неопределенности) в регионе составит от 17,1 (2,2–49,1) % до 27,3 (5,3–160,5) %. Проекция изменения среднегодовых осадков над Китаем, полученные по данным 20 моделей проекта CMIP6, показывают увеличение количества осадков к концу 21 века по климатическим сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 [29]. При этом наибольший рост среднегодового количества осадков ожидается на севере и западе Китая, особенно в рамках сценария SSP5-8.5. Как показано в более поздней работе [18], модели проекта CMIP6 обеспечивают надежное воспроизведение средних и экстремальных величин осадков для контрольного периода на большей части Евразии, за исключением тех регионов, в которых наблюдалось уменьшение количества осадков – в них большинство моделей проекта CMIP6 показывают их увеличение. Тенденции изменения осадков над Африканским континентом, полученных по данным 27 моделей проекта CMIP6, в краткосрочной (2030–2059 гг.) и долгосрочной (2070–2099 гг.) перспективе по отношению к базовому периоду (1981–2010 гг.) продемонстрировали вероятное увеличение среднего

по площади количества осадков в Африке на 6,8 (8,5) % в краткосрочной (долгосрочной) перспективе в соответствии со сценарием изменения климата SSP2-4.5 [15]. Тенденции изменения осадков, рассчитанные по данным 31 модели проекта CMIP6 для региона Северной и Центральной Америки, характеризуются большой неопределенностью, но в целом указывают на увеличение среднегодового количества осадков к концу 21 века (на 10–30 %) на большей части Северной Америки и их уменьшение (на 10–40 %) в Центральной Америке и Карибском бассейне [14]. Таким образом, большой разброс проекций изменения осадков подчеркивает их высокую пространственную неоднородность и необходимость проведения регионального анализа.

Для Азово-Черноморского региона, который, как известно, также характеризуется высокой пространственной неоднородностью [12], в ряде работ получены проекции изменения количества осадков в 21 веке. Результаты климатических расчетов, проведенных в соответствии с одним из самых неблагоприятных сценариев (A2) в рамках проекта CMIP3, продемонстрировали увеличение зимних осадков над Черным морем в 2071–2100 гг. на 15–20 % по отношению к контрольному периоду (1961–1990 гг.) [2]. Анализ региональных проекций изменения осадков показал, что для пессимистичного сценария RCP8.5, рассмотренного в рамках проекта CMIP5, к концу 21 века летние осадки уменьшатся почти до 50 %, а изменение зимних осадков будет менее выражено [4]. Как следствие, тенденции изменения среднегодовых осадков будут отрицательны и незначимы. В работе [5] приведены результаты расчетов, полученные с помощью двух региональных атмосферных моделей. Они подтвердили результаты статьи [4], которые указывают на значимое понижение количества осадков в весенне-летний период при незначимом изменении количества зимних осадков над Черным морем в 21 веке. Эти результаты получены в рамках пессимистичного сценария RCP8.5. Осадки сравнивались с осадками за контрольный период (1971–2000 гг.). Таким образом, проекции изменения количества осадков в 21 веке в Азово-Черноморском регионе неоднозначны и требуют актуализации на основе численных расчетов, выполненных в шестой фазе проекта CMIP.

Конечно, оценка будущих изменений количества региональных осадков в решающей степени зависит от выбора моделей и климатических сценариев, которые используются при ее получении [1, 17]. Анализ способности 36 моделей проекта CMIP6 адекватно воспроизводить месячные и среднегодовые величины региональных осадков, а также тенденции их изменения за исторический период, выполненный авторами в работах [10, 11], позволил отобрать лучшие численные модели для построения оптимизированных для территории Азово-Черноморского региона проекций изменения осадков. В настоящей работе с помощью отобранных климатических моделей проанализированы тенденции изменения среднегодовых величин месячных региональных осадков на середину и конец 21 века при наиболее вероятном сценарии социо-экономического развития и ограничения

эмиссии парниковых газов до конца столетия, которым является сценарий SSP2-4.5. Выбор указанного сценария основан на анализе текущего состояния правового регулирования эмиссии парниковых газов в странах, отвечающих за основную долю суммарных выбросов парниковых газов, проведенном в работе [9].

Данные и методы

В работе использованы месячные суммы осадков (выраженные в мм), полученные по результатам расчетов с использованием численных моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 (пространственное разрешение $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, 1 реализация) [28], GFDL-CM4 (пространственное разрешение $1^\circ \times 1,25^\circ$, 1 реализация) [22] и GISS-E2-1-G-p3 (пространственное разрешение $2^\circ \times 2,5^\circ$, 5 реализаций) [21], входящих в международную программу CMIP6. Выбор этих климатических моделей обусловлен тем, что они неплохо воспроизводят внутригодовой цикл и среднегодовые величины осадков над Черным морем, а также качественные тенденции их изменения в исторический период (см. ниже, а также [10, 11]). Расчеты производились для периода с 1959 по 2099 год. Данные доступны на сайте (<https://climexp.knmi.nl/>). Для сравнения с модельными результатами привлекались данные реанализа ERA5 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ за период 1959–2022 гг. [23]. Исследуемый регион ограничен координатами ($40\text{--}48^\circ$ с. ш. $26\text{--}42^\circ$ в. д.). Он выбирался таким образом, чтобы охватить не только всю Азово-Черноморскую акваторию, но и прилегающие районы суши, на которых формируется значительная часть регионального речного стока.

По данным об осадках, полученных по модели GISS-E2-1-G-p3, рассчитаны средние месячные суммы осадков по всем ее реализациям. По данным всех численных моделей о месячных величинах осадков получены их среднегодовые значения. Затем с помощью метода квантильной регрессии [13] оценены их долгопериодные тенденции за период 2030–2099 гг. для квантиля 0,5 (медиана). Определение стандартных ошибок при расчете коэффициентов медианного тренда выполнено методом бутстреп [25]. После этого рассмотрены базовый (1995–2014 гг.) и три будущих временных интервала (2030–2049, 2060–2079 и 2080–2099 гг.). Изменение количества осадков в Азово-Черноморском регионе в 21 веке рассчитывается как разность между медианными значениями климатической переменной в будущие периоды и ее значениями в базовом периоде. Статистическая значимость полученных разностных величин, представляющих собой изменения медианы количества осадков в 20-летние будущие периоды по отношению к базовому периоду, оценивалась с использованием стандартного *t*-теста Стьюдента.

Результаты

Перед тем, как перейти к анализу долгопериодных тенденций изменения среднегодовых осадков рассмотрим временные ряды среднегодовых

величин месячных осадков и сезонный цикл осадков, усредненных по акватории Черного моря, за период 1959–2022 гг. по данным выбранных численных моделей и реанализа ERA5 (рис. 1).

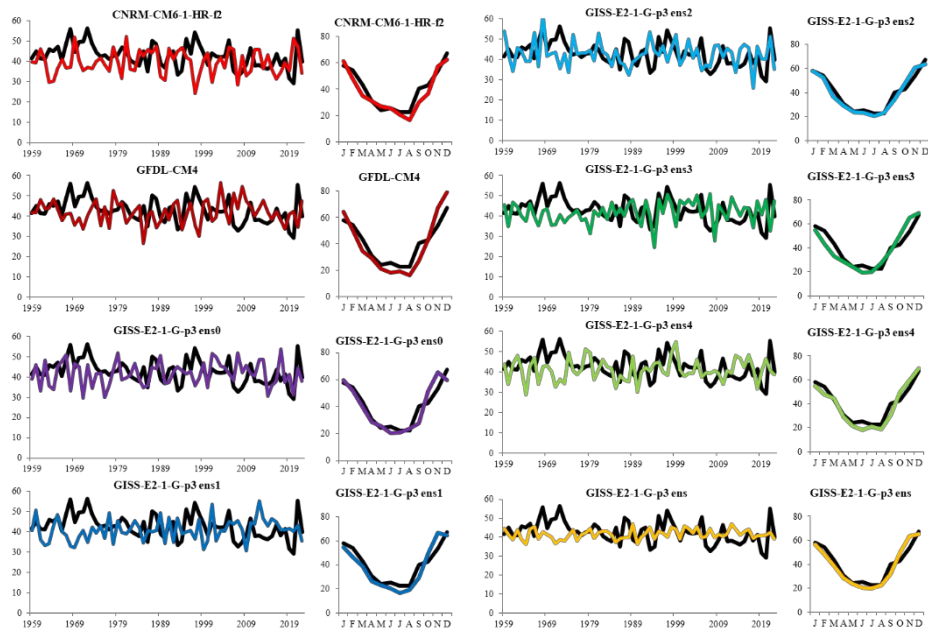


Рис. 1. Временные ряды среднегодовых величин месячных осадков (мм) (1 и 3-й столбцы) и сезонного хода осадков (мм) (2 и 4-й столбцы), усредненных по акватории Черного моря за период 1959–2022 гг. по данным реанализа ERA5 (показано черным цветом) и моделей проекта CMIP6 (цветные кривые).
Fig. 1. Annual precipitation time series (mm) (1st and 3rd columns) and monthly climatology (mm) (2nd and 4th columns) spatially averaged over the Black Sea for the period 1959–2022 based on ERA5 data (black) and CMIP6 models (colored).

Доверительный интервал медианы среднегодовых величин месячных осадков на 99%-ном уровне по данным реанализа ERA5 составляет 39,9–45,1 мм. Медиана среднегодовых осадков за исторический период по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 равна 39,9 и 42,0 мм соответственно. Для различных реализаций модели GISS-E2-1-G-p3 указанная величина изменяется в диапазоне от 40,7 (реализации ens1 и ens 4) до 42,8 мм (ens 2). При этом медиана среднегодовых величин месячных осадков для среднего по ансамблю реализаций модели GISS-E2-1-G-p3 равна 41,5 мм.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) среднегодовых величин месячных осадков по данным реанализа ERA5 составляет 5,96 мм. СКО среднегодовых осадков за рассматриваемый период по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 равно 6,13 и 5,80 мм соответственно.

Для реализаций модели GISS-E2-1-G-r3 указанная величина изменяется в диапазоне от 5,33 (ens1) до 6,26 мм (ens2). СКО среднегодовых осадков для среднего по ансамблю реализаций модели GISS-E2-1-G-r3 равно 2,64 мм.

Сезонный цикл осадков над Черным морем достаточно хорошо описывается всеми используемыми моделями. Выявлены лишь незначительные несоответствия между модельными данными и результатами реанализа. Согласно реализациям ens0 и ens1 модели GISS-E2-1-G-r3, максимум осадков в сезонном цикле отмечается в ноябре (а по данным ERA5 в декабре). Модель GFDL-CM4 несколько завышает величины осадков с ноября по январь. При этом величины месячных осадков по данным всех численных моделей находятся в пределах доверительного интервала медианы месячных осадков (на уровне значимости 99 %), полученного по данным реанализа ERA5.

Таким образом, величины медианы и амплитуды межгодовых колебаний среднегодовых осадков, а также сезонный цикл осадков в исторический период, полученные по данным рассматриваемых численных моделей, достаточно хорошо согласуются с данными реанализа. Это дает основания детально рассматривать изменение медианы среднегодовых осадков и ее долгопериодные тенденции в Азово-Черноморском регионе, ожидаемые в будущем при наиболее вероятном сценарии изменения концентрации парниковых газов в тропосфере, по данным перечисленных моделей проекта CMIP6.

Естественно, пространственное распределение величины трендов осадков в рассматриваемом регионе существенно зависит от разрешения численных моделей (рис. 2). Единственная модель, которая в большей или меньшей степени разрешает все основные особенности рельефа подстилающей поверхности Азово-Черноморского региона, включая Крымские горы, – это модель CNRM-CM6-1-HR-f2 (с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Оценка трендов, полученная с использованием этой модели, показывает, что наибольшие отрицательные коэффициенты медианного тренда среднегодовых величин месячных осадков за период 2030–2099 гг. отмечаются в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий, а также Крымских гор. В указанных регионах величины этих коэффициентов составляют менее $-0,1$ мм/год.

По данным моделей с более грубым разрешением, никаких значимых особенностей в трендах среднегодовых величин месячных осадков в районе Крымских гор (а по данным модели GFDL-CM4 и в окрестности Кавказских гор) не выявлено. Модель с самым грубым разрешением (GISS-E2-1-G-r3) показывает наличие только отрицательных трендов среднегодовых величин месячных осадков за период 2030–2099 гг. во всем Азово-Черноморском регионе со значимыми на 99%-ном доверительном уровне величинами в его южной и восточной частях. В указанных областях величины этих коэффициентов составляют около $-0,2$ мм/год. По данным модели GFDL-CM4, наряду с областями со значимыми отрицательными

трендами осадков, отмечаются также области с положительными коэффициентами медианного тренда среднегодовых величин месячных осадков (величины которых составляют более 0,06 мм/год), которые расположены к северу от Кавказских гор и в южной части Черного моря в полосе долгот 30–33° в. д. По данным двух других рассматриваемых климатических моделей эти области не выделяются.

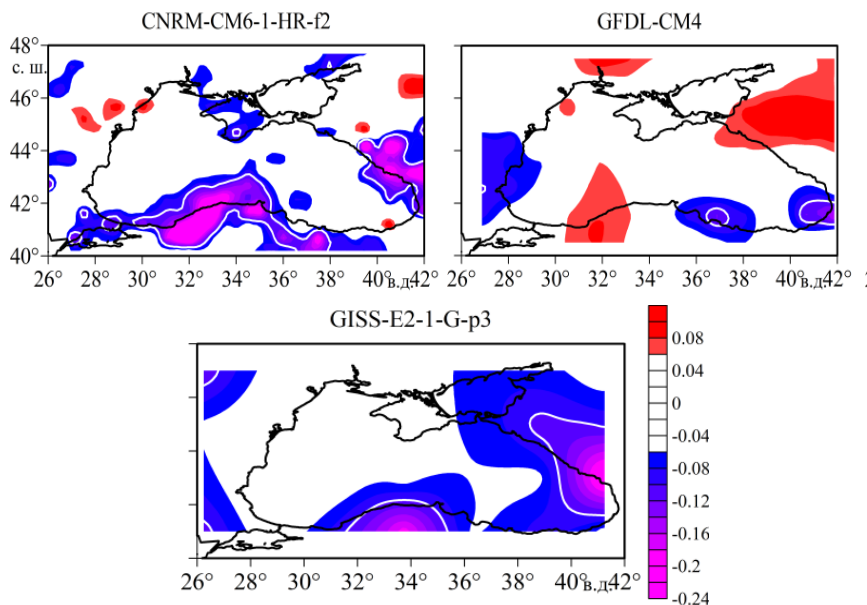


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов медианного тренда среднегодовых величин месячных осадков (мм/год) в Азово-Черноморском регионе по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G-p3 в период 2030–2099 гг. Цветом показаны значимые на уровне доверия 99 % величины коэффициентов медианного тренда. Белая изолиния показывает -0,1 мм/год.

Fig. 2. Spatial distribution of median trend coefficients of annual averaged monthly precipitation (mm/year) over the Azov-Black Sea region from the CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 and GISS-E2-1-G-p3 models for the period 2030–2099. The colors show the values of median trend coefficients that are significant at the 99 % confidence level. The white isoline shows -0.1 mm/year.

Перейдем к анализу пространственно-временной структуры изменений медианы среднегодовых осадков в будущем по отношению к базовому периоду (1995–2014 гг.) в Азово-Черноморском регионе (рис. 3) и над акваторией Черного моря (рис. 4).

В краткосрочной перспективе (2030–2049 гг.) медиана среднегодовых величин месячных осадков по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 увеличивается (относительно базового периода) в северо-западной части Азово-Черноморского региона и на востоке Черного моря. Это увеличение составляет около 4 мм.

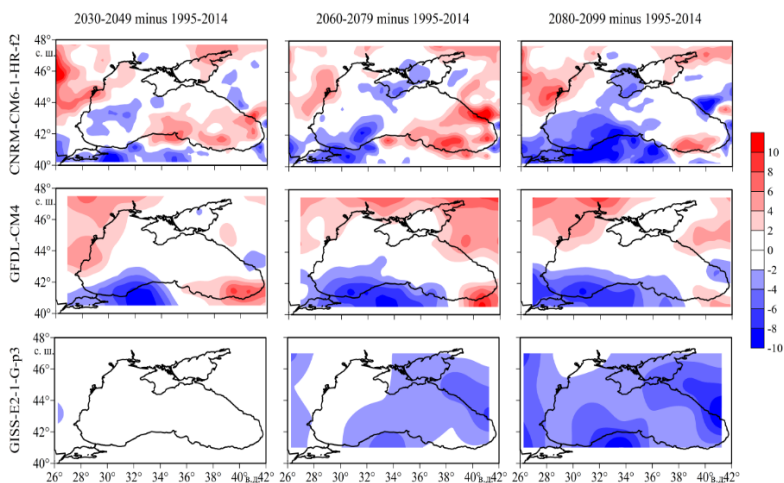


Рис. 3. Пространственное распределение будущих изменений среднегодовых величин месячных осадков (мм) в Азово-Черноморском регионе для сценария SSP2-4.5 для трех временных интервалов (2030–2049 гг., 2060–2079 гг. и 2080–2099 гг.) по сравнению с базовым периодом (1995–2014 гг.).

Fig. 3. Spatial distribution of future changes of annual averaged monthly precipitation (mm) over the Azov-Black Sea region for the SSP2-4.5 scenario for three time intervals (2030–2049, 2060–2079 and 2080–2099) compared to the present (1995–2014) climate.

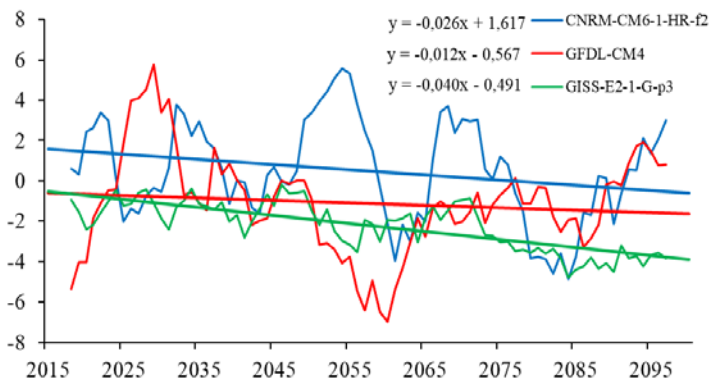


Рис. 4. Изменения среднегодовых величин месячных осадков (мм) для всего Черного моря с 2015 г. и до конца 21 века. Кривые получены путем взятия разницы значения каждого будущего года относительно среднего значения за базовый период (1995–2014 гг.) с последующим 7-летним скользящим осреднением. Прямые цветные линии – медианные тренды (для значения квантиля 0,5). На рисунке также показаны уравнения медианного тренда.

Fig. 4. Evolution of future annual values of monthly precipitation (mm) over the entire Black Sea during the 21st century. The curves are obtained by subtracting each future year's value from the mean value for the present (1995–2014) climate period and then taking the 7-year moving average thereafter. The straight colored lines are the median trends (for the 0.5 quantile value). The median trend equations are also shown in the figure.

На юго-западе рассматриваемого региона по данным указанных моделей получено уменьшение медианы среднегодовых величин месячных осадков почти на 8 мм. По данным модели GISS-E2-1-G-r3 значимого изменения медианы анализируемых осадков в краткосрочной перспективе в Азово-Черноморском регионе не обнаружено.

В среднесрочной перспективе (2060–2079 гг.) медиана среднегодовых величин месячных осадков по данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 увеличивается в восточной части Черного моря по отношению к базовому периоду почти на 4 мм, но уменьшается на юго-западе рассматриваемого региона и в окрестности Крымского полуострова. В этот период по данным модели GFDL-CM4 северная часть и небольшая область на юго-востоке Азово-Черноморского региона характеризуется увеличением медианы среднегодовых величин месячных осадков, а юг и юго-запад рассматриваемого региона – уменьшением. По данным модели GISS-E2-1-G-r3 уменьшение медианы анализируемых осадков отмечается в центральной и восточной частях Азово-Черноморского региона с максимумами в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий (свыше 4 мм).

