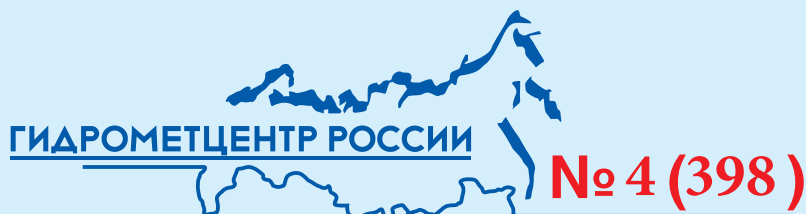


ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ



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»

№ 4 (398)

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

**HYDROMETEOROLOGICAL
RESEARCH and FORECASTING**

No. 4 (398)

Москва
2025

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

о изменении рейтинга журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»

Научный журнал открытого доступа «Гидрометеорологические исследования и прогнозы» издается с 1947 года. Издателем и Учредителем журнала является ФБГУ «Гидрометцентр России».

Рубрики журнала соответствуют научным специальностям номенклатуры, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118:

1.6 Науки о Земле и окружающей среде:

1.6.16 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия – географические, физико-математические, технические науки

1.6.17 Океанология – географические, физико-математические, технические науки

1.6.18 Науки об атмосфере и климате – географические, физико-математические, технические, сельскохозяйственные науки

1.2 Компьютерные науки и информатика:

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ – физико-математические, технические науки

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки и имеет **категорию К1**

Журнал входит в Ядро РИНЦ, индексируется в системах:
Российский индекс научного цитирования
База данных RSCI

Журнал включен в актуальную версию Единого государственного перечня научных изданий – «**Белый список**»

Уровень в 2025 году – 1

На платформе eLIBRARY.RU НЭБ с 2025 года для показателей «Белого списка» введен термин ЕГПНИ (Единый государственный перечень научных изданий)

Гидрометеорологические исследования и прогнозы – научный рецензируемый журнал, продолжает серию периодического журнала «Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации» (ISSN 0371-7089). Издается с 1947 года. Включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки с 01.12.2015 года.

Изложены результаты испытаний системы наукастинга порывов приземного ветра с применением алгоритмов машинного обучения к выходной продукции модели наукастинга ruSTEPS и системы численного прогноза погоды COSMO-Ru2. За период 2021–2023 гг. рассчитаны статистические характеристики радиолокационных параметров облачности для случаев с грозой и с градом в Западной Сибири. Выполнено сравнение расчетов температуры и ветра по моделям COSMO-RuBENA и ICON-Ru13/6N29 с данными радиозондирования на ЕТР. Для условий оледенения Эльбруса протестирована новая модель снежного покрова SnowDraw. Исследована точность прогноза высоты ветровых волн в акватории Цемесской (Новороссийской) бухты с использованием спектральной модели WAVEWATCH III и прогноза ветра GFS. Предложен набор методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды на реках России. Представлена методика прогноза максимальных уровней воды в весенний период на реках Урало-Каспийского бассейна. Выполнен сравнительный анализ показателей засушливости для оценки засух в сельскохозяйственных районах Северной Евразии. За период 1958–2024 гг. проведено исследование статистической структуры поля запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под зерновыми культурами для ЕТР. Проведен анализ параметров промерзания почвы на территории Архангельской области за период 1961–2020 гг.

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, ВНИИХМ 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

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

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

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

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

Христофоров А.В., д-р геогр. наук, 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 Hydrometeorological Center of Russia» established in 1947.

The results of testing the surface wind gust nowcasting system with application of machine learning algorithms to the output of the pySTEPS nowcasting model and the COSMO-Ru2 numerical weather prediction system are presented. Over the period of 2021–2023, the statistical characteristics of radar cloud parameters for thunderstorms and hail events in Western Siberia are calculated. A comparison of temperature and wind simulations using COSMO-Ru6ENA and ICON-Ru13/6N29 models with radiosonde data for the European part of Russia is performed. The new SnowDraw snow cover model is tested for the Elbrus glaciation conditions. An accuracy of forecasting the wind wave height in the Tsemess (Novorossiysk) Bay using the WAVEWATCH III spectral model and the GFS wind forecast is investigated. A set of methods for short- and medium-range forecasting of water levels on Russian rivers is proposed. A methodology for forecasting maximum water levels in the spring season on the rivers of the Zhayk-Caspian basin is presented. A comparative analysis of drought indices is performed to assess drought conditions in agricultural areas of Northern Eurasia. For the period of 1958–2024, a statistical structure of the field of productive moisture reserves in a meter soil layer under grain crops for the European part of Russia is studied. An analysis of the parameters of soil freezing in the Arkhangelsk region for the period of 1961–2020 is performed.

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

EDITORIAL BOARD:

Vasiliev A.A., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological Center 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, Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

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

Nesterov E.S., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological Center 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, Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

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

Simonov Yu.A., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

Strashnaya A.I., PhD in Geography, Hydrometeorological Center 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, Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

Khristoforov A. V., Doctor of Geographical Sciences, Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

Shakina N.P., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Hydrometeorological Center 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

- Наукастинг порывов ветра на основе численных прогнозов, радиолокации и машинного обучения: реализация, возможности и ограничения 7
Смирнов А.В., Киктев Д.Б., Муравьев А.В.
- Оценка информативности радиолокационных данных при анализе фронтальной кучево-дождевой облачности в Западной Сибири 33
Горбатенко В.П., Кижнер Л.И., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А.
- Сравнение прогнозов температуры и скорости ветра по конфигурациям системы COSMO-Ru/icon на ЕТР за 6 месяцев 2025 года и в эпизоде неблагоприятных метеорологических условий в Москве 52
Ревокатова А.П., Кузнецова И.Н., Кирсанов А.А.
- Тестирование новой модели снежного покрова SnowDraw для климатического прогноза динамики оледенения Эльбруса 74
Дроздов Е.Д., Торопов П.А.

Расчеты и прогнозы элементов режима морей и океанов

- Оценка качества прогноза высоты волн и скорости ветра в Цемесской бухте Черного моря 94
Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Круглова Е.Е., Григорьев А.В., Сенченко В.Г.

Гидрологические прогнозы

- Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды на реках России на основе статистических методов 114
Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М., Семенова Н.К., Волов И.С., Шевченко А.И.
- Усовершенствование методики прогноза характеристик весеннего стока рек Жайык-Каспийского бассейна в условиях доступной гидрометеорологической информации 129
Саиров С.Б., Тиллакарим Т.А., Серикбай Н.Т., Айтымова Б.Б.

Агрометеорологические прогнозы

- Сравнительный анализ показателей засушливости для оценки засух в сельскохозяйственных районах Северной Евразии 144
Емелина С.В., Хан В.М.
- Особенности пространственно-временной изменчивости влагозапасов в почве на Европейской территории России 153
Кланг П.С., Тарасова Л.Л., Черкасова А.В.
- Тенденции промерзания почвы на территории Архангельской области в условиях изменения климата 172
Грищенко И.В.

CONTENTS

Meteorological forecasts, mathematical modeling

- Wind gust nowcasting using numerical forecasts, radar technologies and machine learning: implementation, capabilities and limitations 7
Smirnov A.V., Kiktev D.B., Muravev A.V.
- Evaluation of the information content of radar data in the analysis of frontal cumulonimbus clouds in Western Siberia 33
Gorbatenko V.P., Kizhner L.I., Apostolidi C.T., Karpova A.A.
- Comparison of temperature and wind speed forecasts for the COSMO-Ru/icon configurations in the European part of Russia for six months of 2025 and during the episode of adverse meteorological conditions in Moscow 52
Revokatova A.P., Kuznetsova I.N., Kirsanov A.A.
- Testing a new SnowDraw snow cover model for climate forecasting of Elbrus glaciation dynamics 74
Drozhdov E.D., Toropov P.A.

Computing and forecasting of the marine environment parameters

- Evaluation of Wave Height and Wind Speed Forecast Quality in the Tsemess Bay of the Black Sea 94
Rybalko A.D., Myslenkov S.A., Kruglova E.E., Grigoriev A.V., Senchenko V.G.

Hydrological forecasts

- Short- and medium-range forecasting of water levels on Russian rivers based on statistical methods 114
Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M., Semenova N.K., Volov I.S., Shevchenko A.I.
- Improvement of the methodology for forecasting spring runoff characteristics of rivers in the Zhaiyk-Caspian basin under the conditions of available hydrometeorological information 129
Sairov C.B., Tillakarim T.A., Serikbay N.T., Aitymova B.B.

Agrometeorological forecasts

- Comparative analysis of drought indices to assess drought conditions in agricultural regions of Northern Eurasia 144
Emelina S.V., Khan V.M.
- Peculiarities of spatiotemporal variability of soil moisture in the European part of Russia 153
Klang P.S., Tarasova L.L., Cherkasova A.V.
- Soil freezing trends in the Arkhangelsk region in a changing climate 172
Grishchenko I.V.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-7-32>

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

Наукастинг порывов ветра на основе численных прогнозов, радиолокации и машинного обучения: реализация, возможности и ограничения

А.В. Смирнов, Д.Б. Киктев, А.В. Муравьев

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

Изложены результаты испытаний системы наукастинга порывов приземного ветра, проведенных в мае–сентябре 2024 года в Гидрометцентре России с применением алгоритма машинного обучения "Случайный лес" к выходной продукции статистической модели наукастинга ruSTEPS и системы численного прогноза погоды COSMO-Ru2.2. Оценена значимость наблюдений автоматических метеостанций Центрального федерального округа в качестве контрольных данных для наукастинга порывов ветра. Выявлены некоторые систематические особенности численных прогнозов порывов в период испытаний. Обсуждаются проблемы синхронизации данных от различных источников, детально анализируется погодная ситуация с заметными порывами на территории Московской области, приводятся оценки качества с помощью показателя FSS. В разработанной версии системы наукастинга, на накопленной информационной базе и по значениям показателя FSS горизонт полезного прогноза порывов ветра ограничен 30 минутами.