В долгосрочной перспективе (2080–2099 гг.) медиана среднегодовых величин месячных осадков по данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 увеличивается относительно базового периода в небольших по площади областях в северо-восточной и северо-западной частях Азово-Черноморского региона и на юго-востоке Черного моря. Уменьшение медианы анализируемых осадков отмечается на Анатолийском и Кавказском побережье, в окрестности Крымского полуострова и центральной и западной частях Черного моря. В этот период по данным модели GFDL-CM4 северо-западная и северо-восточная части Азово-Черноморского региона характеризуются увеличением среднегодовых осадков, а юг и юго-запад рассматриваемого региона – их уменьшением. По данным модели GISS-E2-1-G-r3 значимое уменьшение осадков охватывает почти весь Азово-Черноморский регион с максимумами в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий (свыше 6 мм).

Модели CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 с относительно высоким ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) и средним ($1^\circ \times 1,25^\circ$) пространственным разрешением, соответственно, указывают на наличие интенсивной междесятилетней изменчивости среднегодовых осадков над Черным морем. По данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 максимум междесятилетнего цикла приходится на 2054 год (+5,6 мм относительно базового периода), а минимум – на 2084 год (-4,8 мм относительно базового периода). По данным модели GFDL-CM4 соответствующий максимум приходится на 2029 год (+5,8 мм относительно базового периода), а минимум – на 2060 год (-6,9 мм относительно базового периода). В модели GISS-E2-1-G-r3 с более грубым пространственным разрешением ($2^\circ \times 2,5^\circ$) междесятилетняя изменчивость характеризуется значительно меньшей амплитудой. Отметим, что для фильтрации интенсивной межгодовой изменчивости временные ряды разницы количества

среднегодовых осадков за каждый будущий год относительно среднего значения за базовый период были предварительно сглажены 7-летним скользящим средним.

Наряду с междесятилетней изменчивостью, временная эволюция среднегодовых осадков для Черного моря в течение 21 века характеризуется отрицательным медианным трендом по всем анализируемым численным моделям. По данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 медианный тренд значим на 95%-ном доверительном уровне. Величина соответствующего коэффициента для среднегодовых величин месячных осадков равна $-0,026$ мм/год. Это означает, что вероятное уменьшение количества региональных месячных осадков в среднем за год к концу 21 века составит около 1,8 мм относительно базового периода (или около 22 мм для годовых сумм осадков). По данным модели GFDL-CM4 медианный тренд также отрицателен, хотя и статистически незначим на 95 %-ном доверительном уровне. Соответствующий коэффициент по абсолютной величине примерно вдвое меньше приведенного выше коэффициента, рассчитанного по данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2. Медианный тренд, оцененный по данным модели GISS-E2-1-G-r3, значим на 99%-ном доверительном уровне. Величина его коэффициента для среднегодовых величин месячных осадков равна $-0,040$ мм/год. Это означает, что вероятное уменьшение количества месячных осадков в среднем за год над Черным морем к концу 21 века (относительно базового периода) составит по данным модели GISS-E2-1-G-r3 около 2,8 мм (или около 34 мм для годовых сумм осадков).

Выводы

Проанализированы численные оценки изменения количества среднегодовых осадков для Азово-Черноморского региона в 21 веке с использованием моделей CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G-r3, участвующих в международной программе CMIP6. Эти модели адекватно воспроизводят медиану и амплитуду межгодовых колебаний среднегодовых осадков над Черным морем и их сезонный цикл в исторический период (1959–2022 гг.), полученные по данным реанализа ERA5. Основные результаты анализа сводятся к следующему.

Модельные расчеты указывают на наличие междесятилетних изменений количества осадков в Азово-Черноморском регионе в течение 21 века значительной амплитуды. Наличие выраженной низкочастотной изменчивости может сильно влиять на величину будущих изменений осадков при выборе разных временных интервалов для расчета трендов. Причем фазы этих квазипериодических мод не совпадают по результатам численных расчетов с использованием разных климатических моделей. Вместе с тем долговременные тенденции ожидаемых к концу 21 века изменений среднегодовых величин месячных осадков над Черным морем начиная с 2015 года согласованы по трем отобраным численным моделям и характеризуются отрицательным медианным трендом. В целом, к концу 21 века вероятно

уменьшение среднегодовых величин месячных (годовых) сумм осадков над Черным морем от 1,8 мм (около 22 мм) согласно модели CNRM-CM6-1-HR-f2 до 2,8 мм (около 34 мм) согласно модели GISS-E2-1-G-r3.

Рассматриваемые численные модели показывают значимое на 99%-ном доверительном уровне уменьшение количества среднегодовых величин месячных осадков в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий в период 2030–2099 гг. Вероятное уменьшение среднегодовых величин месячных (годовых) сумм осадков к концу 21 века в этих регионах составит почти 7 мм (более 80 мм).

В краткосрочной перспективе (2030–2049 гг.) по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 отмечается значимое увеличение медианы среднегодовых величин месячных осадков в северо-западной части Азово-Черноморского региона и на востоке Черного моря (почти на 4 мм). В то же время ожидается значимое уменьшение медианы осадков на юго-западе рассматриваемого региона (почти на 8 мм) по отношению к базовому периоду. В долгосрочной перспективе (2080–2099 гг.) по данным всех моделей ожидается значимое уменьшение медианы среднегодовых осадков на юге и юго-западе рассматриваемого региона.

Авторы статьи выражают глубокую признательность анонимному рецензенту за полезные рекомендации, позволившие улучшить первый вариант статьи, и редакции за оперативное и профессиональное рассмотрение рукописи.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (№ госрегистрации 124020100120-9).

The study was supported by state assignment of Institute of natural and technical systems (Project Reg. No. 124020100120-9).

Список литературы

1. *Алешина М.А., Семенов В.А.* Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8, № 4. С. 424–440. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-4-424-440
2. *Анисимов А.Е., Ефимов В.В.* Численные оценки изменения осадков в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 6. С. 45–58.
3. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 430 с.
4. *Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е.* Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2 (182). С. 3–14.
5. *Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е., Барабанов В.С.* Региональные проекции изменений климата в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 5 (185). С. 53–72.
6. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
7. *Леонов А.К.* Региональная океанография. Часть 1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 765 с.

8. Матишов Г.Г., Абраменко М.И., Гаргона Ю.М., Буфетова М.В. Новейшие экологические феномены в Азовском море (вторая половина XX века). Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2003. 441 с.

9. Пекарникова М.Е., Полонский А.Б. Анализ реалистичности достижения основной цели Парижского соглашения при существующей системе правового регулирования и контроля за антропогенными выбросами парниковых газов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 2. С. 190-208. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-2-190-208

10. Полонский А.Б., Сухонос П.А. О воспроизводимости тенденций изменения осадков над Черным морем моделями CMIP6 // *Системы контроля окружающей среды*. 2024. № 4 (58). С. 16-27. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-4-16-27

11. Полонский А.Б., Сухонос П.А. О воспроизведении сезонного хода и среднегодовых осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6 // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2025. № 1 (395). С. 51-69. DOI: 10.37162/2618-9631-2025-1-51-69

12. *Справочник по климату Черного моря*. М.: Гидрометеиздат, 1974. 406 с.

13. Тимофеев А.А., Стерин А.М. Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 5. С. 27-41.

14. Almazroui M., Islam M.N., Saeed F., Saeed S., Ismail M., Azhar Ehsan M., Diallo I., O'Brien E., Ashfaq M., Martínez-Castro D., Cavazos T., Cerezo-Mota R., Tippet M.K., Gutowski Jr. W.J., Alfaro E.J., Hidalgo H.G., Vichot-Llano A., Campbell J.D., Kamil S., Rashid I.U., Bamba Sylla M., Stephenson T., Taylor M., Barlow M. Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs // *Earth Syst. Environ.* 2021. Vol. 5. P. 1-24. DOI: 10.1007/s41748-021-00199-5

15. Almazroui M., Saeed F., Saeed S., Islam M.N., Ismail M., Klutse N.A.B., Siddiqui M.H. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6 // *Earth Syst. Environ.* 2020. Vol. 4. P. 455-475. DOI: 10.1007/s41748-020-00161-x

16. Almazroui M., Saeed S., Saeed F., Islam M.N., Ismail M. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6 // *Earth Syst. Environ.* 2020. Vol. 4. P. 297-320. DOI: 10.1007/s41748-020-00157-7

17. Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs // *J. Water Clim. Change*. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 103-113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081

18. Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblás-Reyes F.J. How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? // *Geophys. Res. Lett.* 2023. Vol. 50. P. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466

19. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9, no. 5. P. 1937-1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016

20. Eyring V., Cox P.M., Flato G.M., Gleckler P.J., Abramowitz G., Caldwell P., Collins W.D., Gier B.K., Hall A.D., Hoffman F.M., Hurtt G.C., Jahn A., Jones C.D., Klein S.A., Krasting J.P., Kwiatkowski L., Lorenz R., Maloney E., Meehl G.A., Pendergrass A.G., Pincus R., Ruane A.C., Russell J.L., Sanderson B.M., Santer B.D., Sherwood S.C., Simpson I.R., Stouffer R.J., Williamson M.S. Taking climate model evaluation to the next level // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 102-110. DOI: 10.1038/s41558-018-0355-y

21. GISS. NASA-GISS GISS-E2-1-G-CC model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.11657

22. Guo H., John J.G., Blanton C., McHugh C., Nikonov S., Radhakrishnan A., Rand K., Zadeh N.T., Balaji V., Durachta J., Dupuis C., Menzel R., Robinson T., Underwood S., Vahlenkamp H., Dunne K.A., Gauthier P.P.G., Ginoux P., Griffies S.M., Hallberg R., Harrison M., Hurlin W., Lin P., Malyshev S., Naik V., Paulot F., Paynter D.J., Ploshay J., Schwarzkopf D.M., Seman C.J., Shao A., Silvers L., Wyman B., Yan X., Zeng Y., Adcroft A., Dunne J.P., Held I.M., Krasting J.P., Horowitz L.W., Milly C., Shevliakova E., Winton M., Zhao M., Zhang R. NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Version 20190318. Earth System Grid Federation. 2018. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.9263

23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146, no 730. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803

24. Jiang J., Zhou T., Chen X., Zhang L. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15, no. 5. P. 054009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7d03

25. Koenker R. Quantile Regression. Econometric Society Monographs. Cambridge, 2005. 349 p.

26. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *J. Mar. Syst.* 2006. Vol. 60, no. 3-4. P. 235-254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011

27. Polonsky A., Belokopytov V., Dzhiganshin G. Low-frequency variability of hydrological fields in the North West Black Sea // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes (Varna, Bulgaria, 14-18 November 1995): proc. – Varna, 1995.*

28. Voldoire A. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1-HR model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.1385

29. Yang X.L., Zhou B.T., Xu Y., Han Z.-Y. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China // *Adv. Atmos. Sci.* 2021. Vol. 38, no. 5. P. 817-830. DOI: 10.1007/s00376-021-0351-4

References

1. Aleshina M.A., Semenov V.A. Izmeneniya kharakteristik osadkov na territorii Rossii v XX–XXI vv. po dannym ansamblya modeley CMIP6 [Changes in precipitation characteristics over Russia in XX-XXI centuries from CMIP6 models ensemble]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 424-440 [in Russ.]. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-4-424-440.

2. Anisimov A.Ye., Yefimov V.V. Chislennyye otsenki izmeneniya osadkov v Chernomorskom regione v XXI stoletii [Numerical estimates of precipitation changes in the Black Sea region in the 21st century]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2012, no. 6, pp. 45-58 [in Russ.].

3. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR. T. IV. Chernoye more. Vyp.1. Hidrometeorologicheskiye usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. IV. Black Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 1991, 430 p. [in Russ.].*

4. Yefimov V.V., Volodin Ye.M., Anisimov A.Ye. Modelirovaniye izmeneniy klimata v Chernomorskom regione v XXI stoletii [Modeling climate change in the Black Sea region in the 21st century]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, no. 2 (182), pp. 3-14 [in Russ.].

5. Yefimov V.V., Volodin Ye.M., Anisimov A.Ye., Barabanov V.S. Regional'nyye proyeksii izmeneniy klimata v Chernomorsko-Kaspiyskom regione v kontse XXI stoletiya [Regional projections of climate change in the Black Sea-Caspian region at the end of the 21st century]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, no. 5, vol. 185, pp. 53-72 [in Russ.].

6. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Okeanografiya Chernogo moray [Oceanography of the Black Sea]. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika publ., 2011, 212 p. [in Russ.].

7. Leonov A.K. Regional'naya okeanografiya. Chast' 1. Beringovo, Okhotskoye, Yaponskoye, Kaspiyskoye i Chernoye moray [Regional oceanography. Part 1. Bering, Okhotsk, Japanese, Caspian and Black Seas]. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1960, 765 p. [in Russ.].

8. Matishov G.G., Abramenko M.I., Gargopa YU.M., Bufetova M.V. Noveyshiye ekologicheskiye fenomeny v Azovskom more (vtoraya polovina XX veka) [The latest ecological phenomena in the Sea of Azov (second half of the 20th century)]. Apatity: Kol'skiy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk publ., 2003, 441 p. [in Russ.].

9. Pekarnikova M.E., Polonskiy A.B. Analiz realistichnosti dostizheniya osnovnoy tseli Parizhskogo soglasheniya pri sushchestvuyushchey sisteme pravovogo regulirovaniya i kontrolya za antropogennymi vybrosami parnikovykh gazov [Analysis of the realism of achieving the main goal of the Paris Agreement with the existing system of legal regulation and control over anthropogenic greenhouse gas emissions]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 190-208 [in Russ.]. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-2-190-208.

10. Polonsky A.B., Sukhonos P.A. O vosproizvedenii sezonnogo khoda i srednegodovykh osadkov nad Chernym morem po dannym modeley proyekta CMIP6 [On the reproduction of the seasonal cycle and average annual precipitation over the Black Sea using data from the CMIP6 project models]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, no. 1 (395), pp. 51-69 [in Russ.]. DOI: 10.37162/2618-9631-2025-1-51-69.

11. Polonskiy A.B., Sukhonos P.A. O vosproizvodimosti tendentsiy izmeneniya osadkov nad Chornym morem modeleyami CMIP6 [On the reproducibility of precipitation change trends over the Black Sea using CMIP6 models]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2024, no. 4 (58), pp. 16-27 [in Russ.]. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-4-16-27.

12. *Spravochnik po klimatu Chernogo morya* [Guidebook on the climate of the Black Sea]. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1974, 406 p. [in Russ.].

13. Timofeev A.A., Sterin A.M. Using the quantile regression method to analyze changes in climate characteristics. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 310-319. DOI: 10.3103/S106837391005002X.

14. Almazroui M., Islam M.N., Saeed F., Saeed S., Ismail M., Azhar Ehsan M., Diallo I., O'Brien E., Ashfaq M., Martínez-Castro D., Cavazos T., Cerezo-Mota R., Tippet M.K., Gutowski Jr. W.J., Alfaro E.J., Hidalgo H.G., Vichot-Llano A., Campbell J.D., Kamil S., Rashid I.U., Bamba Sylla M., Stephenson T., Taylor M., Barlow M. Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 5, pp. 1-24. DOI: 10.1007/s41748-021-00199-5.

15. Almazroui M., Saeed F., Saeed S., Islam M.N., Ismail M., Klutse N.A.B., Siddiqui M.H. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 2020, vol. 4, pp. 455-475. DOI: 10.1007/s41748-020-00161-x.

16. Almazroui M., Saeed S., Saeed F., Islam M.N., Ismail M. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 2020, vol. 4, pp. 297-320. DOI: 10.1007/s41748-020-00157-7.

17. Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, vol. 7, no. 1. pp. 103-113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081.

18. Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblas-Reyes F.J. How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? *Geophysical Research Letters*, 2023, vol. 50. pp. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466.

19. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 5. pp. 1937-1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

20. Eyring V., Cox P.M., Flato G.M., Gleckler P.J., Abramowitz G., Caldwell P., Collins W.D., Gier B.K., Hall A.D., Hoffman F.M., Hurtt G.C., Jahn A., Jones C.D., Klein S.A., Krasting J.P., Kwiatkowski L., Lorenz R., Maloney E., Meehl G.A., Pendergrass A.G., Pincus R., Ruane A.C., Russell J.L., Sanderson B.M., Santer B.D., Sherwood S.C., Simpson I.R., Stouffer R.J., Williamson M.S. Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 2. pp. 102-110. DOI: 10.1038/s41558-018-0355-y.

21. GISS. NASA-GISS GISS-E2-1-G-CC model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.11657.

22. Guo H., John J.G., Blanton C., McHugh C., Nikonov S., Radhakrishnan A., Rand K., Zadeh N.T., Balaji V., Durachta J., Dupuis C., Menzel R., Robinson T., Underwood S., Vahlenkamp H., Dunne K.A., Gauthier P.P.G., Ginoux P., Griffies S.M., Hallberg R., Harrison M., Hurlin W.,

Lin P., Malyshev S., Naik V., Paulot F., Paynter D.J., Ploshay J., Schwarzkopf D.M., Seman C.J., Shao A., Silvers L., Wyman B., Yan X., Zeng Y., Adcroft A., Dunne J.P., Held I.M., Krasting J.P., Horowitz L.W., Milly C., Shevliakova E., Winton M., Zhao M., Zhang R. NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Version 20190318. Earth System Grid Federation, 2018. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.9263.

23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730. pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

24. Jiang J., Zhou T., Chen X., Zhang L. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 5. pp. 054009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7d03

25. Koenker R. Quantile Regression. *Econometric Society Monographs*. Cambridge, 2005. 349 p.

26. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *Journal of Marine Systems*, 2006, vol. 60, no. 3-4. pp. 235-254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.

27. Polonsky A., Belokopytov V., Dzhiganshin G. Low-frequency variability of hydrological fields in the North West Black Sea // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes (Varna, Bulgaria, 14-18 November 1995): proc. – Varna, 1995.

28. Voldoire A. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1-HR model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.1385

29. Yang X.L., Zhou B.T., Xu Y., Han Z.-Y. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, vol. 38, no. 5. pp. 817-830. DOI: 10.1007/s00376-021-0351-4.

Поступила 29.04.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 29.04.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-121-140>

УДК 551.5:556

Оперативная гидрология в деятельности Всемирной метеорологической организации

Ю.А. Симонов

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

Приводится обзор деятельности Всемирной метеорологической организации (ВМО), направленной на поддержку национальных гидрометеорологических служб (НГМС) в области оперативной гидрологии: от наблюдений, обработки данных, подготовки и формирования информационной продукции до выпуска гидрологических прогнозов, выполнения гидрологических расчетов, а также оценки и управления водными ресурсами. Рассмотрена современная повестка дня ВМО в области гидрологии, цели и задачи целевых групп экспертов, некоторые проекты и инициативы, в том числе Инициатива по заблаговременным предупреждениям для всех, программа по цифровой трансформации НГМС, а также аспекты частного и государственного партнерства. Приводится анализ организационной структуры ВМО в области гидрологии.

Ключевые слова: Всемирная метеорологическая организация, оперативная гидрология, международное сотрудничество

Activities of the World Meteorological Organization in the field of operational hydrology

Yu.A. Simonov

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

An overview of the activities of the World Meteorological Organization (WMO) aimed at supporting National Hydrometeorological Services (NMHSs) in the field of operational hydrology is provided: from observations, data processing, preparation and formation of information products to hydrological forecasts, calculations, as well as the assessment and management of water resources. The current WMO agenda in the field of hydrology, the goals and objectives of working groups of experts, some projects and initiatives, including the Early Warning for All Initiative, the digital transformation program for NMHSs, as well as aspects of private and public partnerships are considered. An analysis of the organizational structure of WMO in the field of hydrology is provided.