Ключевые слова: наукастинг порывов ветра, численный прогноз погоды, радиолокационные наблюдения, машинное обучение

Wind gust nowcasting using numerical forecasts, radar technologies and machine learning: implementation, capabilities and limitations

A.V. Smirnov, D.B. Kiktev, A.V. Muravev

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

The paper presents the results of testing a surface wind gust nowcasting system conducted in May–September 2024 at the Hydrometcentre of Russia using the machine learning Random Forest algorithm applied to the output products of the pySTEPS statistical nowcasting model and the COSMO-Ru2.2 numerical weather prediction system. The significance of observations from automatic weather stations in the Central Federal District as control data for wind gust nowcasting is assessed. Some systematic features of numerical gust forecasts during the testing period are revealed. The problems of synchronizing data from various sources are discussed, the weather conditions with significant gusts over

a large area are analyzed in detail, and the quality assessment is provided using the FSS metric. In the developed version of the nowcasting system, on the basis of accumulated information and according to the FSS skill score, the useful forecast horizon for wind gusts is limited to 30 minutes.

Keywords: wind gust nowcasting, numerical weather prediction, radar observations, machine learning

Введение

В информационном сообщении [2] приведены основные результаты испытаний системы наукастинга *порывов приземного ветра* с применением методов машинного обучения к выходной продукции статистической модели наукастинга ruSTEPS и системы численного прогноза погоды COSMO-Ru2.2 (ЧПП). Испытания проведены в мае–сентябре 2024 года с использованием алгоритма машинного обучения "Случайный лес". В связи с разработкой системы наукастинга порывов составлен краткий обзор передовых тенденций в данной области [6]. В настоящей статье более подробно обсуждаются особенности накопленных для испытаний архивов, ограничения и возможности наукастинга порывов ветра в отечественных условиях с учетом физико-статистических особенностей этой величины и имеющейся наблюдательной базы.

Опишем состав архива данных по периоду 1 мая – 23 сентября (последняя неделя сентября не включена по объективным причинам). Количественные характеристики округляются до десятков. Для краткости будет называть наборы данных условно результирующими, обучающими и контрольными.

1. *Результирующие* прогностические поля порывов (наукасты) в области обзоров радиолокаторов ДМРЛ-С сроком до 150 мин в 10-минутных интервалах (144 прогноза ежесуточно). Шаг расчетной ячейки ~1 км, размер расчетных матриц данных 987×987. Общее количество полей для одной заблаговременности около 20600.

2. *Обучающие* численные прогнозы порывов (мезопргнозы) сроком на 720 мин через 3 часа (8 прогнозов ежесуточно в 10-минутной дискретности). Шаг расчетной ячейки 2.2 км, размер матриц данных 601×601. Общее количество полей для одной заблаговременности около 1150.

3. *Контрольные* наблюдения около 180 автоматических метеорологических станций (АМС) в 10-минутных интервалах (144 телеграммы ежесуточно). Общее количество телеграмм от сети АМС около 21000.

Географическая область наукастинга порывов представляет собой сферический прямоугольник в зоне обзоров радиолокаторов ДМРЛ-С, развернутых на территории ЦФО России (рис. 1). Довольно частое отсутствие данных от каких-либо локаторов маркируется в расчетной матрице ("композитном поле") константами отсутствия в соответствующих точках выходного наукаста.



Рис. 1. Зоны обзора радиолокаторов и расчетная область наукастинга скорости порывов ветра.

Fig. 1. Radar coverage areas and computation area for wind gust speed nowcasting.

1. Реализация технологии наукастинга порывов приземного ветра

Сложность прогноза шквалистых усилений ветра начинается со сложности их диагноза по имеющимся наблюдениям. Эти явления часто не удастся зарегистрировать надлежащим образом средствами контактных измерений – расстояние между станциями велико в сравнении с характерными размерами такого рода явлений.

Для радарных наблюдений нижний пятидесятиметровый слой над земной поверхностью, где происходят максимальные шквалистые усиления ветра, обычно находится ниже зоны прямой видимости радара и для косвенной оценки приземного ветра требуется привлекать гипотезы о его связи с непосредственно измеряемыми характеристиками.

Анализ ситуаций по 10-минутным измерениям автоматических метеорологических станций (АМС) и радарным данным показывает, что фиксируемые на станциях порывистые скорости ветра могут сильно различаться при близких значениях в их окрестности таких влияющих параметров, как высота верхней границы облачности (ВГО), отражаемость, влагосодержание и др.

Такие ситуации возникают, когда активная конвекция, идентифицируемая максимальной отражаемостью выше 50 dBZ и высотой ВГО более

12 км, не сопровождается заметными порывами ветра на ближайших АМС. Среди возможных объяснений такого несовпадения могут быть:

– особенности структуры конвективного облака, где области повышенного радиоэха и области максимальных шквалистых усиления скорости ветра пространственно разнесены (максимальные усиления ветра чаще возникают на фронтах порывистости перед конвективным облаком, которые при этом могут опережать передний край зоны ливневых осадков на 10–15 км);

– недостаточный учет в диагностических алгоритмах тонких эффектов, связанных со структурой конвективного облака и его окружения, как в атмосфере, так и на подстилающей поверхности (например, увлажненность, альbedo и др. могут оказывать существенное влияние на энергетику конвекции);

– погрешности пространственно-временной привязки радарных данных к станционным (при сканировании каждые 10 минут и при скорости потока около 30 км/ч перенос за 5-минутный интервал составляет 2–3 км, вследствие чего фиксируемые на станциях явления могут оказаться разнесенными с радарными наблюдениями по соседним 10-минутным срокам).

Существенные пробелы в фиксации шквалистых усиления ветра наземными измерениями затрудняют настройку диагностических алгоритмов по данным дистанционного зондирования, что сказывается на качестве верификации прогнозов этих явлений, способствуя в первую очередь обилию ложных тревог в прогностической продукции.

В решающих правилах программного обеспечения вторичной обработки информации ДМРЛ-С [7] шквалы диагностируются в том случае, когда отражаемость на уровне изотермы $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная отражаемость в столбе и высота ВГО относительно уровня тропопаузы превышают предписанные пороговые значения. Эти правила не являются универсальными для охвата многообразных и физически сложных ситуаций образования шквалов, что также отражается на качестве их детектирования. Разработчики "ГИМЕТ-2010" считают необходимым к единственному фактору интенсивности конвекции, учитываемому в текущей версии диагностики шквалов, добавить «динамический», т. е. адвективный фактор [3, 7].

2. Машинное обучение: алгоритм "Случайный лес"

Алгоритм машинного обучения "Случайный лес" (использован пакет randomForestSRC из библиотек языка R) применен к выходным данным ЧПП, которые имеются одновременно и в продукции радиолокационного зондирования (ВГО, интегральное влагосодержание облаков, отражаемость, скорость и направления ветра на различных уровнях), а также к высотам изотерм и некоторым другим потенциальным предикторам шквалистых усиления ветра. Данный алгоритм зарекомендовал себя как простой, надежный и гарантированный от переобучения метод, чем он выгодно отличается, в частности, от нейросетевых моделей, которые при довольно

сложной настройке требуют и значительных вычислительных ресурсов для поддержания режима частого обновления прогнозов.

В предположении наличия связи этих предикторов со скоростью порывов формируется обучающая выборка для диагноза шквалов по данным ЧПП и строятся решающие диагностические процедуры для последующего использования построенных связей в радарном диагнозе и наукастинге.

Перенос связей в область радарного диагноза и прогноза обусловлен тем, что мультипликативная каскадная модель наукастинга ruSTEPS способна воспроизводить структуру и временную эволюцию не только полей осадков, но и полей упомянутых выше потенциальных предикторов. Следует, однако, учитывать, что оперативная модель COSMO-Ru2.2 в целом достаточно реалистично прогнозирует скорость порывов ветра у земли, но довольно грубо воспроизводит сложные процессы глубокой конвекции, ввиду чего перенос построенных машинным обучением диагностических связей на данные радарного наукастинга сопряжен с определенным риском и должен внимательно контролироваться и перепроверяться. Как будет показано ниже, такие опасения вполне обоснованы.

Для построения решающих правил используется информация последнего доступного оперативного ЧПП модели COSMO-Ru2.2, представленного в 10-минутной временной дискретности внутри периода прогноза. Расчет ЧПП на срок до 12 часов проводится восемь раз в сутки и через 2.5–3 часа после стартового срока результаты расчетов становятся доступными для технологии наукастинга.

В качестве предикторов скорости приземных порывов ветра из данных ЧПП выбираются следующие параметры:

- 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 м.

В обучающую выборку включаются все попадающие на временной интервал наукастинга 10-минутные модельные поля скорости порывов и шести предикторов из *последнего доступного* численного прогноза погоды. Перед процедурой машинного обучения модельные сеточные значения предикторов и предиктанта преобразовываются в значения, агрегированные по окрестным узлам сетки. Размеры окна агрегации и функции преобразования в окне сеточных значений подобраны в результате предварительных экспериментов (табл. 1).

По алгоритму "Случайный лес" строится ансамбль множества решающих деревьев (рис. 2), а итоговый прогноз "обобщает" ответы множества деревьев. Тренировка деревьев происходит независимо друг от друга на разных подмножествах, что препятствует построению одинаковых деревьев на одной выборке и делает этот алгоритм удобным для распределённых вычислений.

Таблица 1. Перечень обучающих параметров, размеры используемых окон агрегации и способы преобразования окрестных сеточных значений

Table 1. List of training parameters, sizes of aggregation windows used and methods for transforming neighboring grid values

Параметр	Единицы	Размер окна (узлы сетки)	Функция
Максимальная отражаемость	dBZ	11×11	max
Высота верхней границы облачности	м	15×15	max
Высота нулевой изотермы	м	11×11	mean
Средняя скорость ветра на высоте 1 км	м/с	11×11	mean
Средняя скорость ветра на высоте 3 км	м/с	11×11	mean
Средняя скорость ветра на высоте 10 м	м/с	25×25	mean
Скорость приземных порывов ветра	м/с	5×5	mean

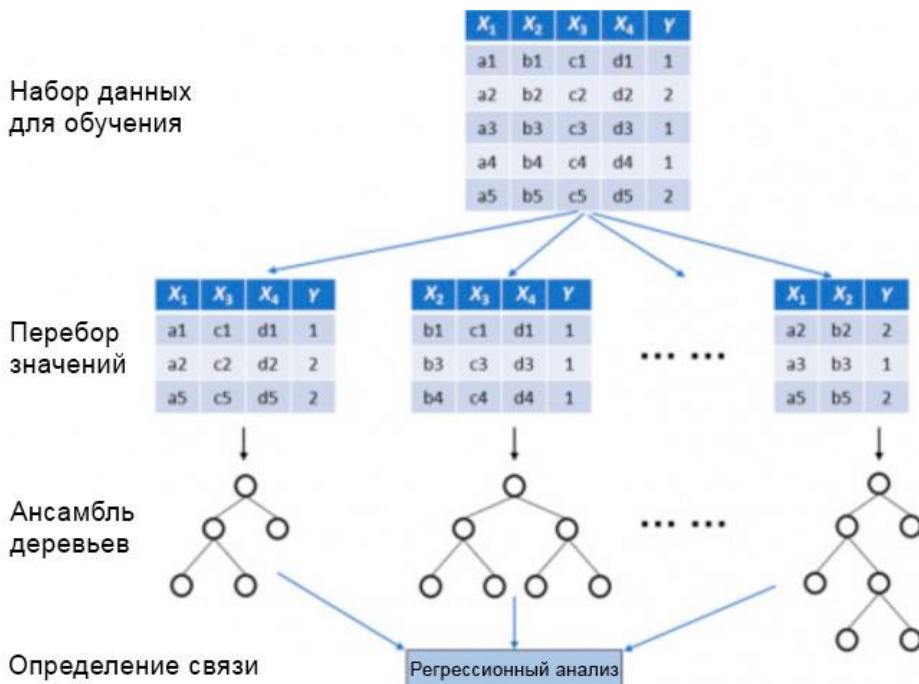


Рис. 2. Схема работы алгоритма "Случайный лес".

Fig. 2. Operational scheme of the "Random Forest" algorithm.

Обучение выполняется при расчете каждого наукаста (прогностического поля скорости порывов), при этом формируется 200 решающих деревьев регрессионного типа (рис. 3). Качество построения решающих правил оценивается сопоставлением восстановленных значений порывов с порывами, прогнозируемыми самой моделью COSMO-Ru2.2.

В настоящее время ЧПП все еще уступает простой экстраполяции текущей погоды ("лагранжевому" наукастингу) в локализации мезо-метеорологических объектов и структур на раннем этапе прогноза. Перенос в область радарного наукастинга состоит в том, что часть модельных предикторов заменяется результатами пространственно-временной экстраполяции полей максимальной отражаемости и высоты верхней границы облачности с помощью модели ruSTEPS (рис. 3).



Рис. 3. Схема комбинирования полей предикторов при расчетах наукастинга скорости порывов.

Fig. 3. Combining scheme of predictor fields in calculations of gust speed nowcasting.

Общая блок-схема алгоритма наукастинга скорости порывов приземного ветра показана на рис. 4. Серым цветом обозначены блоки с возможностью распараллеливания вычислительных процессов. В верхней части схемы представлены модули, которые работают независимо друг от друга. Цепочка последовательных действий выполняется при расчете каждого наукаста. Распараллеливание сокращает время работы системы наукастинга в несколько раз, в результате чего расчет одного прогноза на 2.5 часа укладывается в 5–6 минут, что с запасом обеспечивает возможность обновления прогноза каждые 10 минут.

3. Описание, преобразование и сопоставление типов данных

Использованные типы прогностической и фактической информации различаются как по форматам, так и по значениям порывов ветра. Некоторые особенности использованных типов информации и возникающие при этом проблемы хорошо известны. Например, это точечный характер станционных наблюдений и двумерное представление прогнозов в виде полей,

причем поля ЧПП и наукастинга имеют различное разрешение. Разнообразие объемов выборок разных типов информации может критично отражаться на статистической значимости сравнительных оценок в парах сопоставляемых данных. Далее, большие объемы данных при испытании схем наукастинга по значительным периодам времени (с заблаговременностями до нескольких часов в 10-минутной дискретности) также способны затруднить их обработку и верификацию, вынуждая искать способы сокращения табличной и графической продукции без потери содержательной информации. Наконец, остаются проблемы отбора подходящих статистических характеристик для описания и сопоставления разнородных данных, а также для верификации качества прогнозов как в точках, так и в пространственных полях.

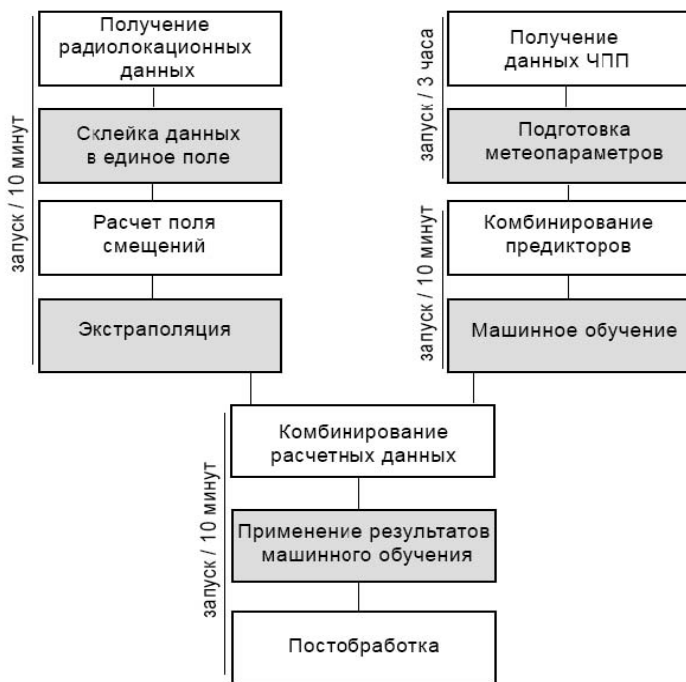


Рис. 4. Блок-схема алгоритма наукастинга скорости порывов приземного ветра.

Fig. 4. Flow chart of the nowcasting algorithm for surface wind gust speed.

Остановимся на проблеме "больших данных". Десятки тысяч прогностических полей (по миллиону точек каждое) со значениями скорости ветровых порывов удастся заметно "ужать" выделением порывов ветра в принятых градациях "неблагоприятного" (НЯ) и "опасного" явлений (ОЯ) [8]. При таком подходе количество "полей с порывами" уменьшается в несколько раз, а сами поля превращаются в удобные для обработки бинарные

(дихотомические) массивы, состоящие только из единиц и нулей. В проведенных испытаниях рассмотрены пороговые значения скорости ветра 15 м/с как "неблагоприятного метеорологического явления", в интервале 15–24 м/с как "сильного ветра" и в ранге ОЯ при скорости не менее 25 м/с как "очень сильного ветра". Для иллюстрации качества наукастинга приводятся оценки порывов скорости не менее 20 м/с. *Контрольные* стационарные наблюдения - ввиду их редкости и пространственной разреженности – градуировались порогами 15 и 20 м/с.

Ниже приняты следующие обозначения. Прогнозы и наблюдения производятся в 10-минутные сроки YYYYMMDDhhmi, где год YYYY = 2024, месяцы MM = {05, 06, 07, 08, 09}, дни DD = {01, 02, ..., 31}, часы hh = {00, 01, ..., 23}, десятки минут mi = {00, 10, 20, ...}. Продукция модели COSMO-Ru2.2 относится к срокам hh = {00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21}. Подчеркнем, что всюду ниже, где указано реальное время, имеется в виду ВСВ.

3.1. Поля наукастинга в области обзоров сети ДМРЛ-С

Поле наукастинга (FCAST) составлено из кругов радиолокационных обзоров с возможными пересечениями и содержит точки с константами отсутствия (NA) при отсутствии данных с каких-либо локаторов. В период испытаний количество отсутствующих значений в композитном поле достигало до трети общего размера поля в 987×987 точек. Заметим, что учет и обработка констант отсутствия в прогностических полях представляет собой непростую проблему, которая зависит от множества факторов и не имеет универсального решения [4].

Поля наукастинга и мезопрогнозов расположены в повернутых координатах модели COSMO с Москвой в центральной точке массива данных (рис. 5). Окаймляющий шестиугольник с вершинами в координатах некоторых городов построен для более наглядной иллюстрации поворота карты относительно стран света.

Рассмотрим дихотомические поля наукастинга со значениями порывов не меньше 20 м/с и представим квантильное распределение единиц по всему полю через 10 %. Для всех 15 заблаговременностей составлены таблицы, имеющие вид табл. 2.

Приведены части таблицы, характеризующие особенности этого распределения: видно, что количество точек с сильными порывами расположено в самом конце распределения и может изменяться в широких диапазонах (здесь от 3 до 10000). Отметим, что по таблицам такого вида удобно выделять развивающиеся ситуации, в которых количество точек со значительными скоростями порывов занимают постепенно растущие и постепенно уменьшающиеся области полей в последних квантилях распределения.

В табл. 3 отражена ситуация 20 июня около полудня с наукастами порывов до 28 м/с и с охватом до 17.5 тысяч точек поля (около 2 % общей области).