Keywords: World Meteorological Organization, operational hydrology, international cooperation

Введение

Задачи оперативной гидрологии являются одними из ключевых задач Национальных гидрометеорологических служб (НГМС). Согласно оценкам ВМО и выводам ряда международных организаций, только от паводков и наводнений на реках ежегодный ущерб в мире исчисляется десятками

миллиардов долларов, на подверженных паводкам территориях проживает около 2,5 млрд человек, а частота возникновения серьезных наводнений только увеличивается [21]. Основными потребителями гидрологической продукции являются федеральные органы власти, министерства и ведомства по делам гражданской обороны, водное хозяйство, гидроэнергетика, сельское хозяйство, ирригация, водный транспорт. Своевременная и качественная информационно-аналитическая и прогностическая продукция позволяет обеспечить безопасное и устойчивое социально-экономическое развитие. По этой причине подготовка и доведение до пользователей гидрологической продукции в современной детализированной форме относятся к стратегическому кругу вопросов НГМС.

Для определения круга задач НГМС стран-членов ВМО в области оперативной гидрологии – на экстраординарной сессии Всемирного метеорологического конгресса в 2021 г. [4] было утверждено Перспективное видение, Стратегия и соответствующий План действий в области гидрологии (далее – План действий), сформулированные на основе предложений НГМС в рамках следующих крупных направлений [5]:

- все предупреждены о паводках;
- все готовы к маловодью;
- гидрометеорологические данные и информация поддерживают программу продовольственной безопасности;
- высококачественные данные поддерживают науку;
- наука обеспечивает прочную основу для оперативной гидрологии;
- мы обладаем глубокими знаниями о водных ресурсах нашего мира;
- устойчивое развитие поддерживается информацией, охватывающей весь гидрологический цикл;
- качество воды известно.

Основной целью ВМО в области гидрологии является поддержка НГМС таким образом, чтобы к 2030 году мировое сообщество на основе совместных действий успешно справлялось с проблемами, связанными с экстремальными гидрологическими явлениями, наличием и качеством водных ресурсов и продовольственной безопасностью путем развития оперативной гидрологии. Достижение цели будет обеспечиваться совершенствованием науки, инфраструктуры, наращиванием потенциала и соответствующих видов обслуживания в контексте устойчивого развития и повышения устойчивости [5].

Для выполнения Плана действий ВМО располагает двумя техническими комиссиями и Советом по исследованиям (рис. 1):

- Техническая комиссия по наблюдениям, инфраструктуре и информационным системам (ИНФКОМ);
- Техническая комиссия по обслуживанию и применениям в областях погоды, климата, гидрологии, морской метеорологии и сопутствующих областях окружающей среды (СЕРКОМ);
- Совет по исследованиям.

В рамках технических комиссий и Совета по исследованиям действуют вспомогательные органы, представленные экспертами НГМС, академических институтов и международных организаций. К вспомогательным органам относятся постоянные комитеты, консультативные и рабочие группы, нацеленные на решение конкретных задач Плана действий в области оперативной гидрологии.



Рис. 1. Структура рабочих органов ВМО (адаптировано из <https://wmo.int/>).
Fig. 1. Working bodies of the WMO (<https://wmo.int/>).

Работа экспертных групп ведется по многим направлениям для обеспечения поддержки Членов ВМО для увеличения эффективности обслуживания пользователей, в том числе выполняется координация и поддержка функционирования центров данных ВМО, реализуются проекты и программы по прогнозированию, оценке водных ресурсов, наблюдениям, расчетам стока. Немаловажная часть работ посвящена разработке нормативных материалов, включая актуализацию Технического регламента ВМО, многочисленных руководств и наставлений. Проводится укрепление потенциала в области гидрологии посредством проведения обучающих курсов, создания учебных материалов и предоставления экспертной поддержки. Ниже в статье представлены некоторые примеры деятельности ВМО в области гидрологии, всеобъемлющий список приведен на веб-странице организации (<https://wmo.int/>), а также в отчётных материалах технических комиссий, Совета по исследованиям и Всемирного метеорологического конгресса, с которыми можно ознакомиться в электронной библиотеке ВМО (<https://library.wmo.int/>).

Экспертные группы в области гидрологии

Общая координация деятельности ВМО в области гидрологии осуществляется *Координационной группой экспертов по гидрологии*. Этой группой также производится оценка выполнения Плана действий ВМО в области гидрологии, распределение обязанностей по реализации того или иного пункта Плана действий ВМО между рабочими органами в области гидрологии в СЕРКОМ, ИНФКОМ и Совета по исследованиям (рис. 2).

Основной целью *Постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию* (ПК-ГИД) является развитие проектов в области гидрологического прогнозирования и оценки водных ресурсов, разработка руководств, сопутствующих материалов в области оперативной гидрологии и управления водными ресурсами для нужд НГМС стран-членов ВМО (<https://community.wmo.int/en/governance/commission-membership/sercom/sc-hydrology>). К кругу ведения ПК-ГИД относится обзор и обновление руководящих материалов ВМО в части гидрологического обслуживания (Технический регламент, наставления, руководства); развитие и внедрение сообщества практиков в области прогностической гидрологии, оценки водных ресурсов [13], предсказания маловодья; реализация программ в области гидрологического прогнозирования – Инициативы ВМО по прогнозированию паводков и Глобальной системы для оценки текущей гидрологической ситуации и ее ориентировочного прогнозирования (ГидроСОП), вклад со стороны гидрологии в Инициативу “Заблаговременные предупреждения для всех”; вклад в программу развития криосферы, подготовка ежегодного Глобального отчета по водным ресурсам и многие другие задачи [6].

На СЕРКОМ-3 было принято создать *Объединенную группу экспертов по криосферному обслуживанию*, которая будет заниматься вопросами гидрометеорологического обслуживания, связанного с элементами криосферы, как в разрезе континентальном, так и на территории морей и океанов.

Группа охватывает ряд вопросов, в том числе прогнозирования опасных явлений (подтопления талым стоком, снегодождевые паводки, ледовые заторы, прорывные наводнения ледниковых озер, айсбергов и проч.), вопросы, связанные с изменением климата и его влиянием на элементы криосферы Земли – сокращение горного оледенения, угнетение вечной мерзлоты, подъем уровня моря, связанного с таянием льдов и другие вопросы.

Учреждение *Консультативной группы Инициативы ВМО по прогнозированию паводков* ставило целью повысить эффективность осуществления инициативы ВМО по прогнозированию паводков для усиления потенциала НГМС в части совместного предоставления своевременной и более точной продукции и обслуживания, которые необходимы для прогнозирования паводков и предупреждения о них, а также для сотрудничества с представителями ведомств по чрезвычайным ситуациям.

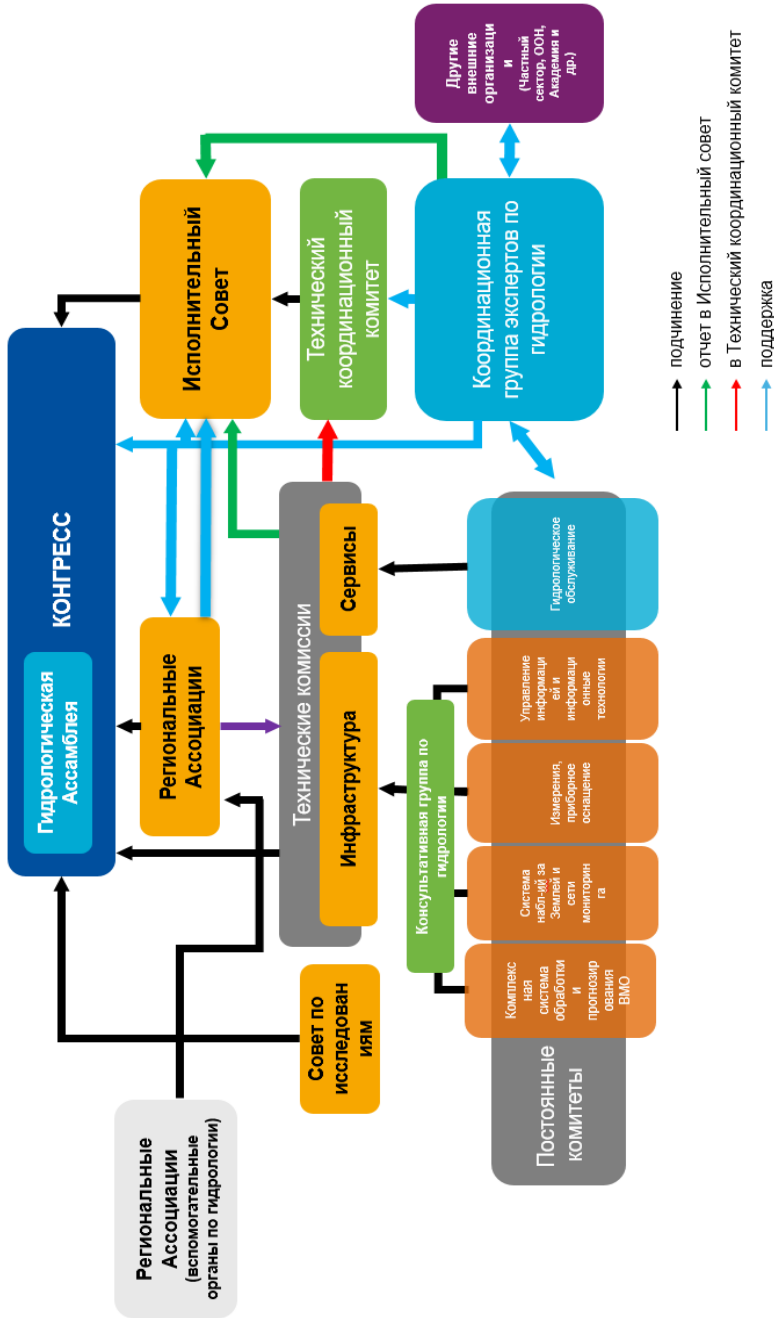


Рис. 2. Рабочие органы ВМО в области оперативной гидрологии (по материалам Секретариата ВМО).
 Fig. 2. Working bodies of the WMO in the field of operational hydrology (based on information from WMO Secretariat).

Консультативной группы Инициативы ВМО по прогнозированию паводков действует как многоплановая консультативная группа, предоставляющая руководящие указания и рекомендации по элементам гидрологического прогнозирования в рамках нескольких инициатив ВМО, связанных с наводнениями, и обеспечивает широкую поддержку для улучшения сотрудничества между метеорологическим и гидрологическим сообществами в интересах совершенствования практики прогнозирования паводков. К основной цели Консультативной группы относится рассмотрение концепции, цели, ожидаемых выгоды/затрат, стратегии, плана действий и будущее развитие Инициативы по прогнозированию паводков ВМО и ее основных компонент (проекты по прогнозированию паводков ФФГС, прибрежные наводнения и т. д.) и предоставление консультаций по этим вопросам, предлагая по мере необходимости корректирующие меры и консультируя СЕРКОМ в вопросах реализации Перспективного видения и Стратегии ВМО в области гидрологии и соответствующего Плана действий применительно к деятельности.

Консультативная группа по гидрологии призвана выполнять координацию между внедрением программ по наблюдениям, данным, информационным системам в рамках технической комиссии по инфраструктуре (ИНФКОМ). *Группа экспертов по оперативным гидрологическим прогнозистическим системам* относится к постоянному комитету Системы ВМО по интегрированной обработке данных и прогнозированию (WIPPS) и отвечает за подготовку требований и реализацию глобальных и региональных центров гидрологического прогнозирования в рамках системы WIPPS ВМО.

Рабочая группа по гидрологии Совета по исследованиям выполняет научные проекты и исследования (в том числе посредством пилотных проектов) в гидрологии для ускорения внедрения научных достижений в оперативную гидрологию, например, в части деятельности ВМО по поддержке НГМС в процессе управления паводками [16].

Вклад оперативной гидрологии в Инициативу “Заблаговременные предупреждения для всех”

Большинство задач, указанных в Плате действий, направлены на улучшение систем гидрологического прогнозирования и раннего предупреждения, в частности прогнозирования и оповещения о риске формирования паводков различного происхождения, а также о формировании неблагоприятно и опасно низкой водности на реках. Поддержка развития национальных систем раннего оповещения является фундаментом для реализации Инициативы “Заблаговременные предупреждения для всех”, результатом которой должно явиться своевременное и эффективное предупреждение об опасных явлениях гидрометеорологического характера. Реализация инициативы осуществляется на нескольких уровнях – на глобальном уровне создана “Глобальная система оповещения о многих опасных

явлениях” (GMAS), которая интегрирует в себе все штормовые предупреждения, выпускаемые НГМС, например в рамках системы «Метеопредупреждения» Росгидромета (<https://meteoinfo.ru/hdmapsmeteoalarmszfo>), и выполняет отображение оповещений в рамках т. н. монитора опасных явлений (рис. 3).

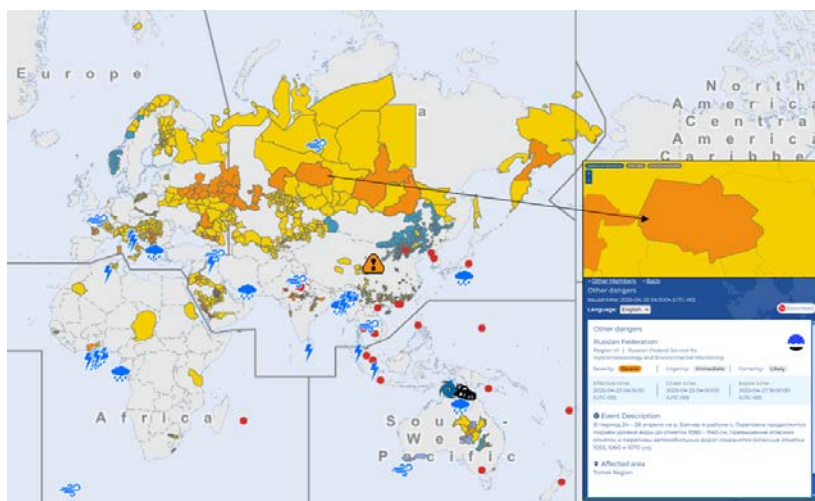


Рис. 3. Глобальная система оповещения о многих опасных явлениях (<https://severeweather.wmo.int/>).

Fig. 3. Global Multi-Hazard Alert System (<https://severeweather.wmo.int/>).

На национальном уровне План действий по гидрологии содействует поддержке и развитию систем заблаговременных предупреждений НГМС об опасных явлениях гидрологического характера путем предоставления моделей, методов и технологий гидрологического прогнозирования; реализации пилотных проектов в области прогнозов; реализации систем прогнозирования быстроразвивающихся паводков; а также путем усиления потенциала НГМС в части гидрологического мониторинга, прогнозирования, вопросов оценки и управления водными ресурсами.

Проекты в области гидрологии

Система раннего предупреждения о быстроразвивающихся паводках FFGS

Быстроразвивающиеся паводки относятся к одним из наиболее опасных явлений гидрологического характера, они формируются в горных районах на небольших водосборах при выпадении интенсивных ливней и характеризуются высокой скоростью формирования (как правило до 6 часов с момента начала дождя). Начиная с 2004 года ВМО совместно с партнерами выполняет разработку и внедрения системы прогнозирования паводков (FFGS) путем внедрения специализированных моделей в НГМС,

подверженных таким наводнениям [23]. При этом используется максимально возможный набор метеорологической продукции, в том числе выходная продукция численных прогнозов погоды, радарные данные и спутниковая информация (рис. 4). Система предоставляет информацию о риске формирования паводков на малых горных водосборах и таким образом служит дополнительным источником информации для национальных систем заблаговременного предупреждения о паводках и наводнениях.

В качестве входной информации система использует фактические данные об осадках и температуре воздуха на сети метеорологических станций, радарную информацию (при наличии), спутниковую продукцию об осадках для формирования поля осадков, метеорологический прогноз (либо метеорологическую модель НГМС, либо метеорологические прогнозы региональных моделей). В качестве расчетной основы используется гидрологическая модель SACSMA совместно с моделью динамики снежного покрова SNOW-17, реализованные для малых водосборов площадью от 25 до 200 км² [10]. Выполняется прогноз критического слоя стока, который приводит при данных условиях к выходу воды на пойму в замыкающем створе речного водосбора в ближайшие часы. Система реализована более чем в 80 странах.

Стоит отметить, что в последнее время программа по внедрению и поддержке системы FFGS испытывает сложности, связанные с бюджетом. Несмотря на это функционирование системы продолжается во многих странах с паводковым режимом рек в горных районах.

Пилотные проекты по прогнозу паводков ВМО - Google и центров глобальных прогнозов

Моделирование и прогноз паводков с помощью методов искусственного интеллекта в последние годы достигли существенных результатов и распространения в оперативной практике прогнозов. Следует отметить, что в данной области также и преуспели крупные компании (например, *Google*), предоставляющие выходную продукцию моделирования паводков с использованием методов глубокого обучения в рамках открытого веб-приложения *Flood Hub* (<https://sites.research.google/floods/>).

Для развития государственно-частного партнерства начиная с 2022 года разрабатывается совместный пилотный проект ВМО – *Google* для обеспечения как интересов НГМС, так и повышения эффективности моделирования и прогнозирования моделями *Google*. Эксперты постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию вовлечены в реализацию пилотного проекта, выполняемого в настоящий момент для четырех стран (Уругвай, Нигерия, Чехия и Вьетнам). Одна из целей проекта заключается в сравнении выходной продукции моделей *Google* с традиционными методами и моделями, используемыми в оперативном гидрологическом прогнозировании НГМС.

В 2025 году был дан старт пилотного проекта по прогнозированию паводков с участием глобальных центров моделирования и прогнозирования паводков, в том числе *Glofas*, *SMHI*, *Deltares*, *NASA* и *DHI*.

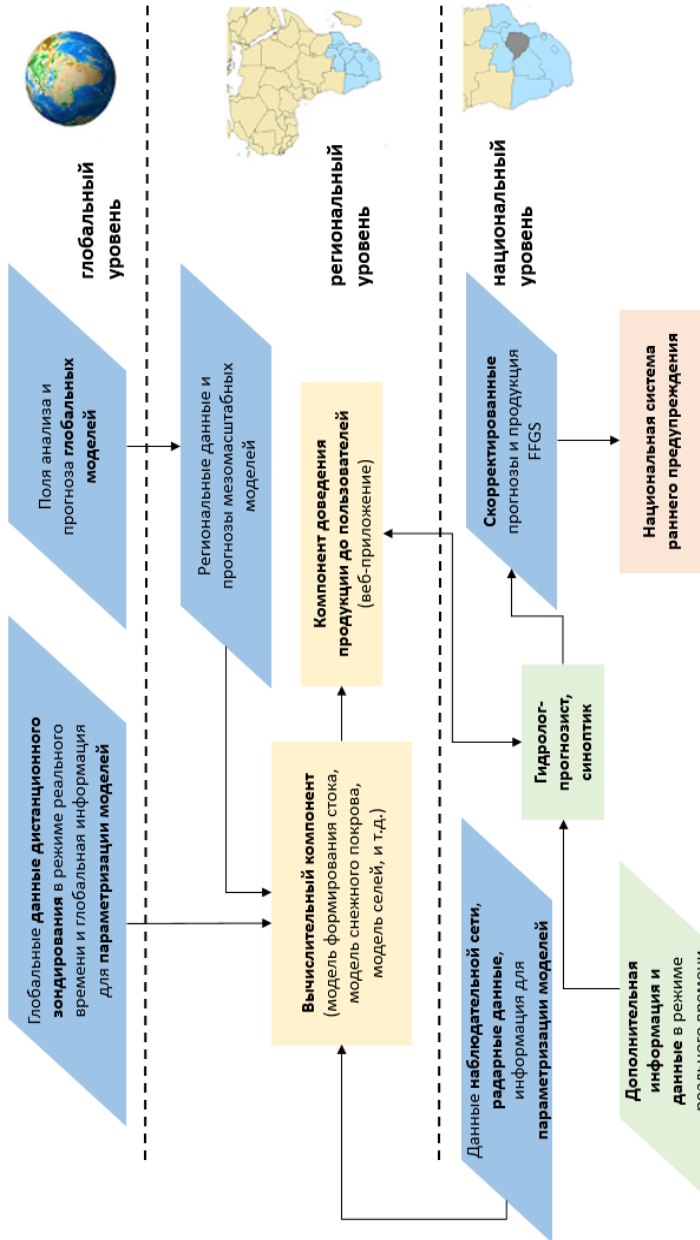


Рис. 4. Функциональная структура системы FFGS [10].
 Fig. 4. Functional structure of the FFGS [10].

В результате реализации пилотного проекта будет приведен анализ применимости выходной продукции глобальных центров в задачах оперативного гидрологического прогнозирования, а также разработан проект требований НГМС к продукции глобальных центров. На основе реализованного пилотного проекта будут сформулированы требования по включению центров глобального прогнозирования в систему ВМО по интегрированной обработке данных и прогнозированию.

Система по оценке гидрологического статуса и ориентировочного прогнозирования (ГидроСОП)

Долгосрочные гидрологические прогнозы с заблаговременностью месяц, сезон и более традиционно представляют собой большой интерес со стороны пользователей гидрологической продукции. Для поддержки НГМС ВМО разрабатывает и внедряет систему гидрологического статуса (состояния водных объектов) и так называемого «ориентировочного» прогнозирования ГидроСОП, под чем подразумевается выпуск долгосрочных прогнозов (на месяц и сезон) различных элементов характеристик водного стока рек. Основной входной информацией для системы являются данные наблюдений, поступающие в рамках Информационной системы ВМО ВИС2.0. На основе ежедневных данных расходов воды система производит расчет среднемесячных значений, а также расчет обеспеченности с использованием статистического анализа рядов. Для прогноза водности используются выходы центров глобальных прогнозов, рассмотренных выше. Показатели водности приводятся к водосборам (рис. 5). Для моделирования и выпуска долгосрочного прогноза могут быть также использованы национальные модели и методики прогноза в случае наличия и доступности их выходной продукции в системе.

Ежегодный отчет ВМО о состоянии водных ресурсов

Один из важнейших видов продукции ВМО является годовой отчет о состоянии водных ресурсов [21]. Отчет содержит сведения об аномалиях речного стока, притока воды в водохранилища, уровня озер, характеристик снежного покрова, а также осадков и температурного режима. Отдельная секция отчета посвящена опасным гидрологическим явлениям, произошедшим в отчетном году. Отчет основан на данных наблюдений Членов ВМО, также используется выходная продукция глобальных гидрологических моделей.

Несмотря на утвержденную Всемирным метеорологическим конгрессом [4] «новую» политику данных ВМО, информация о расходах воды поступает в центр данных о речном стоке ВМО далеко не от всех Членов ВМО, что существенно затрудняет производство глобальной выходной продукции (в 2024 году поступило данных о расходах воды с 713 гидрологических постов). Тем не менее на основе имеющихся данных о расходах

воды, а также информации об аномалиях стока, производится верификация глобальных гидрологических моделей и производство информационно-аналитической продукции о водности рек: на рис. 6 представлена карта аномалий речного стока в 2023 году [21].

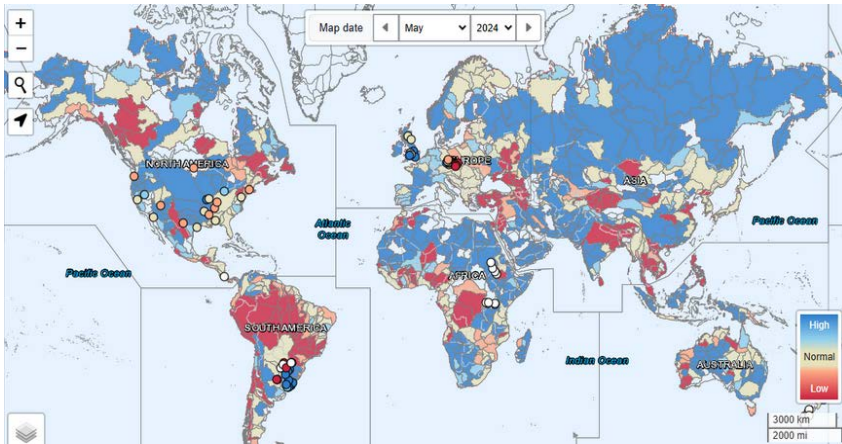


Рис. 5. Вид монитора системы ГидроСОП с указанием долгосрочного прогноза, выпущенного в конце апреля 2024 года, аномалий водности рек (синий цвет – больше нормы, бежевый – около нормы и красный – ниже нормы).
Fig. 5. HydroSoS monitor with indication of long-term streamflow forecast, issued in the end of April 2024 (blue – above average, beige – around average, red – below average).

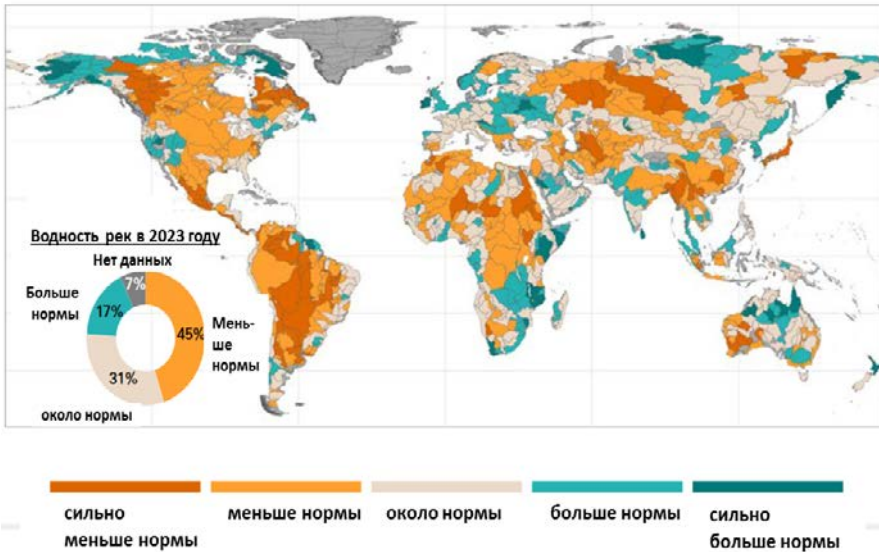


Рис. 6. Речной сток (относительно нормы) в 2023 году.
Fig. 6. Streamflow (relative to climatology) in 2023.

Согласно последнему докладу, 2023 год стал наиболее засушливым годом для рек по всему миру за последние три десятилетия, что вызывает существенные проблемы с водопотреблением и водопользованием во многих речных бассейнах, прежде всего в странах с засушливым климатом.

Система динамической оценки водных ресурсов DWAT

Начиная с 2012 года ВМО координирует разработку методов, моделей и программных средств для поддержки решений в области оценки и управления водными ресурсами. Система динамической оценки водных ресурсов (DWAT), разработанная Институтом по строительству и технологиям Республики Кореи, представляет собой комплекс моделей для оценки составляющих водного баланса речных бассейнов, реализованных в виде некоммерческих программных средств [12]. Благодаря схемам описания большинства процессов гидрологического цикла, удобного пользовательского интерфейса, доступности для загрузки и наличия руководства пользователя система DWAT зарекомендовала себя в качестве эффективного средства оценки основных составляющих водного баланса речных бассейнов в различных природных зонах. Система прошла апробацию более чем в 20 странах с различными физико-географическими и климатическими условиями, в том числе в России на территории Верхней Оки. В выполненной ФГБУ «Гидрометцентр России» работе было показано, что для условий умеренно-континентального климата русской равнины система справилась с моделированием процесса формирования стока как на суточном, так и на месячном расчетных интервалах. Применение алгоритма коррекции выходных расчетов системы DWAT существенно повышает качество прогнозирования [1] (таблица).

Таблица. Показатели качества расчетов и прогнозов среднемесячных расходов воды

Table. Monthly streamflow forecasts efficiency criteria

Среднемесячные расходы воды			Прогноз без коррекции			Прогноз с коррекцией		
Река	Створ	R	S	S/σ	NSE	S	S/σ	NSE
Упа	Орлово	0,94	21,4	0,61	0,63	12,2	0,35	0,88
Жиздра	Козельск	0,91	22,2	0,62	0,62	14,7	0,41	0,83
Угра	Товарково	0,87	65,9	0,66	0,57	48,9	0,49	0,76
Ока	Калуга	0,98	154	0,51	0,74	96,7	0,32	0,90

Примечание: R – коэффициент корреляции; S – средняя квадратическая ошибка прогноза; S/σ – показатель эффективности методики прогноза [8, 9]; NSE – показатель методики прогноза Нэша – Сатклифа [14].

На основе использования DWAT в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Оки. В таблице приведены показатели качества прогнозов среднемесячных расходов воды в створе р. Ока – г. Калуга для периода 2005–2022 годов.

Показатели эффективности методики соответствуют удовлетворительной и хорошей (в случае коррекции) эффективности прогнозов. Помимо использования различных моделей формирования стока, программное обеспечение DWAT снабжено удобным пользовательским интерфейсом, руководством пользователя [12], свободно устанавливается (<https://wmo.int/activities/dynamic-water-resources-assessment-tool-dwat>), что позволяет производить его адаптацию и внедрение для требуемых речных бассейнов.

Нормативные материалы

Всемирная метеорологическая организация определяет международные стандарты в области гидрометеорологии, включая оперативную гидрологию. Основным документом, содержащим стандарты и рекомендуемые практики, является Технический регламент ВМО, который состоит из трех томов и приложений, публикуемых отдельными документами. Том III Технического регламента «Гидрология» содержит стандарты и рекомендуемые практики в области оперативной гидрологии [2]. Технический регламент утверждается Конгрессом ВМО и является обязательным к исполнению в части стандартов (если в тексте используется «*необходимо следовать*») и рекомендуемым к исполнению (если в тексте используется «*рекомендуется следовать*») в части рекомендованных практик.

Приложения к Техническому регламенту публикуются в виде самостоятельных изданий, так называемых Руководств (англ. – *Manuals*). Они содержат более детальное рассмотрение конкретной предметной области гидрологии, например, оперативное прогнозирование и оповещению о паводках и наводнениях – *Руководство по прогнозам и раннему оповещению о паводках* [17].

В дополнении к Техническому регламенту и Руководствам ВМО координирует работу по производству многочисленных Наставлений (англ. – *Guides* и *Guidelines*), которые не относятся к нормативным материалам, но содержат информацию и примеры успешной реализации тех или иных аспектов оперативной гидрологии, которые НГМС могут принять во внимание при решении той или иной проблемы и руководствоваться в повседневной практике. К Наставлениям относятся, например, *Наставление по оценке эффективности гидрологических прогнозов* [22], *Наставление по оценке систем раннего предупреждения о паводках* [18]. Данные публикации и многие другие публикации Всемирной метеорологической организации доступны на сайте электронной библиотеки ВМО (<https://library.wmo.int/>).

Цифровая трансформация в гидрологии

На второй сессии Постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию была создана *Рабочая группа по цифровой трансформации в области гидрологии и водных ресурсов*, основное внимание которой сосредоточено на внедрении новых технологий (в т. ч. на основе методов искусственного интеллекта) в оперативной гидрологии. К задачам Рабочей группы относятся выявление новых появляющихся технологий и оценка возможности их применения в оперативной гидрологии, разработка нормативного и учебного материала в области цифровой трансформации в гидрологии, разработка и внедрение пилотных (демонстрационных) проектов с привлечением новых технологий и государственно-частного партнерства. В частности, рабочая группа принимает участие в реализации пилотного проекта ВМО – Google по прогнозированию паводков, глобального проекта по прогнозированию паводков (совместно с группами экспертов ИНФКОМ), а также других инициатив ВМО, связанных с вопросами цифровой трансформации деятельности НГМС.

Государственно-частное партнерство

В последнее десятилетие заметно увеличилось вовлечение частного сектора в решение задач гидрометеорологии, в том числе гидрологии. В 2019 году Всемирный метеорологический конгресс утвердил политику высокого уровня ВМО в отношении взаимодействия между государственным и частным секторами под названием *Женевская декларация 2019 года*. Она заложила основу для перехода к новому формату сотрудничества между НГМС и представителями частного и академического секторов. Основные принципы взаимодействия НГМС с частным сектором для принятия мер в области погоды, климата и воды отражены в *Руководящих принципах взаимодействия между государственным и частным секторами* [3]. К основным принципам такого сотрудничества относятся необходимость совместного достижения прогресса в решении задач, сформулированных Конвенцией ВМО (в том числе защита жизни и имущества, охрана окружающей среды и т. д.), взаимодействие, приносящее общую пользу и устойчивое развитие наблюдательной инфраструктуры, гидрометеорологического обслуживания. Особо подчеркивается необходимость соблюдения авторитета НГМС как единого источника предупреждений о погодных и гидрологических явлениях природного характера [3].

Один из примеров государственно-частного партнерства в гидрологии, развиваемого под эгидой ВМО, является пилотный проект «ВМО – Google», подразумевающий внедрение системы прогноза уровня воды, а также области затопления на основе методов искусственного интеллекта, данных наблюдений на гидрологических постах, космической информации, а также метеорологических прогнозов. Одна из основных

задач пилотного проекта: сформировать принципы взаимовыгодного сотрудничества НГМС и частного сектора в области производства и выпуска гидрологических прогнозов. С этой целью осуществляется взаимодействие между рядом НГМС и компанией Google в части совместного использования данных наблюдений, моделирования и выпуска гидрологических прогнозов, использования прогностической информации гидрологом-прогнозистом для выпуска прогностической продукции (в том числе штормовых предупреждений), доведение до широкого круга пользователей с помощью платформы *Google FloodHub*. Такое взаимодействие выполняется с учетом соблюдения принципа авторитета НГМС в области выпуска прогностической продукции.

Центры данных ВМО и обмен гидрологическими данными

Данные наблюдений за состоянием водных объектов играют ключевую роль при реализации региональных и глобальных программ ВМО в области предоставления НГМС гидрологической информационно-аналитической и прогностической продукции. В период проведения внеочередной сессии Всемирного метеорологического конгресса в 2021 году была рассмотрена и утверждена Единая политика ВМО в области международного обмена данными о системе Земля [4], которая постановила расширить и активизировать свободный и неограниченный международный обмен гидрометеорологическими данными. При этом были выделены “базовые данные”, которые Члены ВМО должны предоставлять на свободной и неограниченной основе для создания систем гидрологического обслуживания в поддержку защиты жизни и имущества, а также “рекомендуемые данные”, которые Члены ВМО могут предоставлять для поддержки деятельности по гидрологическому мониторингу и прогнозированию. К базовым данным относятся в том числе данные наблюдений за уровнем и расходом воды со станций опорной гидрологической сети, спутниковые данные для поддержки систем гидрологического прогнозирования, выходная продукция региональных и глобальных гидрологических моделей. К рекомендуемым данным относятся все наблюдения с гидрологических постов.

Данные наблюдений используются, в частности, в рамках региональных проектов по прогнозированию прибрежных наводнений [15, 19], проекте по оценке быстроразвивающихся паводков, в пилотном проекте ВМО – Google. Данные наблюдений за расходами воды используются в том числе для составления ежегодного отчета о глобальных водных ресурсах [21].

В качестве центра данных по гидрологии выступают три мировых центра данных: Глобальный центр данных по стоку в г. Кобленц (Германия), Международный центр по оценке ресурсов подземных вод в г. Амстердам (Нидерланды) и Международный центр данных по гидрологии озер и

водохранилищ в Санкт-Петербурге [7]. Их вклад заключается в поддержании связей с поставщиками данных, размещении баз данных, обеспечении доступа к данным для пользователей, предоставлении возможностей для восстановления данных, а также в выполнении других функций, таких как стандартизация управления данными, наращивание потенциала и экспертиза в рамках специализированных проектов ВМО.

Усиление потенциала в гидрологии

Всемирная метеорологическая организация уделяет большое внимание развитию потенциала НГМС стран-членов ВМО, осуществляется поддержка гидрометеорологических служб путем создания нормативных материалов, развития проектов продуцирования информационно-аналитической и прогностической продукции. Создание экспертных сообществ в области гидрологического моделирования и прогнозирования сопровождается подготовкой учебных материалов для использования НГМС на практике. Секретариат ВМО совместно с экспертами Постоянного комитета по гидрологическому обслуживанию и Координационной группой экспертов по повышению потенциала работают над решением данного круга задач [11].

В частности, поддержка НГМС стран-членов ВМО в области наращивания потенциала для прогнозирования паводков заключается не только в предоставлении результатов прогнозирования, но и в создании условий для самостоятельного развития потенциала в области гидрологического прогнозирования путем совершенствования собственных систем раннего предупреждения о паводках и наводнениях на реках. С этой целью разработано и выпущено Руководство по оценке систем раннего оповещения о наводнениях [18], которое призвано предоставить НГМС возможность проведения самостоятельной оценки системы прогнозов с дальнейшим руководством по ее совершенствованию. Выпуск в свет данного Руководства сопровождалось проведением семинара по его применению на практике для сотрудников региональных учебных центров ВМО.

Развивается так называемое сообщество практиков ВМО, которое включает следующие компоненты:

- рассмотренное выше оценочное Руководство в электронном виде;
- список моделей и платформ, рекомендуемых для внедрения в оперативную практику НГМС при прогнозировании тех или иных типов паводков [20], и руководства пользователей для дальнейшей адаптации и внедрения на национальном уровне при необходимости;
- руководства и наставления в области оперативной гидрологии;
- веб-страница сообщества практиков, содержащая все инструменты для поддержки НГМС в области прогноза паводков, а также форум специалистов для общения.

Заключение

Всемирная метеорологическая организация предоставляет НГМС стран-членов ВМО поддержку в виде широкого спектра нормативного материала, проектов по предоставлению информационно-аналитической и прогностической продукции, обучающих материалов, курсов и семинаров для повышения потенциала НГМС и их способности выполнять гидрологическое обслуживание широкого круга потребителей на самом высоком уровне. При этом учитываются возникающие тенденции, в том числе широкое использование комплексного междисциплинарного подхода на основе «системы Земля»; вовлечение частного сектора в процесс гидрометеорологического обслуживания; технологии, открывающие новые возможности для цифровой трансформации гидрометеорологических служб.

К основным вызовам, стоящим перед гидрологией ВМО в последние годы, можно отнести поиск оптимального места гидрологии в организационном процессе. Постреформенный период ВМО ознаменовался переходом к комплексному подходу к гидрометеорологическим дисциплинам, в том числе к гидрологии. Это имеет как сильные стороны, так и создает некоторые риски, особенно в части координации и видимости гидрологии для НГМС, а также для международных организаций.

Поиск эффективного механизма координации многочисленных экспертных групп ВМО в области гидрологии относится к основной задаче организации, которое позволит устранить управленческие риски и риски дублирования действий. Поиск необходимого баланса между интегрированностью гидрологии в рамках комплексного подхода ВМО и обеспечение достаточной степени ее обособленности для эффективного решения задач является одной из основных предпосылок для развития организации.

К рискам можно отнести и снижение степени обсуждения задач оперативной гидрологии на межправительственном уровне. Такое обсуждение проводится на сессиях технических комиссий ВМО, а также в ходе сессий Всемирного метеорологического конгресса в части Гидрологической ассамблеи. Безусловно, увеличение времени обсуждения вопросов гидрологии во время проведения технических комиссий, когда Члены ВМО могут детально обсуждать оперативный план комиссии в части гидрологии, внести коррективы в существующие и предлагать новые задачи, только приветствуется. Также пойдет на пользу и детальная координация действий на уровне Технического координационного комитета.

В последнее время достаточно остро стоит вопрос о запуске новой программы по прогнозированию паводков различного генезиса на основе современных методов и моделей, открытых программных средств с привлечением НГМС, готовых выступить в качестве центров предоставления обслуживания в области прогнозирования паводков и наводнений.