Таблица 3. Пространственное распределение значений порывов ветра в поле наукастинга на 10 мин для ситуации с порывами ветра 19 и 20 июня 2024 г.; обозначения как для таблицы 2

Table 3. Spatial distribution of wind gust values in the 10 min nowcasting field for the wind gust situation on 19 and 20 June 2024; notations as for Table 2

FCAST_000_202406191330_10	2.19	3.80	4.42	5.15	5.76	6.60	8.01	8.80	9.67	10.45	20.42	956484	198693	20.8	29
FCAST_000_202406200950_10	3.39	7.32	9.01	10.45	11.31	11.98	12.68	13.30	14.00	14.91	22.19	956484	208008	21.7	445
FCAST_000_202406201000_10	3.23	7.13	8.86	10.41	11.32	11.98	12.68	13.27	13.98	14.90	20.73	956484	203571	21.3	82
FCAST_000_202406201010_10	3.20	7.16	8.81	10.62	11.48	12.11	12.77	13.40	14.09	14.99	22.40	956484	204813	21.4	542
FCAST_000_202406201020_10	3.27	7.33	9.15	10.82	11.59	12.23	12.90	13.49	14.22	15.12	25.40	956484	202743	21.2	3628
FCAST_000_202406201030_10	3.19	7.46	9.30	10.92	11.73	12.37	13.04	13.61	14.26	15.15	24.47	956484	203328	21.3	5215
FCAST_000_202406201040_10	3.84	7.28	9.52	10.59	11.28	11.81	12.65	13.46	14.34	15.61	24.30	956484	203004	21.2	5642
FCAST_000_202406201050_10	4.09	7.44	9.53	10.56	11.22	11.90	12.80	13.59	14.57	16.47	24.55	956484	201690	21.1	8717
FCAST_000_202406201100_10	4.30	7.31	9.49	10.51	11.18	11.78	12.67	13.50	14.36	16.43	25.33	956484	200574	21.0	10658
FCAST_000_202406201110_10	4.56	7.47	9.58	10.68	11.31	11.94	12.81	13.62	14.49	16.62	28.03	956484	201042	21.0	12835
FCAST_000_202406201120_10	4.44	7.60	9.60	10.90	11.47	12.13	12.84	13.68	14.56	16.84	25.83	956484	200682	21.0	14574
FCAST_000_202406201130_10	4.26	7.83	9.71	11.06	11.56	12.19	12.86	13.73	14.72	17.07	25.20	956484	202212	21.1	13873
FCAST_000_202406201140_10	3.86	7.27	8.84	9.94	10.87	11.66	12.57	13.34	14.57	16.84	25.17	956484	202050	21.1	14556
FCAST_000_202406201150_10	3.56	7.34	8.88	9.94	10.85	11.67	12.56	13.35	14.57	16.98	26.18	956484	203121	21.2	15330
FCAST_000_202406201200_10	4.38	7.26	8.87	9.76	10.66	11.43	12.23	13.12	14.30	16.45	25.76	956484	202626	21.2	5489
FCAST_000_202406201210_10	4.41	7.32	8.86	9.81	10.71	11.60	12.38	13.26	14.33	17.08	23.44	956484	201987	21.1	6726
FCAST_000_202406201220_10	3.79	7.33	8.88	9.86	10.81	11.63	12.42	13.31	14.42	17.36	23.69	956484	202302	21.2	10739
FCAST_000_202406201230_10	3.82	7.31	8.93	9.91	10.76	11.63	12.52	13.32	14.55	17.62	23.08	956484	202482	21.2	15803
FCAST_000_202406201240_10	3.58	6.62	8.12	9.34	10.26	11.12	12.03	13.17	14.43	17.26	24.01	956484	201249	21.0	17113
FCAST_000_202406201250_10	3.56	6.54	7.91	9.10	10.06	11.07	12.01	13.07	14.35	16.99	24.43	956484	201654	21.1	17496
FCAST_000_202406201300_10	3.33	6.07	7.56	8.62	9.63	10.43	11.30	12.37	13.31	14.81	23.22	956484	276291	28.9	3295
FCAST_000_202406201310_10	2.95	5.94	7.43	8.36	9.83	10.65	11.63	12.60	13.63	14.97	23.44	956484	275841	28.8	4311
FCAST_000_202406201320_10	2.96	5.90	7.38	8.52	9.88	10.61	11.59	12.47	13.56	15.16	23.22	956484	274725	28.7	6070
FCAST_000_202406201330_10	2.90	5.89	7.27	8.66	10.15	10.92	11.79	12.49	13.57	14.99	23.23	956484	276696	28.9	5903
FCAST_000_202406201340_10	2.95	5.58	6.74	8.69	9.66	10.38	11.13	11.78	12.61	14.43	22.93	956484	277767	29.0	5538
FCAST_000_202406201350_10	2.86	5.70	6.62	8.64	9.60	10.28	10.98	11.64	12.49	14.46	22.28	956484	277632	29.0	3241
FCAST_000_202406201410_10	1.97	5.59	6.48	8.57	9.42	10.04	10.58	11.23	12.23	14.00	22.14	956484	276138	28.9	545

Рис. 6 с наукастами в географической "развертке" (без населенных пунктов) иллюстрирует табличные данные о ситуации 20 июня 2024 г., указывая координатное расположение областей с порывами не менее 20 м/с (желтый цвет). В центре средней панели рис. 6 заметна область желтого цвета (до 25 м/с) с вкраплением красного, сигнализирующего о порывах до 30 м/с

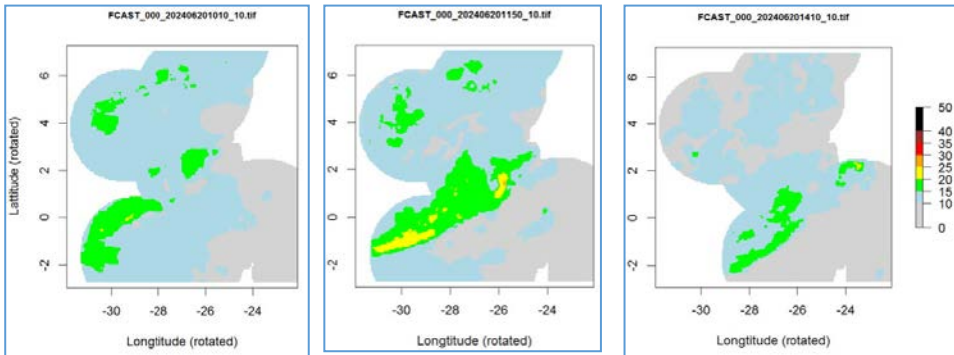


Рис. 6. Развитие ситуации около полудня 20 июня 2024 г. (слева направо) с порывами ветра в картах наукастинга на 10 минут

Fig. 6. Development of the situation around midday on June 20, 2024 (from left to right) with wind gusts in the 10 minutes nowcasting maps.

3.2. Поля прогнозов COSMO-Ru2.2: приведение к формату полей наукастинга

Основные характеристики прогностических полей представлены в выходных параметрах функции `gaster()` языка R, с помощью которой читаются файлы `.tiff` (или `.tif`) (табл. 4).

Таблица 4. Характеристики растровых изображений для наукастов (сверху) и мезопрогнозов (снизу)

Table 4. Raster image characteristics for nowcasts (upper) and mesoforecasts (bottom)

class:	RasterLayer
dimensions:	978, 978, 956484 (nrow, ncol, ncell)
resolution:	0.01, 0.01 (x, y)
extent:	-31.89, -22.11, -2.73, 7.05 (xmin, xmax, ymin, ymax)
values:	1.098624, 7.956317 (min, max)
class:	RasterLayer
dimensions:	601, 601, 361201 (nrow, ncol, ncell)
resolution:	0.02, 0.02 (x, y)
extent:	-33.01, -20.99, -4.01, 8.01 (xmin, xmax, ymin, ymax)
values:	0.01708796, 11.14982 (min, max)

Размеры полей указаны в строке `dimensions`: количество строк, столбцов и точек (ячеек) соответственно. Разрешение сетки в строке `resolution` указывает на приблизительное количество километров на стороне ячейки при соответствии 0.01 ~ 1 км. Ориентация повернутая, в центре карт предполагаются данные по г. Москве. В строке `extent` указаны предельные значения координат по двум осям. Значения величин в строке `values` соответствуют наименьшей и наибольшей скорости порыва в данной карте. Обе части таблицы относятся к одному сроку прогноза. Как видно из таблицы, область мезомодели шире области наукастинга, но пространственное разрешение в два раза меньше.

Для сравнения наукастинга и мезопрогнозов карта мезомодели обрывается до пределов карты наукастинга и разрешение *увеличивается* вдвое методом "ближайшего соседа", при котором значения сильных порывов дублируются. Если для приведения полей к единому формату использовать *уменьшение* размерности поля FCAST, то его простейшая интерполяция эквивалентна отбору точек через одну. Можно предположить, что из-за относительной редкости экстремумов удвоение количества точек с экстремальными величинами незначительно влияет на суммарные оценки и может быть учтено в ходе дальнейших расчетов и интерпретации результатов.

3.3. Архив телеграмм автоматических станций (АМС)

Телеграммы АМС записаны в текстовом формате в виде таблиц (табл. 5), которые считываются функцией `read.table(*, header=TRUE)` языка R с заголовком столбцов, содержащим указания на Юникс-время наблюдения (`dt`) в секундах, индекс станции (`stan`), скорость порыва (`gust`) в м/с, среднюю скорость ветра за 10 минут (`ws`) в м/с, дату и время наблюдения (`dt_str`) в формате `YYYYMMDDhhmi`, географические координаты долготы и широты станции (`lon, lat`) и координаты в повернутой географической сетке мезомодели (`X, Y`).

Таблица 5. Структура телеграмм АМС в файле 202407010000.dat
Table 5. Structure of AMS telegrams in file 202407010000.dat

dt	stan	gust	ws	dt_str	lon	lat	x	y
1719792000	19027	1.1	0.9	202407010000	37.775	55.508	-26.607	1.945
1719792000	32466	1.1	0.2	202407010000	37.213	55.592	-26.767	2.232
...								

Количество станций не превышает двухсот и может заметно меняться в зависимости от срока наблюдения. Телеграммы накапливаются в течение суток (YYYYMMDD), в то время как наблюдения привязаны к стандартному сроку в формате YYYYMMDDhhmi, ввиду чего файл телеграмм содержит порядка 25 тысяч строк. На рис. 7 демонстрируется расположение 196 станций, содержащихся в файле 20240625.dat. Для удобства обработки данных суточные данные АМС "рассыпаются" на 144 текстовых файла с наблюдениями всех отметившихся наблюдениями станций в стандартный суточный срок.

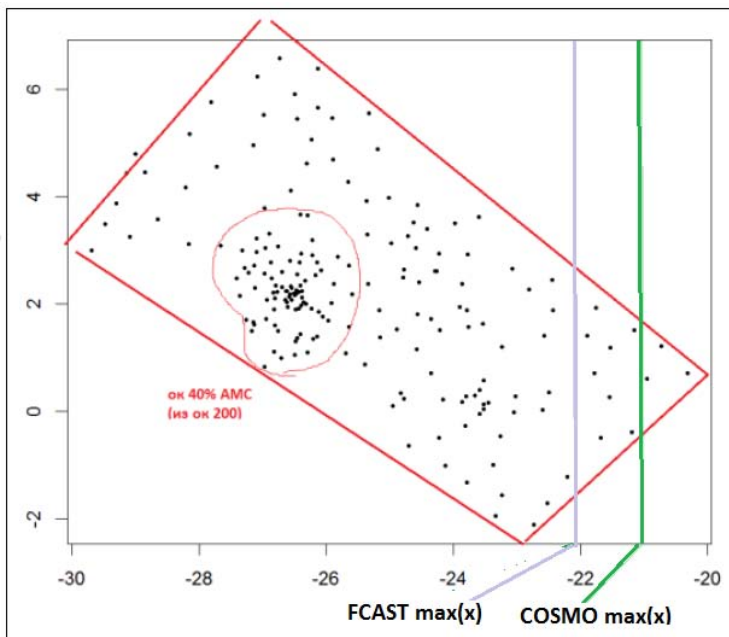


Рис. 7. Распределение АМС, приславших телеграммы 25 июня 2024 г., и окаймляющий четырехугольник (красный цвет). Сиреневой и зеленой вертикальными линиями выделены максимальные значения оси x зон наукастинга и мезопрогноза соответственно.

Fig. 7. Distribution of AMS that sent telegrams on June 25, 2024, and the bordering quadrangle (red). The purple and green vertical lines highlight the maximum values of the x-axis of the nowcasting and mesoforecast zones, respectively.

Видно, что несколько станций не входят ни в одну область прогноза, при этом некоторые станции размещены только в зоне мезопрогноза и отсутствуют в полях наукастинга. Примерно 40 % всех станций расположены в центральной части карты, в основном Москва и Московская область.

Известно, что определение и фиксация порывов ветра производится вместе с определением и фиксацией средней скорости за выделенный период времени (здесь интервал осреднения равен 10 мин). Взаимосвязь этих двух величин хорошо изучена и используется в разнообразных схемах прогноза порывов, при этом средняя скорость является важнейшим предиктором в статистических схемах и неперенным элементом параметризации порывов в гидродинамических ЧПП.

Продемонстрируем распределение повторяемостей средней скорости ветра и величины порывов, зафиксированных на 196 станциях 25 июня 2024 г. (рис. 8). Несмотря на ограниченность гистограммного представления прослеживаются такие особенности, как возможная аппроксимация средней скорости гамма-распределением, а порывов – распределением Вейбулла с тяжелым правым хвостом. То есть порывы обнаруживают статистические свойства экстремальной величины с указанным законом притяжения, что отмечается в множестве публикаций (например, [10, 11]). В данном случае *параметры формы* обоих распределений выше единицы.

Определение порыва в 10-минутных интервалах наблюдений обуславливает высокую повторяемость малых скоростей порывов: в приведенном примере максимальный порыв не превышает 15 м/с, что, в частности, не дотягивает до градации "неблагоприятного метеорологического явления" [8].

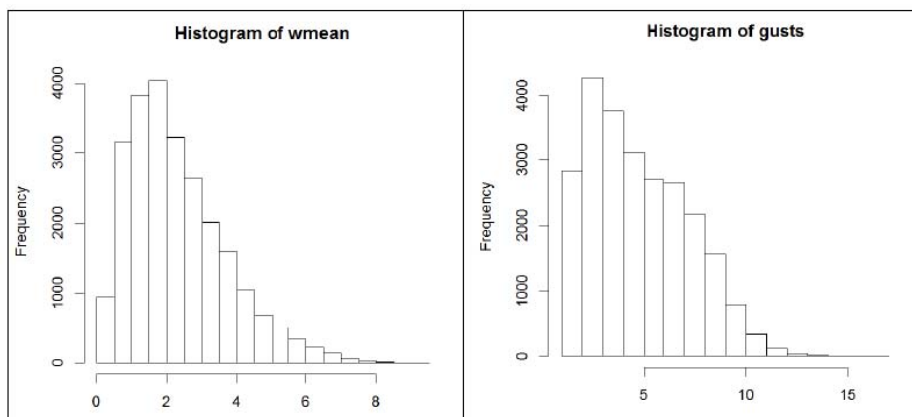


Рис. 8. Распределение средней скорости (левая панель) и порывов (правая панель) в 10-минутных интервалах по 196 станциям 25 июня 2024 г. (телеграммы файла 20240625.dat). Объем выборки – 27000 значений

Fig. 8. Distribution of average speed (left panel) and gusts (right panel) in 10-minute intervals at 196 stations on June 25, 2024 (telegrams of file 20240625.dat). Sample size – 27000 values.

Распределение *по времени* средней скорости ветра и порывов для отдельной станции в целом также сходно с гамма-распределением и распределением Вейбулла. Наличие порядка сотни наблюдений в сутки (из 144 максимальных) вполне достаточно для построения устойчивого распределения по паре месяцев года. Для иллюстрации приведем типичные гистограммы распределения для мая-июня 2025 г. На рис. 9 и 10 приводятся две типичные гистограммы распределения по времени средней скорости ветра и порывов, напоминающие гистограммы частот по всем станциям для одного дня (рис. 8). Заметно различие форм возможных аппроксимаций приведенных гистограмм: если для станции 19028 параметр формы гамма-распределения явно больше 1, а параметр формы распределения Вейбулла явно меньше 1, то для станции 19101 типы параметров меняются на противоположные.

Подчеркнем важное обстоятельство. Наблюдения АМС были использованы в том виде, в котором они поступали в базу данных Гидрометцентра – без предварительного контроля качества. В результате первичного статистического анализа было установлено, что имеется несколько десятков телеграмм с константами отсутствия (NA) в ячейках характеристик ветра, при этом некоторые станции генерировали явно бракованные наблюдения, хотя сами значения были реальными числами в привычном диапазоне изменения величины. Например, станция 19025 (первая в списке активно действующих АМС) прислала мае-июне 7803 приемлемых сообщений о средней скорости, но явно бракованные сообщения о порывах, что проявилось на соответствующих гистограммах плотности распределения (рис. 11).

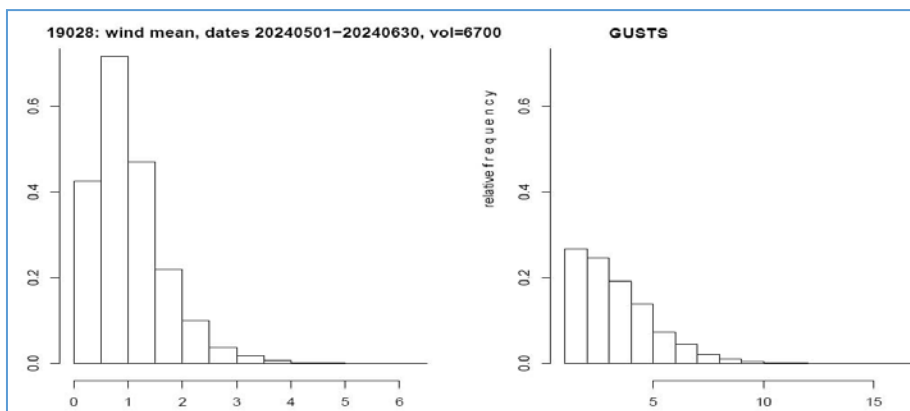


Рис. 9. Гистограммы относительных частот наблюдений средней скорости ветра (левая панель) и значений порывов (правая панель) на станции 19028 в период май-июнь 2024 г.

Fig. 9. Histograms of relative observation frequencies of average wind speed (left panel) and gust values (right panel) at station 19028 in the period May-June 2024.