Несмотря на существующие вызовы, Всемирная метеорологическая организация продолжает предоставлять Членам ВМО ведущую поддержку в области решения круга гидрологических задач на самом высоком уровне,

а международным организациям и Правительствам – авторитетные рекомендации в области мониторинга состояния водных объектов, гидрологических расчетов и прогнозов, оценки водных ресурсов и других задач гидрологии.

Список литературы

1. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Методы коррекции прогнозов речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 162–175.
2. ВМО-№ 49. Технический регламент ВМО. Том III – Гидрология. Всемирная метеорологическая организация, 2021. 80 с.
3. ВМО-№ 1258. Руководящие принципы взаимодействия между государственным и частным секторами. Всемирная метеорологическая организация, 2024. 72 с.
4. ВМО-№ 1281. Всемирный метеорологический конгресс. Всемирная метеорологическая организация, 2021. 269 с.
5. ВМО-№ 1319. Перспективное видение, Стратегия и соответствующий План действий в области гидрологии и Стратегия гидрологических исследований ВМО. Всемирная метеорологическая организация, 2023. 67 с.
6. ВМО-№ 1352. СЕРКОМ-3. Комиссия по метеорологическим, климатическим, гидрологическим, морским и смежным обслуживанию и применениям в области окружающей среды. Сокращенный окончательный отчет третьей сессии. Бали, Индонезия, 4–9 марта 2024 года. Всемирная метеорологическая организация, 2024. 860 с.
7. *Вуглинский В.С.* Решение комиссии по наблюдениям, инфраструктуре и информационным системам ВМО по вопросам деятельности Глобальных центров данных // Ежегодный информационный бюллетень. 2024. № 14. С. 3–4.
8. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 356 с.
9. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* Вып. 2. Краткосрочные прогнозы расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 245 с.
10. *Georgakakos K.P., Modrick T.M., Shamir E., Campbell R., Cheng Zh., Jubach, R., Sperflage J.A., Spencer C., Banks R.* The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide: A Successful Multidecadal Research-To-Operations Effort. Bulletin of the American Meteorological Society. 2021. Vol. 103, is. 3. P. E665-E679. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0241.1.
11. Global Campus Innovations. Volume III – Collaboration in Education and Training. ETR-27. World Meteorological Organization, 2020.
12. *Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr.* DWAT – User’s Manual V1.0. Han River Flood Control Office, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018. 111 p.
13. *Kim H.* Management of Water Resources on the Han River. Korea, 2021. DOI: 10.1002/9781119531241.ch21.
14. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. Vol. 10. P. 282–290.
15. *Swail V., Grimes S., Pilon P., Canterford R., Simonov Y.* Early warnings of coastal inundation // WMO Bulletin. 2019. Vol. 68, № 2. P. 49–55.
16. *Teruggi G., Riboldi I., Pilon P., Muste M.* The role of research and science in WMO flood management activities. 1916–1922. 2016.
17. WMO-No. 1072. Manual on Flood Forecasting and Warning. World Meteorological Organization, 2011. 142 p.
18. WMO-No. 1286. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2022. 36 p.
19. WMO-No. 1293. Guidelines on Implementation of a Coastal Inundation Forecasting–Early Warning System. World Meteorological Organization, 2022. 61 p.
20. WMO-No. 1345. Guidelines on the Inventory of Interoperable Models and Platforms for Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2023.

21. WMO-No. 1362. State of Global Water Resources. 2023 Report. 2024. 80 p. <https://wmo.int/topics/floods>.

22. WMO-No. 1364. Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts. World Meteorological Organization, 2025

23. Cheng Zh., Jubach R., Sperflage J.A., Spencer C.R., Banks R. The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide. A Successful Multidecadal Research-to-Operations Effort // Bulletin of the American Meteorological Society. 2022. Vol. 103, is. 3. P. 665-669.

References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Simonov Y.A. Methods for the streamflow forecast correction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 162-175. [in Russ.].

2. VMO-№ 49. Tekhnicheskiy reglament VMO. Tom III – Gidrologiya. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya, 2021, 80 p. [in Russ.].

3. VMO-№ 1258. Rukovodyashchie principy vzaimodeystviya mezhdru gosudarstvennym i chastnym sektorami. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya, 2024, 72 p. [in Russ.].

4. VMO-№ 1281, Vsemirnyy meteorologicheskii kongress. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya, 2021, 269 p. [in Russ.].

5. VMO-№ 1319. Perspektivnoe videnie, Strategiya i sootvetstvuyushchiy Plan deystviy v oblasti gidrologii i Strategiya gidrologicheskikh issledovaniy VMO. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya, 2023, 67 p. [in Russ.].

6. VMO-№ 1352. SERKOM-3. Komissiya po meteorologicheskim, klimaticheskim, gidrologicheskim, morskim i smezhnym obsluzhivaniyu i primeneniym v oblasti okruzhayushchey sredy. Sokrashchennyy okonchatel'nyy otchet tret'ey sessii. Bali, Indoneziya, 4–9 marta 2024 goda. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya, 2024, 860 p. [in Russ.].

7. Vuglinskiy V.S. Reshenie komissii po nablyudeniym, infrastrukture i informatsionnym sistemam VMO po voprosam deyatelnosti Global'nykh centrov dannyh. Ezhegodnyy informatsionnyy byulleten'. 2024, no. 14, pp. 3-4 [in Russ.].

8. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].

9. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnye prognozy rashkoda i urovnya vody na rekah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].

10. Georgakakos K.P., Modrick T.M., Shamir E., Campbell R., Cheng Zh., Jubach R., Sperflage J.A., Spencer C., Banks R. The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide: A Successful Multidecadal Research-To-Operations Effort. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, vol. 103, no. 3. P. E665-E679. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0241.1.

11. Global Campus Innovations. Volume III – Collaboration in Education and Training. ETR-27. World Meteorological Organization, 2020.

12. Kim S., Jang Ch., Kim H., JO Hs., Kim Hr. DWAT – User's Manual V1.0. Han River Flood Control Office, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 2018, 111 p.

13. Kim H. Management of Water Resources on the Han River. Korea, 2021. DOI: 10.1002/9781119531241.ch21.

14. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, pp. 282-290.

15. Swail V., Grimes S., Pilon P., Canterford R., Simonov Y. Early warnings of coastal inundation. *WMO Bulletin*, 2019, vol. 68, no. 2, pp. 49-55.

16. Teruggi G., Riboldi I., Pilon P., Muste M. The role of research and science in WMO flood management activities. 1916-1922, 2016.

17. WMO-No. 1072. Manual on Flood Forecasting and Warning. World Meteorological Organization, 2011, 142 p.

18. WMO-No. 1286. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2022, 36 p.
19. WMO-No. 1293. Guidelines on Implementation of a Coastal Inundation Forecasting–Early Warning System. World Meteorological Organization, 2022, 61 p.
20. WMO-No. 1345. Guidelines on the Inventory of Interoperable Models and Platforms for Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2023.
21. WMO-No. 1362. State of Global Water Resources. 2023 Report, 2024, 80 p. Available at: wmo.int/topics/floods
22. WMO-No. 1364. Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts. World Meteorological Organization, 2025.
23. Cheng Zh., Jubach R., Sperflage J.A., Spencer C.R., Banks R. The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide. A Successful Multidecadal Research-to-Operations Effort. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, vol. 103, no. 3, pp. 665-669.

*Поступила 26.05.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.*

*Submitted 26.05.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.10.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-141-158>

УДК 556.6

Вероятностная форма выпуска прогнозов речного стока

Ю.А. Симонов^{1,2}, А.В. Христофоров¹

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия;

²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru

Предлагаются рекомендации по выпуску прогноза речного стока в вероятностной форме, которая в дополнение к обычному прогнозу в детерминированной форме дает представление о диапазоне возможных значений прогнозируемой величины. Вероятностную форму долгосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока предлагается получать исходя из того, что ошибки прогноза подчиняются нормальному распределению вероятностей с постоянной дисперсией. Вероятностную форму выпуска краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов предлагается получать исходя из того, что прогноз логарифмов характеристики речного стока дает ошибки, которые подчиняются нормальному распределению вероятностей с постоянной дисперсией. Приведены статистические критерии, предназначенные для проверки применимости каждого из методов. Даны примеры выпуска прогнозов речного стока в вероятностной форме, полученной с использованием каждого из предлагаемых методов. Предлагаемые рекомендации предназначены для повышения научной обоснованности результатов оперативного гидрологического прогнозирования.

Ключевые слова: речной сток, детерминированная и вероятностная форма, проверочные прогнозы, статистический анализ

A probabilistic form of streamflow forecasts

Yu.A. Simonov^{1,2}, A.V. Khristoforov¹

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

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru

Recommendations are proposed for issuing streamflow forecasts in a probabilistic form, which, in addition to the forecast in a deterministic form, gives an idea of the range of possible forecasted values. It is proposed to obtain the probabilistic form of long-term and some medium-term streamflow forecasts based on the fact that forecast errors follow the normal probability distribution with constant variance. It is proposed to obtain the probabilistic form of issuing short-term and some medium-term forecasts based on the fact that the errors in the logarithms of streamflow forecasting follow the normal probability distribution with constant variance. Statistical criteria are given to test applicability of each of the methods. Examples of streamflow forecasts in the probabilistic form obtained using each of the proposed methods are given. The proposed recommendations are intended to improve the scientific validity of the results of operational hydrological forecasting.

Keywords: streamflow, deterministic and probabilistic forecasts, verification forecasts, statistical analysis

Введение

Ограниченность возможностей предсказания характеристик речного стока обусловлена рядом причин, в том числе:

- сложностью и многофакторностью процессов формирования водного режима рек и притока воды в водохранилища, которые ограничивают адекватность и полноту описания прогнозируемого явления;
- неопределенностью хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза и ограниченностью возможностей его предсказания;
- ограниченной репрезентативностью, объемом и точностью исходных данных гидрометеорологических наблюдений, которые приводят к статистической погрешности параметров схемы получения прогноза [3, 7, 17, 21].

Таким образом, любой прогноз характеристики речного стока содержит случайные ошибки, вероятная величина которых может быть весьма значительна и должна учитываться потребителями прогностической продукции при принятии решений по использованию водных ресурсов и защите населения и хозяйственных объектов от опасных и неблагоприятных гидрологических явлений [2, 18, 20].

Подготовленная к использованию методика определяется прогнозируемой характеристикой, заблаговременностью прогноза и алгоритмом его составления, а также характеризуется среднеквадратической погрешностью прогноза, показателем его эффективности и оправдываемости, которые получены на основе анализа результатов ее проверки [12].

Выпускаемый в детерминированной форме прогноз характеристики речного стока выражает ее ожидаемое значение в виде конкретного числа. Учитывая точность используемой методики прогноза, потребитель может ориентироваться на более низкое значение прогнозируемого уровня, расхода воды, объема стока или притока в меженный период или на более высокое значение этих характеристик в период половодья и в период прохождения паводков. Кроме того, для пользователя прогнозов представляет интерес доверительный интервал, в пределах которого прогнозируемая характеристика может оказаться с той или иной вероятностью [3, 20].

Представляется недопустимым основанное только на интуиции занижение или завышение прогнозов и назначение доверительных интервалов исходя из негативных последствий вероятной ошибки получаемых прогнозов. Во избежание подобных ситуаций выпуск прогноза в детерминированной форме следует дополнять выпуском прогноза в вероятностной форме, которая характеризует распределение вероятностей ожидаемых значений прогнозируемой величины.

Выпуск гидрологических прогнозов в вероятностной форме предусматривается действующим с 1962 года Наставлением [12]. Содержащиеся в Наставлении указания представляются вполне разумными, однако

в настоящее время они не соответствуют научному уровню современного гидрологического прогнозирования. В связи с этим в настоящей статье предлагаются усовершенствованные рекомендации по выпуску прогнозов речного стока в вероятностной форме.

Постановка задачи

В ходе авторской проверки разработанной методики гидрологического прогнозирования и в ходе ее оперативных испытаний необходимо оценить не только погрешность прогноза в целом, но и вероятные величины его отклонения от фактических значений прогнозируемой гидрологической характеристики. Эта задача решается путем дополнения прогноза в детерминированной форме, когда ожидаемое значение характеристики речного стока задается в виде числа \tilde{Y} , вероятностной формой выпуска прогноза. Эта форма характеризует возможную изменчивость ожидаемого значения характеристики речного стока Y в зависимости от располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации. В некоторых случаях эта информация может включать и предсказание хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза.

Вероятностная форма выпуска прогноза определяется условной функцией распределения вероятностей $\tilde{F}(y)$, которая в зависимости от располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации задает вероятность того, что прогнозируемая величина окажется меньше числа y . В ряде случаев более удобным является использование условной функции обеспеченности, которая в зависимости от располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации задает число $\tilde{Y}(p)$, которое прогнозируемая величина может превысить с вероятностью p [3].

Представленные в аналитической, табличной или графической форме функции $\tilde{F}(y)$ или $\tilde{Y}(p)$ дают исчерпывающую информацию для получения вероятностной формы выпуска прогноза.

Как правило, прогноз гидрологической характеристики Y в вероятностной форме выражается двумя способами, представленными ниже [3, 11, 13, 16].

Форма 1 определяет:

1.1. условную вероятность $\tilde{P} = \tilde{F}(b) - \tilde{F}(a)$ попадания ожидаемого значения характеристики Y в заданный интервал $(a; b)$;

1.2. условную вероятность $\tilde{F}(a)$ того, что прогнозируемая величина окажется меньше критически малого значения a ;

1.3. условную вероятность $1 - \tilde{F}(b)$ того, что прогнозируемая величина окажется больше критически большого значения b .

Форма 2 определяет:

2.1. условный доверительный интервал с концами $\tilde{a}_p = \tilde{Y}(50\% + P/2)$ и $\tilde{b}_p = \tilde{Y}(50\% - P/2)$, в который ожидаемое значение характеристики Y может попасть с заданной вероятностью $P = 60\% - 90\%$, причем попасть влево или вправо от этого интервала величина может с одинаковой вероятностью $50\% - P/2$;

2.2. критически малое значение $\tilde{Y}(1-p)$, меньше которого прогнозируемая величина окажется с вероятностью $p = 5\% - 50\%$;

2.3. критически большое значение $\tilde{Y}(p)$, больше которого прогнозируемая величина окажется с вероятностью $p = 5\% - 50\%$ [3].

Примеры рассмотренных вероятностных форм выпуска прогнозов речного стока приведены в следующих разделах.

Среднеквадратическая погрешность прогноза величины Y в детерминированной форме достигает своего минимума, если в качестве такого прогноза используется ее условное математическое ожидание $\tilde{M}(Y)$, соответствующее располагаемой гидрометеорологической информации. Причем по мере увеличения точности и полноты такой информации погрешность такого прогноза будет снижаться [3, 6].

Таким образом, методика прогнозирования величины Y в детерминированной форме может рассматриваться как алгоритм получения оценки \tilde{Y} условного математического ожидания $\tilde{M}(Y)$ при различных возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации. Возможная систематическая ошибка прогноза должна быть устранена, после чего прогноз \tilde{Y} будет несмещенной оценкой условного математического ожидания $\tilde{M}(Y)$ [7].

Условное распределение вероятностей ожидаемых значений прогнозируемой величины Y описывает ее возможные отклонения от математического ожидания $\tilde{M}(Y)$. Следовательно, получение вероятностной формы выпуска прогноза должно быть основано на анализе данных об ошибках прогноза $Y - \tilde{Y}$ [3]. Именно такой подход предусмотрен Наставлением [12].

В последние годы все большее распространение получает иной подход к получению вероятностных форм выпуска прогнозов речного стока, основанный на применении ансамблевого подхода [9–11, 14, 15, 19, 21, 22]. Представляется целесообразным рассмотреть его прежде, чем перейти

к рекомендуемым методам получения вероятностных форм выпуска прогнозов на основе статистического анализа данных об их ошибках.

Ансамблевый подход к выпуску прогноза в вероятностной форме

В случае, когда методика долгосрочного или среднесрочного прогнозирования характеристики речного стока Y использует физико-математическую или концептуальную модель его формирования, а прогноз хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности не используется в виду его недостаточной надежности, для получения вероятностной формы выпуска прогноза в ряде случаев применяется ансамблевый подход [3, 10, 14, 17, 19].

Модель усваивает образующие вектор X известные к дате составления прогноза гидрометеорологические характеристики и образующие вектор Z метеорологические характеристики, которые описывают сценарий погодных условий в течение периода заблаговременности прогноза, например, ход осадков и температуры воздуха. Получаемое с помощью модели значение прогнозируемой характеристики речного стока определяется функцией $M(X, Z)$, которая выражается в неявном виде, но известна после калибровки модели [11, 13, 17, 21].

При составлении прогноза вектор X известен, а неопределенность вероятных значений вектора Z учитывается путем использования достаточно продолжительного ряда Z_1, \dots, Z_N , который может быть получен с помощью стохастической модели сценариев хода метеорологических элементов (генератора погоды) или, что чаще, из архива фактически наблюдавшихся сценариев. Последовательное усвоение моделью этих сценариев позволяет получить ряд $M(X, Z_1), \dots, M(X, Z_N)$, на основе которого получается прогноз \tilde{Y} , равный среднему арифметическому членов этого ряда, и оценивается условная функция распределения вероятностей $\tilde{F}(y)$ ожидаемых значений прогнозируемой величины или ее условная функция обеспеченности $\tilde{Y}(p)$ [8, 9, 13, 16].

Следует отметить, что существуют системы ансамблевого прогноза, которые преодолевают данный недостаток путем использования различных наборов начальных условий гидрологической модели, применяют несколько гидрологических моделей или используют различные параметризации модели. Ввиду сложности их реализации такие системы пока используются достаточно редко в оперативной практике гидрологического прогнозирования [13, 22].

Подход получения ансамблевого прогноза, основанный на использовании гидрологической модели и ансамбля реализаций хода метеорологических величин за период заблаговременности прогноза, может иметь существенный недостаток. Он состоит в том, что оцениваемое таким образом

условное распределение вероятностей прогнозируемой величины учитывает не всю неопределенность ее возможных значений, а только ту, которая обусловлена неопределенностью хода метеорологических характеристик в течение периода заблаговременности гидрологического прогноза. Дисперсия такого распределения \tilde{S}_A^2 всегда будет меньше среднего квадрата ошибки прогноза S^2 . Разность $S^2 - \tilde{S}_A^2$ между этими величинами определяет погрешность модельных расчетов, получаемых при усвоении моделью фактического хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза. Эта погрешность обусловлена неизбежными случайными ошибками определения образующих вектор X гидрометеорологических характеристик, ошибками определения самой прогнозируемой величины Y , недостаточной адекватностью и полнотой описания процессов формирования речного стока с помощью используемой модели и ограниченностью данных наблюдений, используемых для ее калибровки [3, 7, 16, 22]. Приводимые ниже примеры демонстрируют различие между получаемой с помощью ансамблевого подхода дисперсией \tilde{S}_A^2 и средним значением квадрата ошибки прогноза S^2 [6].

Пример 1

В ИВП РАН совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» на базе физико-математической модели формирования речного стока *ECOMAG* разработана методика долгосрочного прогнозирования объема притока воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал с использованием архивного ансамбля сценариев хода метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза за годы с 1967 по 2014 [5, 15]. На основе данной методики в Гидрометцентре России выпускаются оперативные прогнозы.

Анализ проверочных прогнозов показал, что применение ансамблевого подхода привело к занижению дисперсии ошибок прогнозов в 1,4 раза. Следовательно, использование ансамблевого прогноза в данном случае сужает доверительный интервал для вероятных значений прогнозируемой величины менее чем на 10 %, что представляется вполне приемлемым.