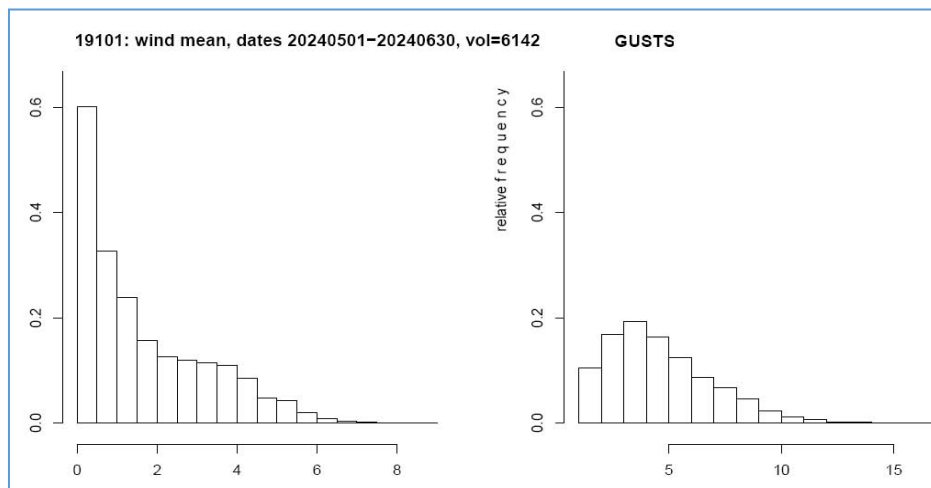


Рис. 10. Гистограммы относительных частот наблюдений средней скорости ветра (левая панель) и значений порывов (правая панель) на станции 19101 в период май-июнь 2024 г. Объем выборки 6142 телеграммы.

Fig. 10. Histograms of relative observation frequencies of average wind speed (left panel) and gust values (right panel) at station 19101 in the period May-June 2024. Sample size 6142 telegrams.

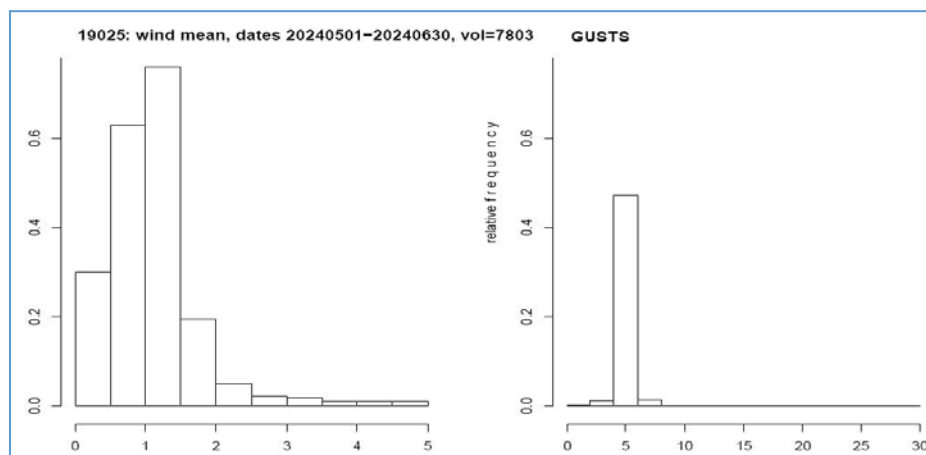


Рис. 11. Гистограммы относительных частот наблюдений средней скорости ветра (левая панель) и значений порывов (правая панель) на станции 19025 в период май-июнь 2024 г. Объем выборки 7803 телеграммы.

Fig. 11. Histograms of relative observation frequencies of average wind speed (left panel) and gust values (right panel) at station 19025 in the period May-June 2024. Sample size 7803 telegrams.

Ниже будут рассмотрены данные по всему архиву испытаний с 1 мая до 23 сентября 2024 года.

3.4. Сопоставление разнородных данных: синхронизация и дихотомизация

По всему периоду испытаний в полях наукастинга и мезопрогнозов, а также в сообщениях АМС выделяются сроки, в которые наблюдались "явления порыва" хотя бы в одной точке поля или хотя бы в одной станции соответствующей телеграммы. Напомним, под порывом понимается превышение определенного порога скорости: для наукастинга и мезопрогнозов 20 м/с, а для АМС 15 и 20 м/с.

Количество синхронизированных пар (и троек) полей и станционных наблюдений свидетельствует об информационном покрытии интервала испытаний и о статистической значимости результатов верификации. Приведем эти объемы, напомнив максимально возможные объемы полей и наборов телеграмм. В интервале от 1 мая до 23 сентября 2024 г. содержится 146 суток по 144 десятиминутных сроков в каждом сутках. Таким образом, максимально возможное количество наукастов одной заблаговременности и сроков наблюдений равно 21024. Максимальное количество мезопрогнозов одной заблаговременности равно $146 \times 8 = 1168$.

Виды и результаты проделанной синхронизации выглядят следующим образом (с округлениями в десятых).

– *Синхронизация пар: поля наукастинга FCAST и телеграммы наблюдений АМС.* Количество пар для прогнозов от 10 до 100 минут в 10-минутной дискретности равно около 20640 для каждой заблаговременности.

– *Синхронизация пар: поля наукастинга FCAST и поля мезопрогноза COSMO.* Количество пар равно около 1150 для каждой заблаговременности.

– *Синхронизация троек: поля наукастинга FCAST, поля мезопрогноза COSMO и телеграммы АМС.* Количество троек для заблаговременностей от 10 до 100 мин равно около 1140.

– *Синхронизация пар: поля наукастинга FCAST и поля наукастинга "первого приближения" (наукастинга на 10 минут).* Количество пар лишь незначительно отличается от соответствующего количества пар FCAST – АМС, т. е. около 20640.

Перечень не полон: не рассматривались синхронизированные пары *поле наукастинга и поле мезопрогноза "первого приближения"* (мезопрогноза на 10 мин).

Очевидно, что большая разница объемов выборок пар и троек наборов данных усложняет статистическое сопоставление качества прогнозов между синхронизированными парами и тройками.

Также следует учитывать условности и ограничения, которые накладываются исследуемой величиной – ветровыми порывами. Основными свойствами порывов являются мелкомасштабность и турбулентность, т. е. кратковременность развития (до минуты для порывов и до нескольких минут для шквалов), относительная редкость и случайность проявления в пространстве и времени.

Мелкомасштабность и редкость заставляют прибегать к обобщениям (агрегированию) как по пространству, так и по времени, а турбулентный характер явления вынуждает использовать вероятностные определения и термины. При анализе качества моделирования и прогнозирования редкого явления следует ожидать чрезмерного количества как случаев "отсутствия явления", так и "отсутствия прогнозов явления". Малоинформативными оказываются или даже теряют смысл такие стандартные оценки качества, как общая оправдываемость и критерий Пирса – Обухова: первый показатель стремится к единице, второй – к доли попаданий. Так как теряется значимость "отсутствия явления", из дихотомического анализа часто исключают ячейку "нет-нет", или (2,2), в таблице сопряженности [9]. Именно по указанным причинам одной из наиболее подходящих мер качества считается критерий "отношения пространственных долей", FSS (Fractions Skill Score), учитывающий, как пространственный масштаб явления, так и его вероятностный характер [1, 5].

На этом этапе удастся частично решить и проблему "больших данных" переходом от величины порыва (действительное число) к категории "порыва" (0 или 1) и сохранением для обработки лишь тех дихотомических полей, в которых имеются метки "порыва", привычно обозначаемые единицей. Экономия на дихотомизации при верификации прогнозов существенно упрощает расчеты оценки FSS, так как данный показатель не вырождается лишь в тех случаях, когда *каждое* из двух полей (прогноз – контроль) имеют хотя бы одну единицу. Также существенно упрощается процедура обобщения полей на часовые интервалы, когда в точку обобщенного поля единица записывается дизъюнктивно – если среди шести последовательных полей в данной точке имеется хотя бы одна единица.

Имеет смысл дать короткую справку о наличии такого рода полей, об их количестве и о количестве единиц, назвав такие порывы "существенными".

– *Существенные порывы в сообщениях AMS.* Среди примерно 20600 станционных сообщений было обнаружено 549 сообщений с порывами не менее 15 м/с (чуть менее 3 %) и 119 сообщений с порывами не менее 20 м/с (менее 0.1 %).

Рассмотрим распределение сообщений по количеству станций, одновременно зафиксировавших порыв в интервале 10 мин. По одному порыву (т.е. на одной станции) было зафиксировано в 429 сообщениях ($429/549=78\%$). По два порыва содержались в 68 сообщениях ($68/549=12\%$), по три порыва – в 19 сообщениях, по четыре – в 15, по 5 и 6 порывов – в 13 сообщениях. На 7, 10 и 13 станциях порывы были зафиксированы единожды и в двух сообщениях данные о порывах получены с 11 станций. Намного скуднее количество сообщений о порывах не менее 20 м/с: общее количество сообщений с порывами – 119, из них 1 порыв отмечен в 111 сообщениях (93 %), 2 – в 4, 3 и 4 порыва отмечены в двух сообщениях. Таким образом, основная масса срочных сообщений содержит наблюдения порыва на единственной станции (в 78 % случаев для порога 15 м/с и в 93 % случаев – для порога 20 м/с). При этом максимальное

количество станций, одновременно зафиксировавших существенные порывы, оказалось равным 13 (в двух сообщениях) для порога 15 м/с и 4 станции (в двух сообщениях) для порога 20 м/с.

– *Существенные порывы в наукастах (FCAST)*. Табл. 6 содержит полную информацию о пространственном распределении прогнозируемых порывов не менее 20 м/с в зависимости от заблаговременности.

Наблюдаются следующие особенности характеристик распределения в зависимости от заблаговременности. Количество полей с наличием порывов растет от 400 до 450, затем падает до 376. Минимальное количество (порыв в одной точке поля) не изменяется, квартили до 75-го изменяются без особого тренда. Квартиль q_{75} в основном снижается от 2334 до 1269, а максимум растет от 19500 до 28500 (почти на 10 тысяч). При этом среднее количество порывов в поле для каждой заблаговременности существенно не меняется. Снижение квартиля 75 % и рост максимального количества точек с порывами с ростом заблаговременности систематично, но вряд ли интерпретируемо.