В конце марта 2025 года был выпущен прогноз притока воды за второй квартал 2025 года. Использование архивных данных о ходе метеорологических элементов в период заблаговременности прогноза за годы с 1967 по 2014 позволило получить условную функцию распределения вероятностей $\tilde{F}(y)$ ожидаемых значений притока за второй квартал, на основе которой рассчитаны значения прогноза по форме 2. Таким образом, наиболее вероятная величина притока воды за второй квартал 2025 года (медианное значение) составляет 9,42 км³; доверительный интервал, в который прогнозируемая величина попадет с вероятностью 50 %, включает значения от 8,41 до 10,7 км³, с вероятностью 90 % – от 6,5 до 14,0 км³ (рис. 1).

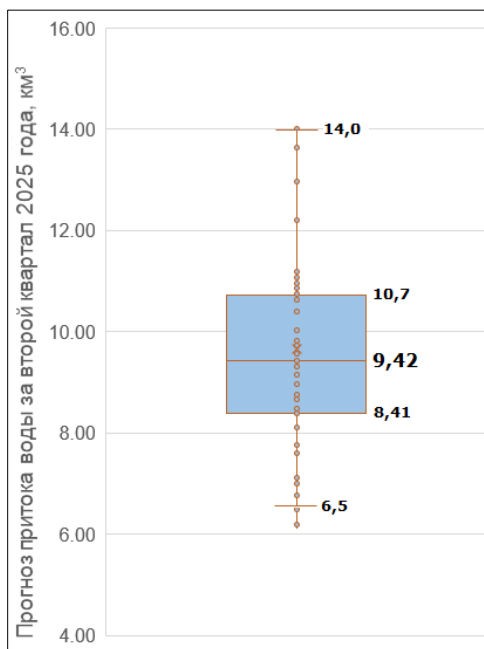


Рис. 1. Прогноз притока воды в Чебоксарское водохранилище за второй квартал 2025 г. на основе ансамблевого подхода.

Fig. 1. Forecast of water inflow into the Cheboksary reservoir for the second quarter of 2025 based on the ensemble approach.

Пример 2

В ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе шведской концептуальной модели HBV-96 разработаны методики долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реках бассейна Камы в течение зимнего периода. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за годы с 1987 по 2020 [7]. Анализ проверочных прогнозов за период с 2002 по 2020 год показал, что для реки Вишера у пос. Рябинино применение ансамблевого подхода привело к занижению дисперсии ошибок прогнозов январского стока в 2,2 раза. Следовательно, использование ансамблевого прогноза в данном случае сужает доверительный интервал для вероятных значений прогнозируемой величины на 48 %, что представляется нежелательным.

Пример 3

В ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе концептуальной модели DWAT разработана методика долгосрочного прогнозирования среднемесячных расходов воды на реке Ока у г. Калуга в течение маловодного периода года. Ансамбль сценариев хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза брался за годы с 1990 по 2021

[7]. Анализ проверочных прогнозов за период с 2005 по 2021 год показал, что применение ансамблевого подхода привело к занижению дисперсии ошибок прогнозов в 3,2 раза. Следовательно, использование ансамблевого прогноза в данном случае сужает доверительный интервал для вероятных значений прогнозируемой величины на 79 %, что представляется недопустимым.

По мере увеличения возможностей получения более надежной гидрометеорологической информации и внедрения более совершенных моделей формирования речного стока неопределенность хода метеорологических элементов в течение заблаговременности прогноза будет становиться решающим фактором, определяющим точность его прогнозирования, и следовательно, использование ансамблевого подхода при получении вероятностной формы выпуска гидрологических прогнозов будет все более оправданным. Однако пока этот подход может существенно занижать вероятный диапазон ожидаемых значений прогнозируемой величины, что совершенно недопустимо с точки зрения большинства потребителей прогнозстической продукции [2, 8, 18, 20].

С учетом отмеченных обстоятельств, рекомендуемые ниже методы получения вероятностной формы выпуска прогнозов основаны на статистическом анализе ряда $(Y_1, \tilde{Y}_1), \dots, (Y_n, \tilde{Y}_n)$, содержащего значения гидрологической характеристики Y и ее прогноза в детерминированной форме \tilde{Y} [3, 13]. Эти методы применимы для любых вариантов прогнозирования характеристик речного стока различной заблаговременности и соответствуют традиционному подходу, закрепленному в Наставлении [12].

Метод 1 выпуска прогноза в вероятностной форме

Первый рекомендуемый метод получения вероятностной формы выпуска прогноза на основе статистического анализа ряда проверочных прогнозов $(Y_1, \tilde{Y}_1), \dots, (Y_n, \tilde{Y}_n)$ основан на двух предположениях.

1. При любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации дисперсия ошибки прогноза $Y - \tilde{Y}$ должна быть постоянной и, следовательно, равной среднему значению квадрата ошибки прогноза S^2 . Методы оценки среднеквадратической погрешности прогноза S подробно изложены в работах [3, 6, 7].

2. При любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации ошибки прогноза подчиняются нормальному распределению вероятностей. Следовательно, при располагаемой гидрометеорологической информации величина Y подчиняется условной функции распределения:

$$\tilde{F}(y) = \Phi\left(\frac{y - \tilde{Y}}{S}\right), \quad (1)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа, равная

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (2)$$

Функция Лапласа и соответствующая ей кривая обеспеченности $x(p)$ определяются доступными компьютерными программами или таблицами, содержащимися во многих публикациях по теории вероятностей [3, 6].

Для проверки первого предположения рекомендуется проверить гипотезу о том, что полученная по ряду проверочных прогнозов оценка коэффициента корреляции r между абсолютными значениями ошибки прогноза $|Y_i - \tilde{Y}_i|$ и значениями самого прогноза \tilde{Y}_i при $i = 1, \dots, n$ отличается от нуля только в пределах вероятной погрешности его определения.

Для проверки этого предположения рекомендуется статистический критерий Питмена при уровне значимости $\alpha = 5\%$, равном вероятности отвергнуть верную гипотезу [6]. Согласно данному критерию, оценка r отличается от нуля статистически недостоверно, и следовательно, первое предположение может быть принято, если выполняется неравенство:

$$\frac{|r| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} < \tau(2,5\%, n-2), \quad (3)$$

где $\tau(2,5\%, n-2)$ – квантиль распределения Стьюдента с $n-2$ степенями свободы, соответствующий вероятности превышения 2,5 %. В табл. 1 помещены критические значения $\tau(2,5\%, n-2)$ для различных величин $n-2$ при $\alpha = 5\%$ [6].

Таблица 1. Критические значения $\tau(2,5\%, n-2)$ для критерия Питмена при $\alpha = 5\%$

Table 1. Critical values $\tau(2,5\%, n-2)$ for the Pitman criterion $\alpha = 5\%$

$n-2$	10	15	20	30	40	60	80	100	200
$\tau(2,5\%, n-2)$	2,23	2,13	2,09	2,04	2,02	2,00	1,99	1,98	1,97

Для проверки второго предположения рекомендуется использовать статистический критерий согласия Крамера – Мизеса – Смирнова [6]. Использование данного критерия предусматривает следующие процедуры:

1) для всех $i = 1, \dots, n$ члены ряда ошибок проверочных прогнозов $Y_i - \tilde{Y}_i$ преобразуются в величины

$$z_i = \Phi\left(\frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{S}\right); \quad (4)$$

- 2) формируется ранжированный ряд $z_{(1)} \leq \dots \leq z_{(n)}$;
 3) рассчитывается статистика критерия:

$$\varpi^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left(z_{(i)} - \frac{2i-1}{2n} \right)^2. \quad (5)$$

При уровне значимости $\alpha = 5\%$ гипотеза о нормальном распределении вероятностей ошибок прогноза принимается, если выполняется неравенство $\varpi^2 < 0,46$.

Анализ различных методик прогнозирования речного стока показал, что для большинства долгосрочных и многих среднесрочных прогнозов предположения о постоянстве дисперсии ошибок прогноза и о нормальности их распределения выполняются [3]. Следовательно, для таких методик при любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации условная функция распределения вероятностей $\tilde{F}(y)$ может определяться формулой (1), а условная функция обеспеченности $\tilde{Y}(p)$ может определяться формулой:

$$\tilde{Y}(p) = \tilde{Y} + x(p)S. \quad (6)$$

Значения функции обеспеченности $x(p)$ нормального распределения вероятностей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения функции обеспеченности $x(p)$ нормального распределения вероятностей

Table 2. Values of the function $x(p)$ of the normal probability distribution

p	50%	40%	30%	20%	10%
$x(p)$	0,000	0,253	0,524	0,842	1,282

Для **формы 1** справедливы следующие соотношения:

1.1. Вероятность попадания ожидаемого значения характеристики Y в интервал $(a;b)$ равна разности $\Phi\left(\frac{b-\tilde{Y}}{S}\right) - \Phi\left(\frac{a-\tilde{Y}}{S}\right)$.

1.2. Вероятность того, что прогнозируемая величина окажется меньше критически малого значения a , равна $\Phi\left(\frac{a-\tilde{Y}}{S}\right)$.

1.3. Вероятность того, что прогнозируемая величина окажется больше критически большого значения b , равна $100\% - \Phi\left(\frac{b-\tilde{Y}}{S}\right)$.

Для **формы 2** справедливы следующие соотношения:

2.1. Концы доверительного интервала, в который ожидаемое значение характеристики Y может попасть с заданной вероятностью $P = 50\% - 95\%$, равны:

$$\tilde{a}_p = \tilde{Y} - x(p/2)S; \quad \tilde{b}_p = \tilde{Y} + x(p/2)S, \quad (7)$$

где $p = 100\% - P$. Значения $x(p/2)$ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения функции обеспеченности $x(p/2)$ нормального распределения вероятностей

Table 3. Values of the function $x(p/2)$ of the normal probability distribution

p	40%	30%	20%	10%
$x(p/2)$	0,842	1,036	1,282	1,645

2.2. Критически малое значение, меньше которого прогнозируемая величина Y может оказаться с вероятностью $p = 5\% - 50\%$, равно $\tilde{Y} - x(p)S$.

2.3. Критически большое значение, больше которого прогнозируемая величина Y может оказаться с вероятностью $p = 5\% - 50\%$, равно $\tilde{Y} + x(p)S$.

Пример 4

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика долгосрочного прогнозирования объема притока весеннего половодья $W_{пол.}$ км³ в Ириклинское водохранилище на р. Урал. Прогноз $\tilde{W}_{пол.}$ определяется по линейной зависимости объема весеннего притока от известного к дате составления прогноза 5 марта максимального запаса воды в снеге и показателя предзимней увлажненности водосбора в предыдущем году. Продолжительность ряда проверочных прогнозов за период с 2003 по 2024 год составляет $n = 22$ года. Оценка среднеквадратической погрешности прогноза равна $S = 0,39$ км³ [1]. Выполненная проверка с применением критериев Питмена и Крамера – Мизеса – Смирнова показала применимость рекомендуемого первого метода.

Для весеннего половодья 2024 года был получен прогноз $\tilde{W}_{пол.} = 2,78$ км³. Реализация вероятностной формы 2 (вариант 2.1) выпуска прогноза для 2024 года определяется концами доверительного интервала (\tilde{a}_p км³, \tilde{b}_p км³), в который величина $W_{пол.}$ может попасть с заданной вероятностью $P = 60\% - 90\%$ (табл. 4).

Фактическое значение объема притока весеннего половодья в Ириклинское водохранилище в 2024 году оказалось равным 3,05 км³, и оно попало во все указанные в табл. 4 доверительные интервалы. Таким образом, в 2024 году прогноз в вероятностной форме 2 оказался полностью оправдавшимся.

Таблица 4. Концы \tilde{a}_p и \tilde{b}_p условного доверительного интервала для объема притока весеннего половодья в Ириклинское водохранилище в 2024 году

Table 4. Bounds \tilde{a}_p and \tilde{b}_p of prediction interval for the volume of spring flood inflow into the Iriklinkoye reservoir in 2024

P	60%	70%	80%	90%
\tilde{a}_p км ³	2,45	2,38	2,28	2,14
\tilde{b}_p км ³	3,11	3,19	3,28	3,42

Метод 2 выпуска прогноза в вероятностной форме

Анализ различных методик прогнозирования речного стока показал, что для большинства краткосрочных и многих среднесрочных прогнозов предположения о постоянстве дисперсии ошибок прогноза или о нормальности их распределения не выполняются. Распределение вероятностей ошибок прогноза $Y - \tilde{Y}$ является асимметричным, а их абсолютные значения $|Y - \tilde{Y}|$ в среднем увеличиваются с ростом величины прогноза \tilde{Y} [3].

Для таких методик рекомендуется второй метод получения вероятностной формы выпуска прогноза, который также основан на двух предположениях.

1. При любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации дисперсия ошибки $\ln Y - \ln \tilde{Y}$ прогноза логарифма характеристики речного стока Y должна быть постоянной и, следовательно, равной среднему значению квадрата ошибки такого прогноза S_{in}^2 . Оценка среднеквадратической погрешности S_{in} прогноза величины $\ln Y$ выполняется методами, изложенными в работах [3, 6, 7].

2. При любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации ошибки $\ln Y - \ln \tilde{Y}$ прогноза величины $\ln Y$ подчиняются нормальному распределению вероятностей с нулевым средним и стандартным отклонением S_{in} . Следовательно, при располагаемой гидрометеорологической информации величина $\ln Y$ подчиняется условной функции распределения:

$$\tilde{F}(y) = \Phi\left(\frac{\ln y - \ln \tilde{Y}}{S_{in}}\right), \quad (8)$$

где $\Phi(x)$ – рассмотренная выше функция Лапласа.

Условная функция обеспеченности $\tilde{Y}(p)$ определяется формулой:

$$\tilde{Y}(p) = \text{Exp}[\ln \tilde{Y} + x(p)S_{in}], \quad (9)$$

где $\text{Exp}(u) = e^u$ – экспоненциальная функция; $x(p)$ – рассмотренная выше функция обеспеченности нормального распределения вероятностей.

Для проверки первого предположения рекомендуется проверить гипотезу о том, что полученная по ряду проверочных прогнозов оценка коэффициента корреляции r_{\ln} между абсолютными значениями ошибки логарифмического прогноза $|\ln Y_i - \ln \tilde{Y}_i|$ и значениями самого прогноза $\ln \tilde{Y}_i$ при $i = 1, \dots, n$ отличается от нуля в пределах вероятной погрешности его определения. Предложение проверяется с помощью рассмотренного выше критерия Питмена и использования формулы (3) после замены коэффициента r коэффициентом r_{\ln} .

Для проверки второго предположения рекомендуется использовать рассмотренный выше критерий Крамера – Мизеса – Смирнова. При этом формула (5) сохраняется, а формула (4) приобретает вид:

$$z_i = \Phi\left(\frac{\ln Y_i - \ln \tilde{Y}_i}{S_{\ln}}\right). \quad (10)$$

Если проверка обоих предположений прошла успешно, что характерно для большинства методик краткосрочного и среднесрочного прогнозирования речного стока, для получения вероятностной формы выпуска прогноза рекомендуется второй метод [3].

Все указанные выше вероятностные формы выпуска прогноза определяются полученным в детерминированной форме в виде конкретного числа $\ln \tilde{Y}$ прогнозом логарифма характеристики речного стока Y и показателем среднеквадратической погрешности таких прогнозов S_{\ln} .

Для **формы 1** справедливы следующие соотношения:

1.1. Вероятность попадания ожидаемого значения характеристики Y в интервал $(a; b)$ равна разности $\Phi\left(\frac{\ln b - \ln \tilde{Y}}{S_{\ln}}\right) - \Phi\left(\frac{\ln a - \ln \tilde{Y}}{S_{\ln}}\right)$.

1.2. Вероятность того, что прогнозируемая величина окажется меньше критически малого значения a , равна $\Phi\left(\frac{\ln a - \ln \tilde{Y}}{S_{\ln}}\right)$.

1.3. Вероятность того, что прогнозируемая величина окажется больше критически большого значения b , равна $100\% - \Phi\left(\frac{\ln b - \ln \tilde{Y}}{S_{\ln}}\right)$.

Для **формы 2** справедливы следующие соотношения:

2.1. Концы доверительного интервала, в который ожидается значение характеристики Y может попасть с заданной вероятностью $P = 50\% - 95\%$, равны:

$$\tilde{a}_p = \text{Exp}[\ln \tilde{Y} - x(p/2)S_{\ln}]; \quad \tilde{b}_p = \text{Exp}[\ln \tilde{Y} + x(p/2)S_{\ln}], \quad (11)$$

где $\text{Exp}(u) = e^u$ – экспоненциальная функция; $p = 100\% - P$.

2.2. Критически малое значение, меньше которого прогнозируемая величина Y может оказаться с вероятностью $p = 5\% - 50\%$, равно $Exp[\ln \tilde{Y} - x(p)S_{in}]$;

2.3. критически большое значение, больше которого прогнозируемая величина Y может оказаться с вероятностью $p = 5\% - 50\%$, равно $Exp[\ln \tilde{Y} + x(p)S_{in}]$.

Пример 5

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек Черноморского побережья Кавказа разработана методика ежедневного краткосрочного прогнозирования среднесуточных расходов воды с заблаговременностью 1 сутки. Методика основана на концептуальной модели формирования талого и дождевого стока горных рек. Параметры модели оценивались для каждого месяца в отдельности по данным гидрометеорологических наблюдений. Для реки Сочи у г. Сочи анализировался ряд проверочных прогнозов за период с 1984 по 2005 год продолжительностью (с учетом пропусков) $n = 558$ суток. Выполненная проверка с применением критериев Питмена и Крамера – Мизеса – Смирнова показала применимость рекомендуемого второго метода выпуска прогноза в вероятностной форме для данного речного створа [4].

В качестве дополнительной вероятностной формы 1 (вариант 1.3) выпуска прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи для каждого месяца определена вероятность $P_{кр}(\tilde{Q})$ превышения соответствующих различным уровням паводковой опасности критических расходов воды $Q_{кр} = 300, 500$ и 640 м³/с в зависимости от прогноза \tilde{Q} . График функции $P_{кр}(\tilde{Q})$ для ноября, наиболее опасного месяца в районе города Сочи с показателем $S_{in} = 0,66$, представлен на рис. 2.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны рекомендации по выпуску прогнозов речного стока в вероятностной форме, которая в дополнение к выпускаемому в виде конкретного числа прогнозу в детерминированной форме дает представление о диапазоне возможных значений прогнозируемой величины в зависимости от располагаемой гидрометеорологической информации.

Рассматриваются различные варианты вероятностной формы выпуска прогноза, включая условную функцию распределения вероятностей прогнозируемой величины и ее условную функцию обеспеченности, соответствующие располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации. В дополнение к ним рассматриваются форма 1, определяющая условные вероятности попадания прогнозируемой

величины в заданные интервалы, и форма 2, определяющая условные интервалы, в которые прогнозируемая величина может попадать с заданной вероятностью.

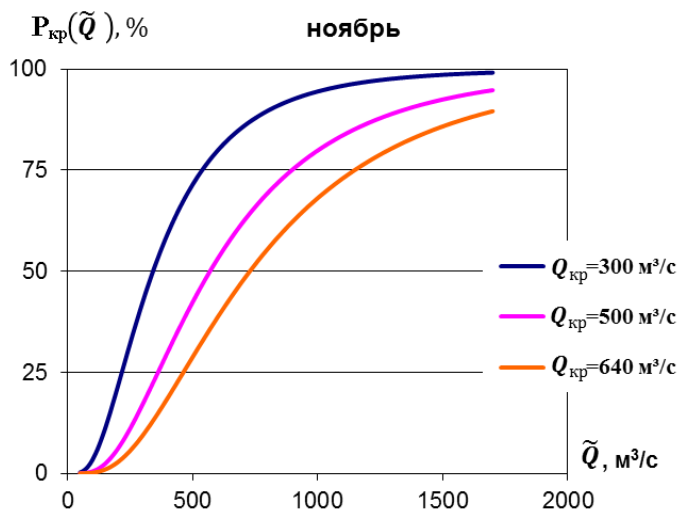


Рис. 2. Графики функции прогностической вероятности $P_{кр}(\tilde{Q})$ в створе р. Сочи – г. Сочи для ноября [4].