Таблица 6. Квартильное распределение порывов в наукастах (FCAST): заблаговременность (ld минут), количество полей в выборке (#fields), минимальное количество единиц (vmin), квартильные значения количества единиц в 25% полей (q25), в 50 % полей (median) в 75% полей (q75), максимальное количество единиц (vmax) и среднее количество единиц по всем полям выборки
Table 6. Quartile distribution of gusts in nowcasts (FCAST): lead time (ld minutes), number of fields in the sample (#fields), minimum number of units (vmin), quartile values of the number of units in 25% of fields (q25), in 50% of fields (median) in 75% of fields (q75), maximum number of units (vmax) and average number of units across all fields in the sample

ld	#fields	vmin	q25	median	mean	q75	vmax
10	406	1	100	547	1799	2334	19426
20	403	1	161	581	1884	2366	20322
30	425	1	153	537	1846	2142	20868
40	444	1	112	522	1807	1989	21274
50	454	1	111	496	1789	1953	22159
60	449	1	118	481	1806	1898	23123
70	449	1	128	445	1807	1904	24070
80	446	1	134	484	1800	2012	25269
90	448	1	116	462	1754	1884	26308
110	428	1	100	452	1742	1618	28179
120	405	1	138	510	1800	1559	28595
130	398	1	124	478	1784	1438	28308
140	391	1	108	458	1757	1342	28662
150	376	1	126	446	1762	1269	28529

– *Существенные порывы в мезопрогнозах (COSMO-Ru2.2)*. Табл. 7 содержит информацию о пространственном распределении прогнозируемых порывов не менее 20 м/с в зависимости от заблаговременности.

Напомним, количество порывов в урезанном и переинтерполированном поле примерно вдвое превышает количество порывов в исходном поле из-за интерполяции методом "ближайшего соседа". Размах максимальных порывов в полях наукастинга в интервале составляет 20–29 тысяч (табл. 6) намного меньше аналогичного размаха от 7500 до 40000 точек в мезопрогнозах (табл. 7). Сужение размаха в наукастинге можно объяснить особенностями алгоритма построения дерева решений, в котором используется скользящий пространственный фильтр масштаба около 10 км (раздел 1); в общем *поля порывов* в наукастинге оказываются более сглаженными, чем *поля среднего ветра* в мезопрогнозе.

Таблица 7. Квартильное распределение порывов в мезопрогнозах (COSMO-Ru/2.2): заблаговременность (ld минут), количество полей в выборке (#fields), минимальное количество единиц (vmin), квартильные значения количества единиц в 25% полей (q25), в 50% полей (median) в 75% полей (q75) и максимальное количество единиц (vmax) и среднее количество единиц по всем полям выборки(mean)

Table 7. Quartile distribution of gusts in mesoforecasts (COSMO-Ru/2.2): lead time (ld minutes), number of fields in the sample (#fields), minimum number of units (vmin), quartile values of the number of units in 25% of fields (q25), in 50% of fields (median) in 75% of fields (q75) and maximum number of units (vmax) and average number of units for all fields in the sample (mean)

ld	#fields	vmin	q25	median	mean	q75	vmax
10	315	4	28	144	583	550	13420
20	352	4	28	160	820	835	19076
30	375	4	32	188	1036	988	23800
40	395	4	32	244	1230	1134	27072
50	411	4	36	244	1394	1270	29656
60	420	4	36	238	1553	1357	31924
70	255	4	26	112	553	458	7412
80	299	4	32	156	791	682	12372
90	326	4	32	190	1020	896	17084
100	339	4	36	228	1246	1074	21712
110	352	4	40	228	1435	1316	26284
120	362	4	44	250	1609	1408	30652
130	236	4	28	158	564	461	9744
140	250	4	40	222	867	775	16288
150	264	4	40	250	1138	1009	21648
160	277	4	36	276	1377	1280	27480
170	285	4	36	300	1622	1512	33948
180	294	4	40	332	1848	1631	40144

В табл. 7 пустые строки вставлены намеренно, чтобы подчеркнуть "пилообразное" изменение квартильных характеристик с часовым циклом в столбцах количества полей, медианы, средней величины, квартиля 75 % и максимума. Изменение явно систематическое и связано с особенностями прогнозирования порывов в модели COSMO-Ru2.2.

Часовой цикл проявляется и в количестве точек с порывами, и в расположении очагов порывов, иногда он выражен и на большем интервале времени. Так, в прогнозе в 10:00 20 июня при переходе от заблаговременности 60 мин к 70 мин количество точек с существенными порывами уменьшилось с 25080 до 6092, при переходе от 120 мин к 130 мин – с 23676 до 4692 точек, т. е. область порывистости сузилась в 4 и 5 раз соответственно. При переходе от 180 мин к 190 мин эта область уменьшилась почти в 8 раз!

При этом в полях среднего ветра часовой цикличности в 10-минутных прогнозах не обнаруживается ни в картах, ни в таблицах квантилей (которые здесь не приводятся). К этой "часовой пиле" оказались устойчивыми и наукасты, однако некоторые сходные явления проявились в оценках качества наукастинга относительно мезопрогнозов.

4. Анализ случая и результаты верификации

Ввиду отмеченной систематической особенности прогноза порывов в модели COSMO, результаты сопоставления синхронизованных полей наукастинга и мезопрогнозов нельзя считать корректными. Резкое снижение количества пар полей наукастинга с синхронизованными полями мезопрогнозов "первого приближения" снижает статистическую устойчивость оценок качества, в связи с чем остаются лишь варианты сравнения пар *наукастинг – станции* и *наукастинг – наукастинг первого приближения*.

Несомненно, сопоставление в один срок менее двухсот станционных наблюдений и прогностических полей с одним миллионом узлов имеет мало смысла со статистической точки зрения, если требуется оценка прогнозов по всей области. В таких случаях проводится подробный анализ отдельных синоптических ситуаций (case studies) с наличием областей сильных порывов, подтвержденных и несколькими станциями наблюдательной системы, и прогностическими полями. Такого рода "анализ случая", помимо убедительной иллюстрации, характеризует общую полезность схемы наукастинга. Рассмотрим в этой связи синоптическую ситуацию 20 июня в ЦФО, в которой вокруг Москвы к 10:00 сформировался очаг порывов (не менее 15 м/с), зафиксированных несколькими АМС.

4.1. Порывы ветра 20 июня 2024 г, на территории Московской области

На рис. 12 последовательно расположены карты прогноза системы наукастинга порывов на 90, 60, 30 и 10 минут, зафиксированных станциями в центральной части Московской области.

На всех картах цветом магента выделены значения станционных наблюдений выше 15 м/с в условный срок 00 минут (эти значения неизменны на всех картах). В центральной части карты на нескольких станциях зафиксированы скорости порывов выше 15 м/с, при этом максимальный порыв (22.9 м/с) сообщен станцией, расположенной к востоку от Калуги.

В полях FCAST максимальная скорость растет с уменьшением заблаговременности: 16.9 (90 мин), 17.6 (60 мин), 20.9 (30 мин) и 22.2 м/с (10 мин). Однако превышение порога 20 м/с в поле наукастинга (желтый цвет) прогнозируется в районе Курска, т. е. далеко за пределами станционного скопления порывов. При этом наиболее точное указание на район возможной порывистости ветра (в центральной части карты) дается лишь в прогнозах от часа и меньше; максимально отчетливо – лишь на карте прогноза заблаговременности 30 минут.

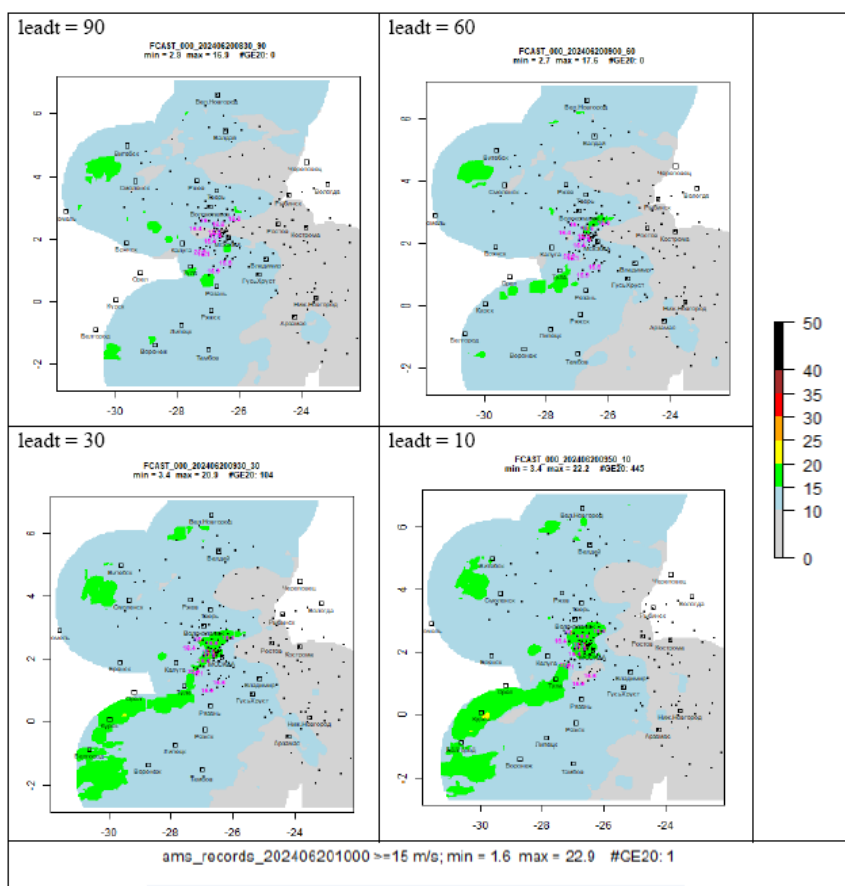


Рис. 12. Карты наукастинга в 10:00 20 июня 2024 г. на 90, 60, 30 и 10 мин (leadt).

Fig. 12. Nowcasting maps at 10:00 on June 20, 2024 for 90, 60, 30 and 10 min (leadt).