Fig. 2. Graphs of the forecasted probability function $P_{кр}(\tilde{Q})$ at the Sochi River – city of Sochi for November [4].

Теоретически обосновано и на конкретных примерах продемонстрировано недопустимое с практической точки зрения занижение вероятного диапазона ожидаемых значений прогнозируемой величины при использовании ансамблевого подхода. Обоснована целесообразность получения вероятностных форм выпуска прогнозов на основе статистического анализа рядов проверочных прогнозов.

Для долгосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов речного стока предлагается метод получения вероятностной формы их выпуска, основанный на предположении, что при любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации ошибки прогноза подчиняются нормальному распределению вероятностей с постоянной дисперсией.

Для краткосрочных и некоторых среднесрочных прогнозов предлагается метод получения вероятностной формы их выпуска, основанный на предположении, что при любых возможных вариантах располагаемой гидрометеорологической информации прогноз логарифмов характеристик речного стока дает ошибки, которые подчиняются нормальному распределению вероятностей с постоянной дисперсией.

Приведены статистические критерии, предназначенные для проверки применимости каждого из методов. Даны примеры выпуска долгосрочных и краткосрочных прогнозов в вероятностной форме, полученной с использованием каждого из предлагаемых методов.

Внедрение предлагаемых рекомендаций в систему оперативного гидрологического прогнозирования позволит получать научно обоснованные выводы об ожидаемых значениях характеристик речного стока.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики имени Г.И. Марчука Российской академии наук при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00247-п).

Список литературы

1. Арефьева О.Н., Голоднюк Н.Е., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Ириклинское водохранилище // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 1 (395). С. 39-57.
2. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты. М.: Изд-во МГУ, 2012. 142 с.
3. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 356. 247 с.
5. Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 68-86.
6. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. М.: Изд-во Гидрометцентра России, 2018. 160 с.
7. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Изд-во Гидрометцентра России, 2023. 200 с.
8. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117.
9. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 276 с.
10. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 76-88.
11. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2019. 300 с.
12. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 193 с.
13. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
14. Buizza R., Hollingsworth A., Lalaurette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System // Weather and Forecasting. 1999. Vol. 14. P. 168-189.
15. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. Vol. 22. P. 2073-2089.
16. Goldin B. Quantitative precipitation forecasting in the UK // Journal of Hydrology. 2000. Vol. 239, is. 1. P. 286-305. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00354-1

17. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. 2009. 302 p.
19. Krzysztofowicz R. The case for probabilistic forecasting in hydrology // Journal of Hydrology. 2001. Vol. 249. P. 2-9.
20. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) // WMO/TD-No. 769. Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 55. Geneva: HWR, 1994. 23 p.
21. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. 2011. 138 p.
22. Pappenberger F., Pagano T.C., Gelfan A., Kuchment L. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe // Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. Berlin: Springer Heidelberg, 2016. P. 1-35. DOI: 10.1007/978-3-642-40457-3-47-1

References

1. Arefyeva O.N., Golodnyuk N.E., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Forecasting water inflow into the Iriklienskoe Reservoir. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2025, vol. 395, no. 1, pp. 39-57 [in Russ.].
2. Asarin A.E., Bestuzheva K.N., Khristoforov A.V., Chalov S.R. Vodokhozyaistvennie rascheti. M.: Izd-vo MGU publ., 2012, 142 p. [in Russ.].
3. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
4. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Flood forecasting and early warning system for rivers of the Black Sea shore of Caucasian Region and the Kuban River basin. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2015, vol. 356, 247 p. [in Russ.].
5. Borsch S.V., Gelfan A.N., Moreydo V.M., Motovilov Yu.G., Siminov Yu.A. Long-term ensemble forecasting of spring inflow into the Cheboksary reservoir based on the hydrological model: results of operational testing. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 366, pp. 68-86 [in Russ.].
6. Borsch S.V., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Statisticheskii analiz v gidrologicheskikh prognozakh. Moscow, Hydrometcenter of Russia publ., 2018, 160 p. [in Russ.].
7. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Streamflow forecasting in Russia]. Moscow, Hydrometcenter of Russia publ., 2023, 200 p. [in Russ.].
8. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Selection of methods for streamflow forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2024, vol. 391, no. 1, pp. 71-117 [in Russ.].
9. Gel'fan A.N. Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovaniye formirovaniya talogo stoka. M.: Nauka publ., 2007, 276 p. [in Russ.].
10. Kuchment L.S., Gel'fan A.N. Long-term ensemble forecast of snowmelt runoff with the help of the physics-based models of runoff generation. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2007, vol. 32, no. 2, pp. 126-134.
11. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh basseynov. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2008, 394 p. [in Russ.].
12. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
13. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press publ., 2016, 480 p.

14. Buizza R., Hollingsworth A., Lalaurette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 1999, vol. 14, pp. 168-189. DOI: 10.1175/1520-0434(1999)014<0168:PPOPUT>2.0.CO;2
15. Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, pp. 2073-2089. DOI: 10.5194/hess-22-2073-2018.
16. Goldin B. Quantitative precipitation forecasting in the UK. *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 239, is. 1, pp. 286-305. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00354-1
17. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London, Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
18. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. *WMO-No. 168*, 2009, 302 p.
19. Krzysztofowicz R. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology*, 2001, vol. 249, pp. 2-9.
20. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS). Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 55. Geneva, HWR, 1994, 23 p.
21. Manual on Flood Forecasting and Warning. *WMO-No. 1072*. WMO, Geneva, 2011, 138 p.
22. Pappenberger F., Pagano T.C., Gelfan A., Kuchment L. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Berlin: Springer Heidelberg, 2016, pp. 1-35. DOI: 10.1007/978-3-642-40457-3-47-1

Поступила 26.05.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;

принята в печать 18.06.2025.

Submitted 26.05.2025; approved after reviewing 04.06.2025;

accepted for publication 18.06.2025.

УДК: 551.509.51/.55

Численный краткосрочный прогноз погоды для регионов России, Зарубежной Европы, Центральной Азии, Северного Ледовитого океана, Атлантического и Тихого океанов севернее 29 град. с. ш. на базе конфигурации ICON-Ru13/6N29 (шаг сетки 6,5 км, 74 вертикальных уровней) на основе глобальной модели нового поколения ICON

Ривин Г.С., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Коспанов А.А., Никитин М.А.

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

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана для краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) **русская глобальная конфигурация ICON-Ru13/6N29** негидростатической **свободно распространяемой модели ICON**. Эта конфигурация ICON-Ru13/6N29 в тропосфере, стратосфере и мезосфере имеет шаг сетки 13 км и 120 уровней до 74 км по вертикали и 7 уровней в слое суши глубиной до 14 м. В эту сетку по горизонтали и вертикали вложена с шагом сетки 6,5 км дочерняя подсетка, расположенная севернее параллели 29,5° с. ш. на нижних (из 120) 74 (до 23 км) уровнях в атмосфере и 7 уровнях в почве. Отметим, что счет идет одновременно на обеих сетках: сетке с шагом 13 км и дочерней подсетке с двухсторонним обменом информацией вблизи границ дочерней подсетки на каждом шаге по времени. Фактически счет проводится на неравномерной сетке с шагами сетки, равными 13 или 6,5 км.

Глобальная конфигурация ICON-Ru13/6N29 требует только начальные данные и разработана для подготовки независимо ни от кого начальных и боковых условий для нового поколения моделей сверхвысокого разрешения для ограниченной территории (с шагами сетки 1 км и менее) любой территории мира и с любым интервалом задания боковых границ, не загружая дополнительные каналы связи и не ожидая, когда эти данные будут подготовлены в другом месте. При этом ЧПП с шагом сетки 6,5 км рассчитываются с почти в 2 раза большим количеством уровней (74 вместо 40) и для в 2 раза большей территории, чем по также российской ныне оперативной конфигурации COSMO-Ru6ENA модели COSMO, которая, требуя для своей работы начальные и боковые данные, имеет шаг сетки 6,6 км, 40 уровней по вертикали до 23 км и подготавливает ЧПП для Северной Евразии (все регионы России, Европа, Центральная Азия и прилегающие акватории Северного Ледовитого океана, Атлантического и Тихого океанов). Кроме того, объем данных, необходимых для работы

ICON-Ru13/6N29, в 3 раза меньше объема начальных и боковых граничных данных, требуемых для работы COSMO-Ru6ENA. В дальнейшем запланирована замена и остальных оперативных конфигураций модели COSMO с меньшими шагами сетки.

Оперативные испытания для холодного (с 1 января по 20 мая 2024 г.) **и теплого** (с 21 мая по 25 сентября 2024 г.) **периодов** показали устойчивое преимущество качества краткосрочных прогнозов базовых метеорологических полей по ICON-Ru13/6N29 по сравнению с оперативными прогнозами COSMO-Ru6ENA в Гидрометцентре России. Например, для теплого периода ошибки ЧПП в зависимости от заблаговременности (24–120 часов) по ICON-Ru13/6N29 меньше, чем по COSMO-Ru6ENA, на 14–26 % для территории России для полей давления на уровне моря (прогнозы по исходным данным за 00 ч ВСВ на 24, 48, 72, 96 и 120 часов улучшены на 14, 21, 26, 18 и 15 % соответственно) и на 10–21 % для Европейской территории России для полей приземной температуры воздуха (прогнозы по исходным данным за 12 ч ВСВ на 24, 48, 72, 96 и 120 часов на 13, 24, 21, 10 и 18 % соответственно).

В лаборатории оценки качества гидрометеорологической информации Гидрометцентра России под руководством А.Н. Багрова проведено сравнение оперативных численных прогнозов, доступных в оперативной практике Гидрометцентра России, как с оперативным анализом Гидрометцентра России, так и с данными наблюдений (рис. 1 и 2). Это сравнение показало, что для теплого и холодного периодов испытаний качество прогнозов поля температуры на высоте 2 м по конфигурации ICON-Ru13/6N29 сопоставимо с качеством прогнозов Немецкой метеослужбы и других зарубежных центров и превосходит качество прогнозов по российским конфигурациям COSMO-Ru6ENA и ПЛАВ10.

Аналогичная картина наблюдается для оценок других базовых метеорологических полей метеорологических параметров для Европейской территории России и для других регионов страны. Соответствующие рисунки не приводятся.

Результаты испытаний рассмотрены на заседаниях секции метеорологических прогнозов Ученого Совета Гидрометцентра России и на заседаниях Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета.

Своим решением от 26 июня 2024 года ЦМКП Росгидромета рекомендовала внедрить в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» краткосрочный численный прогноз погоды в холодный период года по территории России и прилегающим регионам на базе конфигурации ICON-Ru13/6N29. По итогам второго периода испытаний в своем решении от 5 ноября 2024 года ЦМКП отметила устойчивое преимущество качества краткосрочных прогнозов базовых метеорологических полей

по ICON-Ru13/6N29 по сравнению с оперативными прогнозами в Гидрометцентре России COSMO-Ru6ENa как для теплого, так и для холодного периодов и рекомендовала внедрить ICON-Ru13/6N29 в оперативную практику и для теплого периода.

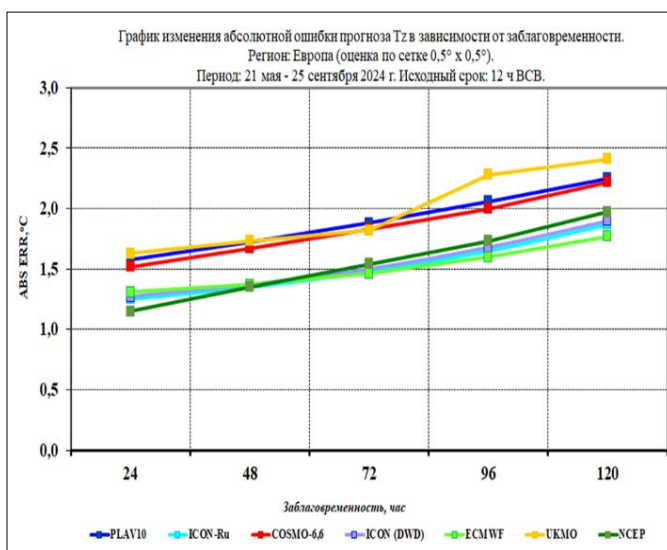
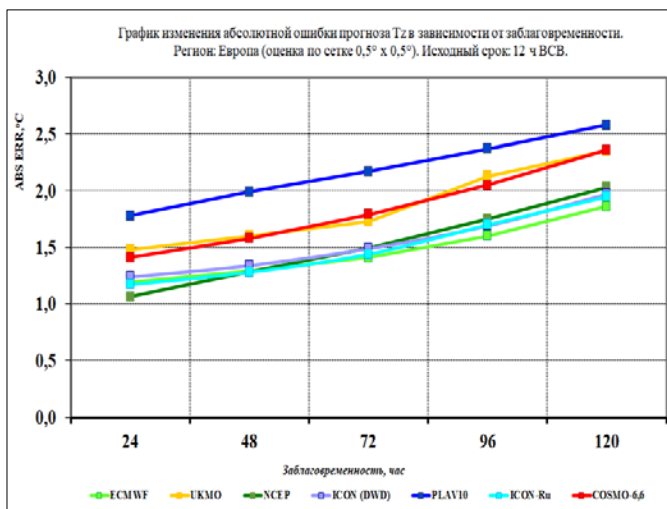


Рис. 1. Абсолютная ошибка прогноза температуры на уровне 2 м по различным моделям для периодов с 1 января по 20 мая 2024 г. (сверху) и с 21 мая по 25 сентября 2024 г. (снизу) для региона Европа (сравнение с оперативным анализом Гидрометцентра России).

Рекомендовано постепенно заменить оперативно функционирующую конфигурацию COSMO-Ru6ENA модели COSMO на конфигурацию ICON-Ru13/6N29. Решения ЦМКП доступны на сайте Методического кабинета Гидрометцентра России в разделе «Решения ЦМКП» [<https://method.meteorf.ru/cmcp/2024/>].

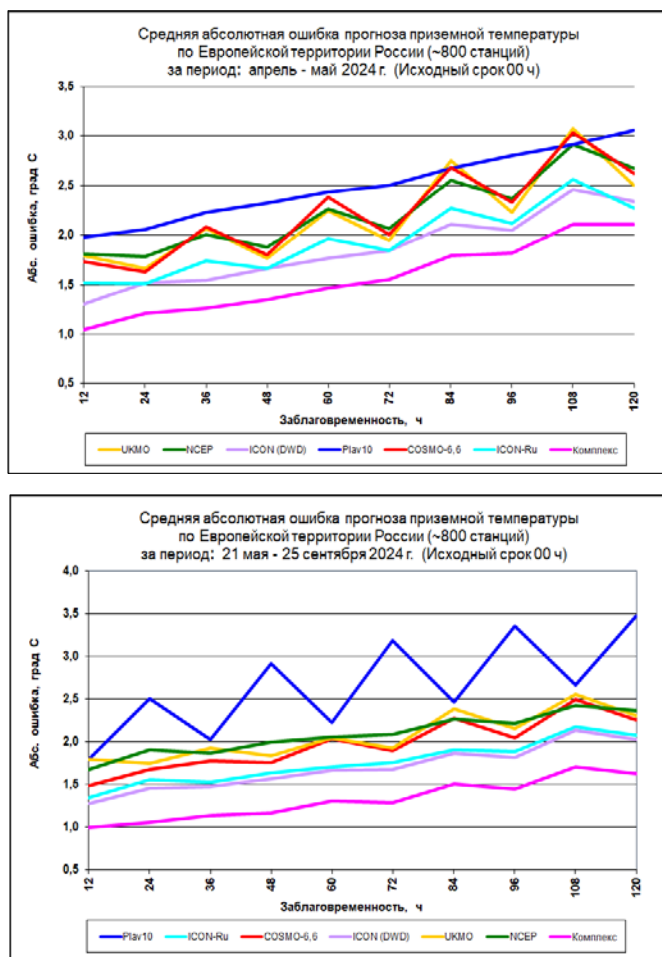


Рис. 2. Абсолютная ошибка прогноза температуры на уровне 2 м по различным моделям (комплекс – прогноз для синоптических станций по комплексу моделей А.Н. Багрова и др.) для периодов с 1 апреля по 20 мая 2024 г. (сверху) и с 21 мая по 25 сентября 2024 г. (снизу) для Европейской территории России относительно данных наблюдений на ≈800 станциях.

УДК 551.509

Технология сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6, включающей дополнительный модуль расчета сверхдолгосрочных прогнозов

**Хан В.М.^{1,2}, Тищенко В.А.¹, Круглова Е.Н.¹,
Реснянский Ю.Д.¹, Субботин А.В.¹, Грицун А.С.²,
Володин Е.М.^{2,1}, Тарасевич М.А.^{2,1}, Брагина В.В.^{2,1}**

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

²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «ИВМ РАН» в 2023 году разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе климатической модели INM-CM5 [2, 3, 6]. Данная система сезонного прогнозирования успешно прошла испытания и была рекомендована ЦМКП Росгидромета к внедрению в прогностическую практику ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра в ноябре 2023 года [5]. Одновременно проводились работы по усовершенствованию модели Земной системы и созданию новой версии INM-CM6 с увеличенным пространственным разрешением, улучшенным описанием физических процессов на подстилающей поверхности, усовершенствованиями в описании облачности и параметризации конденсации и улучшенной вычислительной эффективностью блока океана.

Модель в версиях INM-CM5 и INM-CM6 состоит из основных блоков: блока динамики атмосферы, аэрозольного блока, блока динамики океана и динамики и термодинамики морского льда. В версии INM-CM5 разрешение модели в атмосферном блоке составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте, 73 сигма-уровней до высоты около 60 км, а в океанском блоке – $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте и 40 сигма-уровней по вертикали. В версии INM-CM6 разрешение модели в атмосферном блоке составляет $1.25^\circ \times 1^\circ$ по долготе и широте, 73 вертикальных сигма-уровней и такие же, как в INM-CM5, параметры сеточной области океанского и ледового блоков.

В версии INM-CM5 начальные состояния атмосферы, океана и суши для сезонных прогнозов задаются в виде аномалий: "климатология модели + аномалия реанализа или текущего анализа на момент старта прогноза". Для построения начальных состояний используются данные реанализа ERA5 для атмосферы и деятельного слоя суши, а также анализы SODA3.4.2

и СУОД ГМЦ для океана и морского льда [1, 4]. Прогностический ансамбль включает 20 реализаций.

В версии INM-CM6 начальные состояния задаются в терминах абсолютных значений с использованием таких же источников атмосферных и океанских данных, как в предыдущей версии INM-CM5: в блоке динамики атмосферы (температура и влажность воздуха, горизонтальные компоненты скорости ветра), в блоке динамики океана и динамики и термодинамики морского льда (температура и солёность океана, сплоченность и толщина морского льда, уровень моря). Для остальных полей способ инициализации по сравнению с INM-CM5 не изменился. Прогностические ансамбли включают 10 реализаций для ретроспективных прогнозов (1991–2020 гг.) и 30 реализаций для квазиоперативных прогнозов (2022–2024 гг.).

Расчеты с INM-CM5 и INM-CM6 производились на вычислительном комплексе Cray XC40.

Согласно Плану испытаний **ЦМКП** проводились оперативные испытания технологии на основе новой версии модели INM-CM6 для периода с 2022 года по март 2024 года, а также оценивались прогнозы на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 год. В качестве объекта прогнозирования рассматривались среднемесячные и среднесезонные аномалии для нескольких метеорологических параметров, включая давление на уровне моря (MSLP), высоту геопотенциала на уровне 500 гПа (H500), температуру на уровне 850 гПа (T850) и у земной поверхности (T2m), а также осадки (Prec).

В процессе испытаний проводилось сопоставление оценок по двум версиям прогностической модели.

Оценки ретроспективных прогнозов по версии модели INM-CM6.

Анализ оценок качества рассматриваемых метеорологических параметров для месячных детерминистских прогнозов с нулевой, месячной и трёхмесячной заблаговременностью и для сезонных детерминистских прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью с использованием критериев ACC, RMSE, MSSS по пяти различным регионам (земной шар, внутритропическая зона Южного полушария, тропическая зона, внутритропическая зона Северного полушария, Северная Евразия) показал следующее.

Месячные и сезонные прогнозы с нулевой заблаговременностью обладают наивысшим качеством среди прогнозов большей заблаговременности. Диапазон изменчивости составляет для T2m по MSSS от 0.06 (Северная Евразия) до 0.41 (тропики), для RMSE от 1.9 (Северная Евразия) до 0.39 (тропики) для месячных прогнозов нулевой заблаговременности. Для сезонных прогнозов нулевой заблаговременности диапазон изменчивости составляет для T2m по MSSS от 0.08 (Южные экстратропики) до 0.50 (тропики), для RMSE от 1.29 (Северная Евразия) до 0.34 (тропики). Результаты месячных прогнозов с 2 и 3-месячной заблаговременностью оказываются хуже, особенно в северных регионах.

Анализ оценок качества вероятностных прогнозов проводился для всех параметров для месячных прогнозов с нулевой, месячной и трёхмесячной заблаговременностью и для сезонных прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью на основе показателей ROC_B (Below Normal), ROC_N (Near Normal) и ROC_A (Above Normal) по пяти различным регионам (земной шар, внутритропическая зона Южного полушария, тропическая зона, внутритропическая зона Северного полушария, Северная Евразия).

В качестве примера ниже представлены выводы для приземной температуры (T2m) по земному шару:

– месячные прогнозы с нулевой заблаговременностью (1 мес.) имеют наивысшие ROC оценки для всех градаций (ниже нормы, около нормы и выше нормы);

– сезонные прогнозы с нулевой заблаговременностью (1–3 мес.) также демонстрируют высокие ROC оценки, ненамного уступая месячным прогнозам: 1–3-месячный прогноз имеет ROC_B = 0.75, ROC_A = 0.74;

– по мере увеличения заблаговременности наблюдается снижение качества прогноза. Для ROC_B и ROC_A от 0.73 (1 мес.) до 0.66 (4 мес.).

Региональные особенности:

– тропическая зона имеет самые высокие ROC значения для всех типов прогнозов и всех градаций, что указывает на высокую надежность прогнозов в этом регионе. Например, для месячного прогноза ROC_B и ROC_A составляют 0.81. Для 1–3-месячных прогнозов ROC_B и ROC_A составляют 0.82. ROC_N имеет меньшие значения по сравнению с крайними градациями. Для месячных прогнозов ROC_N падает от 0.65 до 0.58 по мере увеличения заблаговременности;

– внутритропическая зона Северного полушария и Северная Евразия имеют наиболее низкие значения ROC, особенно для прогнозов с большой заблаговременностью;

– для внутритропической зоны Южного полушария результаты оценок чуть выше оценок по экстратропикам Северного полушария.

Краткое сравнение оценок качества версий INM-CM6 и INM-CM5. Проводилось сравнение качества исторических прогнозов по двум версиям модели Земной системы (INM-CM5 и INM-CM6). Рассчитывалась оценка статистической значимости изменения оценок ACC, ROC_A, ROC_B. Вычислялась серия разностей показателей, рассчитанных для INM-CM6 и INM-CM5. Затем методом бутстрепа был вычислен 95%-ный доверительный интервал средней разности (10 000 выборок). Если нижняя граница доверительного интервала оказывалась больше нуля, то считалось, что новая модель значимо лучше.

Анализируя разности коэффициентов пространственной корреляции (ACC) для моделей INM-CM6 и INM-CM5 по переменным H500, MSLP, T2m, Prcs можно выделить следующие особенности.

В большинстве месяцев наблюдаются положительные разности, что говорит о том, что INM-CM6 в целом дает более высокие значения ACC по сравнению с INM-CM5 (например, месяц 1, 2, 5, 8, 9, 12). Модель INM-CM6 показывает лучшие результаты по сравнению с INM-CM5 для H500, Prec и T2m, тогда как для MSLP наблюдаются близкие значения оценок для 1 месяца прогнозов и доминирование отрицательных оценок бутстреп анализа для сезонных прогнозов.

Отрицательные значения наблюдаются в июне (-0.026) и ноябре (-0.127), что указывает на худшее качество ретроспективных прогнозов модели INM-CM6 по сравнению с INM-CM5.

В апреле и ноябре все переменные (кроме T2m в 4 месяце) показывают отрицательные разности, что может указывать на слабые стороны INM-CM6 в эти периоды. Особенно это выражено для ноября у MSLP (-0.145) и H500 (-0.127).

Сезонные прогнозы, как правило, имеют меньшие разности оценок, что может указывать на снижение роли отличий в процедуре подготовки начальных данных для разных версий моделей при интегрировании на сезонных интервалах времени.

Для переменных T2m и Prec наблюдается относительная близость в оценках в нескольких месяцах года, с небольшими колебаниями, что может указывать на их меньшую чувствительность к изменениям в настройках разных версий модели.

Для января, февраля, мая и августа характерны наивысшие значения разностей оценок для всех переменных, что может указывать на более успешное прогнозирование климатических паттернов новой версией модели в эти месяцы года.

Результаты показывают, что модель INM-CM6 в целом улучшает прогнозы по сравнению с ее предыдущей версией, однако необходимо учесть особенности для конкретных переменных и периодов прогнозирования.

Оценки квазиоперативных прогнозов. На квазиоперативной выборке для сезонных прогнозов по Северной Евразии с нулевой заблаговременностью по модели INM-CM6 параметр RMSE для T2m варьировался в диапазоне от 0.66 до 1.76, MSSS от -0.67 до 0.70, ACC от -0.23 до 0.6. Средние значения за испытуемый период составили: ACC=0.18; RMSE=1.16; MSSS=0.23. По старой версии модели (INM-CM5) RMSE для T2m варьировался в диапазоне от 0.78 до 1.95, MSSS от -0.52 до 0.55, ACC от -0.3 до 0.47. Средние значения за испытуемый период для старой версии модели составили: ACC=0.13; RMSE=1.25; MSSS=0.12. Уровень статистической значимости разностей оценок по разным версиям модели рассчитывался с использованием критерия Вилкоксона и составил 0.264 (ACC), 0.038 (RMSE), 0.045 (MSSS).

Для осадков по модели INM-CM6 параметр RMSE варьировался в диапазоне от 0.47 до 0.97, MSSS от -1.04 до 0.20, ACC от -0.1 до 0.43. Средние

значения за испытуемый период составили: ACC=0.15; RMSE=0.68; MSSS= -0.21. Для сравнения, по модели INM-CM5 параметр RMSE для осадков варьировался в диапазоне от 0.46 до 1.0, MSSS от -0.54 до 0.06, ACC от -0.15 до 0.29. Средние значения оценок за испытуемый период для старой версии модели составили: ACC=0.07; RMSE=0.68; MSSS= -0.22. Уровень статистической значимости разностей по критерию Вилкоксона составил: 0.01 (ACC), 0.4 (RMSE), 0.33 (MSSS).

Сравнение качества квазиоперативных сезонных прогнозов по версиям INM-CM5 и INM-CM6 с аналогичными прогнозами зарубежных метеоцентров. В ходе испытаний успешность ансамблевых прогнозов моделей INM-CM5 и INM-CM6 сопоставлялась с прогнозами зарубежных метеоцентров, участвующих в проектах WMO LC LRF MME и COPERNICUS. Анализ сезонных прогнозов различных моделей по трем показателям (ACC, RMSE и MSSS) позволяет выделить сильные и слабые стороны каждой модели, а также оценить их эффективность в прогнозировании метеорологических переменных на сезонных интервалах времени.

Модель TCC является лидером среди всех участников по всем трем метрикам (ACC, RMSE и MSSS) для прогнозов T2m на территории Северной Евразии. Модели ECMWF, UKMO и JMA стабильно занимают 2–4 места по всем трем метрикам, что говорит о высоком уровне надежности и точности их прогнозов. Модели INM-CM6, INM-CM5, CMCC и DWD занимают средние позиции, указывая на достаточно хорошее качество прогнозов, хотя и уступают TCC, ECMWF, UKMO и JMA. Модели ECCS, MFR и NCEP занимают нижние позиции по всем показателям.

В период с начала 2022 до начала 2024 года оценки качества прогнозов по модели INM-CM6 для T2m Северной Евразии занимали 4–6 места среди 11 лучших мировых моделей, а для осадков – 5–7 места.

Лучшие результаты достигаются при меньшей заблаговременности прогнозов. Прогнозы с нулевой заблаговременностью для месячных и сезонных прогнозов наиболее успешны.

Несмотря на географические и климатические особенности, прогнозы для тропического региона наиболее успешны для всех типов прогнозов и градаций.

В новой версии модели сохраняется проблема в прогнозировании условий около нормы (ROC_N). Значения ROC для этой градации ниже по сравнению с градациями «ниже нормы» и «выше нормы».

Хотя INM-CM6 в целом показывает обнадеживающие результаты для H500, T850, T2m и Prec, существуют месяцы, требующие более глубокого анализа и понимания причин снижения качества. Обе версии модели показывают различную устойчивость в зависимости от прогнозируемой переменной, что стоит учитывать при применении результатов.

В целом, можно сделать вывод, что модель INM-CM6 демонстрирует лучшее качество прогнозов по сравнению с моделью INM-CM5, хотя

тщательная работа по уменьшению ошибок в прогнозах по-прежнему необходима, особенно в отношении давления на уровне моря и осадков.

Своим решением от 11 сентября 2024 года ЦМКП рекомендовала:

– **внедрить в прогностическую работу** ФГБУ «Гидрометцентр России» технологию сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6, включающей дополнительный модуль расчета сверхдолгосрочных прогнозов;

– **внедрить в прогностическую работу** СЕАКЦ технологию сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6, включающей дополнительный модуль расчета сверхдолгосрочных прогнозов.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д. Усвоение океанографических данных как одна из ключевых задач оперативной океанологии // *Гидроакустика*. 2023. № 53(1). С. 107-117.

2. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // *Известия РАН. ФАО*. 2023. Том 59, № 1. С. 19-26.

3. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В. и др. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // *Известия РАН. ФАО*. 2017. Том 53, № 2. С. 164-178.

4. Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А., Степанов В.Н., Струков Б.С., Хан В.М., Володин Е.М., Грицун А.С., Тарасевич М.А., Брагина В.В. Верификация сезонных прогнозов температуры поверхности океана и ледовых характеристик на основе модели Земной системы ИВМ РАН // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 4 (394). С. 6-38.

5. Хан В.М., Круглова Е.Н., Тищенко В.А., Куликова И.А., Субботин А.В., Грицун А.С., Володин Е.М., Тарасевич М.А., Брагина В.В. Верификация сезонных ансамблевых прогнозов на базе модели земной системы INM-CM5 // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 7. С. 40-56.

6. Bragina V., Volodin E., Chernenkov A. et al. Simulation of climate changes in Northern Eurasia by two versions of the INM RAS Earth system model // *Clim. Dyn.* 2024. Vol. 62. P. 7783-7797.

УДК 551.509.52

Технология наукастинга скорости порывов ветра в летний период на основе данных дистанционного зондирования атмосферы и численных прогнозов погоды

Киктёв Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В.

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

В период май–сентябрь 2024 года проводились испытания технологии наукастинга порывов ветра на основе трех типов информации: 1) наукасты (прогностические поля) порывов ветра до 150 мин в области обзоров радиолокаторов ДМРЛ-С в 10-минутных интервалах (по 144 прогноза ежесуточно); 2) поля прогнозов (мезопрогнозы) средней скорости и порывов ветра на 720 мин через каждые 3 часа с помощью модели COSMO-Ru/2.2 (8 прогнозов ежесуточно в 10-минутной дискретности); 3) наблюдения автоматических метеорологических станций (АМС) в 10-минутных интервалах (по 144 телеграмм ежесуточно). В выборках для каждой заблаговременности содержалось примерно по 20600 полей наукастов и по 1150 полей мезопрогнозов, а для всех сроков наблюдений – 21024 одновременных станционных сообщений. Области охвата всеми типами информации расположены в Центральном федеральном округе (ЦФО) и имеют большое взаимное перекрытие (рисунок).

Машинное обучение: алгоритм "Случайный лес". Технология наукастинга порывов на срок до 2.5 часов тестировалась с применением алгоритма машинного обучения "Случайный лес". Для построения решающих правил использовалась информация последнего доступного оперативного ЧПП модели COSMO-Ru/2.2, представленного с 10-минутной детализацией внутри периода прогноза. Расчет ЧПП системы COSMO-Ru/2.2 на срок до 12 часов проводился восемь раз в сутки по начальным данным за 00, 03, ..., 21 ч ВСВ.

В качестве предикторов выбирались шесть параметров ЧПП: максимальная отражаемость, высота верхней границы облачности, высота нулевой изотермы, средняя скорость ветра на высоте 1 км, средняя скорость ветра на высоте 3 км, средняя скорость ветра на 10 метрах. В обучающую выборку включались попадающие на период наукастинга 10-минутные поля скорости порывов и шести предикторов из последнего численного прогноза модели COSMO-Ru/2.2.

Предварительно модельные значения предикторов и предиктанта "агрегировались" – осреднялись по окрестным узлам сетки в окнах определенных размеров, при этом для максимальной отражаемости и высоты ВГО отбирались максимальные значения в некоторых окрестностях; все параметры агрегирования подбирались экспериментально.

Авторская особенность предложенной технологии состоит в следующем. На начальном этапе прогноза часть модельных предикторов заменяется результатами пространственно-временной экстраполяции радиолокационных характеристик, полученных с помощью модели ruSTEPS [5] в приложении к композитным радарным полям максимальной отражаемости и высоты верхней границы облачности. "Замена" обусловлена тем, что модель ruSTEPS, предназначенная исходно для прогноза осадков, способна воспроизводить структуру и этих полей [2].

Условия верификации. Для верификации исходные мезопрогнозы преобразуются в пространственный формат наукастов с помощью обрезки границ и интерполяции методом "ближайшего соседа". Качество наукастинга оценивается по дихотомическим полям из нулей и единиц, при этом единицей маркируются категории порывов относительно следующих порогов: 15 м/с как "неблагоприятное метеорологическое явление", 20 м/с – как "сильный ветер" и более 25 м/с – как "очень сильный" ветер [4]. За основную меру качества принята оценка "по пространственным долям" (FSS, [1, 3, 6]), рассчитываемая в квадратных окнах со стороной от нуля км (поточечное сравнение) до 40 км на километровой сетке верификации размером 978×978.

Очевидно априори, что различие типов исходной информации по значениям скорости порывов, по пространственной структуре и по временному регламенту выдачи оказывает критичное воздействие на статистическую значимость результатов оценок.

Приведем пример распределения единиц в наблюдениях сети АМС, призванных служить основной мерой "истинности прогнозов". Так, среди примерно 20600 стационарных сообщений обнаружено 549 сообщений с порывами не менее 15 м/с (менее 3 %) и 119 сообщений с порывами не менее 20 м/с (менее 0.1 %). Распределение сообщений по количеству станций, одновременно зафиксировавших такой порыв в интервале 10 мин, выглядит следующим образом. По одному и двум порывам (т. е. на одной-двух станциях) было зафиксировано в 497 сообщениях (около 91 % от 549). По три порыва – в 19 сообщениях, по четыре – в 15, по 5 и 6 порывов – в 13 сообщениях. Более 10 станций (с максимумом 13 станций) сообщили одновременно о порывах такой силы в четырех случаях. В сообщениях о порывах не менее 20 м/с единственный порыв отмечен в 111 сообщениях (93 %), 2 порыва – в 4 сообщениях, 3 и 4 порыва отмечены в 2 сообщениях. Крайне разреженным и эпизодическим сообщениям АМС о существенных порывах соответствуют иногда тысячи и десятки тысяч единиц в полях наукастинга и мезопрогноза.

В то же время общие характеристики наукастов с порывами из модели машинного обучения могут заметно отличаться от характеристик полей с такими же порывами из системы ЧПП. Так, для каждой заблаговременности в интервале от 10 до 150 минут обнаружено примерно 350–400 полей

наукастинга с порывами не менее 20 м/с, при этом максимальное количество точек с порывами изменяется с заблаговременностью в интервале примерно 20–30 тысяч. Количество аналогичных полей в мезопрогнозах для этих же заблаговременностей изменяется от 240 до 420 полей при размахе максимального количества точек примерно от 7 до 30 тысяч. Напомним, для каждой заблаговременности полные выборки наукастов и мезопрогнозов имеют несопоставимые объемы порядка 20600 и 1150 полей соответственно. В дополнение к этому возникающие контрасты пространственных распределений порывов в парах синхронизированных полей могут приводить к вырождению рассчитываемых показателей FSS.

Для сглаживания столь сильного пространственно-временного разнообразия поля и стационарные наборы обобщались по часовому интервалу: при этом единичное значение присваивается точке по дизъюнкции – если в течение пяти 10-минутных интервалов времени **после** срока наукастинга хотя бы в одном случае порыв данной категории наблюдался.

Результаты испытаний. В ходе испытаний проведены визуальные сопоставления полей прогнозов с данными ЧПП и АМС, проанализированы случаи сильных порывов, зафиксированных во всех трех типах информации. Для финальных выводов отобраны примеры наукастинга порывов не менее 20 м/с, в качестве контроля использованы поля наукастинга на 10 мин ("поля первого приближения"). Результаты представлены в таблице.

Таблица. Количество пар с оценкой FSS >0.5 в окнах со сторонами 0–40 км

Усл. заблаговременность	Кол-во пар	Окна со стороной (в км)				
		0	10	20	30	40
10	453	245	277	289	293	297
20	419	182	209	221	233	242
30	398	135	171	183	194	201
40	372	101	126	134	154	164
50	357	91	106	118	127	135
60	335	59	86	94	109	114
70	307	43	55	68	76	84
80	290	32	42	49	64	69
90	270	23	31	39	45	53

Отметим, что снижение количества пар сравниваемых полей с ростом заблаговременности характеризует "неустойчивость" разработанной прогностической системы в интервале полутора часов. При этом доля "качественных" прогнозов в окнах до 40×40 км уменьшается от 66 (297/453) до 20 %.

Таким образом, качество прогностической системы (по значению $FSS > 0.5$) в пространственном масштабе до 40×40 км и в часовом обобщении превышает 50 % лишь в интервале прогноза до получаса ($201/398 > 0.505$). Вывод основан на предположении, что прогнозы системы наукастинга на 10 минут более-менее точно отражают реальность и могут использоваться в верификации в качестве "первого приближения".

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета решением от 20 декабря 2024 г. **рекомендовала:**

– использовать в ФГБУ «Гидрометцентр России» технологию наукастинга скорости порывов ветра в качестве вспомогательного прогностического метода в теплый период года (май–сентябрь) для территории Центрального региона России;

– авторам продолжить развитие технологии наукастинга.

Список литературы

1. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.

2. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Наукастинг параметров и явлений погоды: инструменты, возможности и ограничения // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 81-92.

3. Муравьев А.В., Киктев Д.Б. Качество, предсказуемость и полезность в задачах радиолокационного наукастинга осадков // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 93-107.

4. РД 52.27.724-2019 Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: Гидрометцентр России», 2019. 66 с.

5. Pulkkinen S., Nerini D., Hortal A.P., Velasco-Forero C., Seed A., Germann U., Foresti L. Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0) // Geosci. Model Dev. 2019. Vol. 12. P. 4185-4219.

6. Roberts N., Lean H. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high resolution forecasts of convective events // Mon. Wea. Rev. 2008. Vol. 136. P. 78-97.

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 абзачного 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 O 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 (396)

Под редакцией
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

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 18.06.2025. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 130 экз. Заказ № 0643
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3

Подписной индекс журнала по каталогу АО «Почта России» – ПП976



ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»