В панелях рис. 12 заметны более масштабные особенности, никак не фиксируемые станциями. Например, система наукастинга довольно быстро заполняет очагом существенной скорости широкую полосу в левом нижнем углу карты вне станционного массива. Наличие развивающейся ситуации большого масштаба подтверждается 60-минутным прогнозом COSMO-Ru2.2 со стартом в 09:00 (рис. 13).

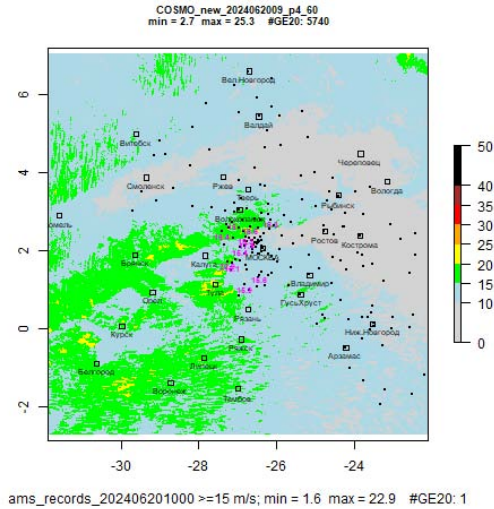


Рис. 13. Прогноз на 60 минут поля порывов с помощью модели COSMO-Ru2.2 со стартом в 09:00 20 июня 2024 г.

Fig. 13. 60-minute forecast of the gust field using the COSMO-Ru/2.2 model starting at 09:00 on June 20, 2024.

Сопоставление карты мезопрогноза на рис. 12 с картой наукастинга на рис. 11 (панель leadt=10) подтверждает некоторые, возможно, систематические особенности системы наукастинга, включая заметную сглаженность формируемых полей (по линии Тула – Курск) и потерю некоторых существенных элементов синоптического положения как вне обзора локаторов, так и внутри (потеря полосы на линии Волоколамск – Брянск). Очевидно, пространственная фильтрация, проводимая как в модели ruSTEPS, так и в алгоритмах машинного обучения, приводит к систематическому занижению максимальных и близких к максимуму значений порывов (что наиболее отчетливо наблюдается здесь в районе около Тулы).

4.2. Обобщение до часового интервала и суммарная оценка качества по пространственным долям

Для расчета суммарных оценок срочные данные "обобщаются" до часового интервала и заново проводится синхронизация пар полей и наборов данных. При этом происходит ожидаемый рост количества точек с порывами, а также увеличение количества "обобщенных" полей и наборов станционных телеграмм. Верификация наукастинга сводится к сопоставлению наукастов со следующими данными, которые потенциально рассматриваются в качестве *контрольных*:

- 1) наблюдения АМС;
- 2) мезопрогнозы той же заблаговременности и за тот же срок наукастинга;
- 3) мезопрогнозы "первого приближения" (мезопрогнозы на 10 мин);
- 4) наукасты "первого приближения" (наукасты на 10 мин).

Как показал предыдущий анализ архива испытаний, обоснованные выводы можно сформулировать лишь при двух вариантах сопоставлений: при визуальном анализе всех трех типов информации в отдельных ситуациях, как показано выше в "анализе случая", и при использовании наукастов первого приближения. При сопоставлении полей рекомендуются высокоинформативные критерии пространственной верификации, в частности, упомянутые выше оценки качества по "пространственным долям" FSS. Результаты оценок качества по этому показателю собраны в табл. 8 [2]. Формулировка вывода такова. Если считать прогнозы системы наукастинга на 10 минут наиболее точно отражающими реальность и использовать их в виде "первого приближения", то качество прогностической системы (по значению FSS > 0.5) в пространственном масштабе до 40×40 км и в часовом обобщении превышает 50 % в заблаговременности до полу- часа.

Таблица 8. Количество пар с оценкой FSS >0.5 в окнах со сторонами 0–40 км; "сумма" всех случаев FSS > 0.5 для условных заблаговременностей 10–90 мин

Table 8. Number of pairs with FSS >0.5 in windows with sides of 0–40 km; "sum" of all cases of FSS > 0.5 for conditional lead times of 10–90 min

Условная заблаговрем.	Кол-во пар	Окна со стороной (в км)					Сумма
		0	10	20	30	40	
10	453	245	277	289	293	297	1401
20	419	182	209	221	233	242	1087
30	398	135	171	183	194	201	884
40	372	101	126	134	154	164	679
50	357	91	106	118	127	135	577
60	335	59	86	94	109	114	462
70	307	43	55	68	76	84	326
80	290	32	42	49	64	69	256
90	270	23	31	39	45	53	191

Сделаем одно замечание, касающееся свойств показателя FSS в тех ситуациях, когда явление одновременно редкое и наблюдается на границе домена верификации, что приводит к вырождению показателя, т. е. к резкому росту до единицы или к падению до нуля. Универсального рецепта против вырождения показателя FSS не существует, если не считать простого правила устанавливать пороговое (наименьшее) количество точек поля и не учитывать в суммарном представлении качества оценки вблизи границ домена верификации.

Выводы

На основе представленной табличной и графической информации можно сформулировать выводы об особенностях и качестве отдельных типов использованных данных, а также об успешности наукастинга порывов

в заблаговременности до полутора часов по результатам испытаний в период май–сентябрь 2024 года.

Во-первых, выявлены специфические свойства трех типов использованных данных, которые необходимо учитывать и по возможности устранить при усовершенствовании системы наукастинга порывов ветра с опорой на отечественные ресурсы:

- алгоритм машинного обучения порождает *сильно сглаженные* прогностические поля порывов (наукасты);
- в прогнозах скорости порывов модели COSMO-Ru2.2 версии 2024 г. прослеживается *систематическое смещение*;
- стационарные наблюдения порывов нуждаются в серьезном *контроле качества*.

Во-вторых, в условиях проведенных испытаний и на основе пространственной оценки качества "по полю первого приближения" итоговый результат таков: информативный (или полезный) интервал наукастинга сильных порывов (не менее 20 м/с) в часовом обобщении и в масштабе окна со стороны до 40 км *не превышает 30 минут*.

Работа выполнена в рамках темы 1.1.5 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг.

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. Технология наукастинга скорости порывов ветра в летний период на основе данных дистанционного зондирования атмосферы и численных прогнозов погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. №2 (396). С. 169-173.
3. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2020 г. Долгосрочный: Центральная аэрологическая обсерватория, 2021. 88 с.
4. Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2 (384). С. 6-52.
5. Муравьев А.В., Киктев Д.Б. Качество, предсказуемость и полезность в задачах радиолокационного наукастинга осадков // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 93-107.
6. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Наукастинг порывов ветра с помощью численных прогнозов, данных радиолокации и машинного обучения: определения и термины, инструменты наблюдений и модели // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. №3 (397). С. 8-31.
7. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (шифр «ГИМЕТ-2010») версия 02: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: ФГБУ «ЦАО», номер регистрации: 2018665447, дата регистрации: 05.12.2018.
8. РД 52.27.724-2019 Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: Гидрометцентр России», 2019. 66 с.
9. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed. / I. Jolliffe, D. Stephenson (Eds.). John Wiley & Sons Ltd. 2012. 274 p.
10. Kislov A., Matveeva T. An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region // Atmospheric and Climate Sciences. 2016. Vol. 6. P. 205-223.

11. Palutikof J.P., Brabson B.B., Lister D.H., Adcock S.T. A review of methods to calculate extreme wind speeds // *Meteorol. Appl.* 1999. Vol. 6. P.119-132 .

References

1. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Yu. Metodicheskie rekomendatsii po verifikatsii meteorologicheskikh prognozov. Moscow, AMA PRESS Publ., 2021, 94 p. [in Russ.].

2. Kiktev D.B., Muravyev A.V., Smirnov A.V. Technology for nowcasting wind gusts in summer based on the data of remote sensing of the atmosphere and numerical weather prediction. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*]. 2025, vol. 396, no. 2, pp. 169-173 [in Russ.].

3. Metodicheskoe pis'mo ob itogah raboty seti DMRL Rosgidrometa v 2020 g. Dolgoprudnyy, Tsentral'naya aerologicheskaya observatoriya, 2021, 88 p. [in Russ.].

4. Muravev A.V., Bundel A.Yu., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Expertise in spatial verification of radar precipitation nowcasting: identification and statistics of objects, situations and conditional samples. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*]. 2022, vol. 384, no. 2, pp. 6-52 [in Russ.].

5. Muravev A.V., Kiktev D.B. Quality, Predictability, and Utility in Radar Precipitation Nowcasting Applications. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2024, vol. 49, no. 7, pp. 627-637. DOI: 10.3103/S1068373924070070.

6. Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Naukasting poryvov vetra s pomoshch'yu chislennykh prognozov, dannykh radiolokatsii i mashinnogo obucheniya: opredeleniya i terminy, instrumenty nablyudeniya i modeli. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*]. 2025, vol. 397, no. 3, pp. 8-31 [in Russ.].

7. Programmnyy kompleks vtorichnoy obrabotki informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S (shifr «GIMET-2010») versiya 02: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Pravoobladatel': FGBU «TSAO», nomer registratsii: 2018665447, data registratsii: 05.12.2018 [in Russ.].

8. RD 52.27.724-2019 Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. Moscow, Gidromettsentr Rossii [Hydrometcenter of Russia], 2019, 66 p. [in Russ.].

9. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2012, 274 p.

10. Kislov A., Matveeva T. An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2016, vol. 6, pp. 205-223.

11. Palutikof J.P., Brabson B.B., Lister D.H., Adcock S.T. A review of methods to calculate extreme wind speeds. *Meteorol. Appl.* accepted for publication 1999, vol. 6, pp.119-132.

Поступила 17.08.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 17.08.2025; accepted for publication 26.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-33-51>

УДК 551.501.81 (571.1)

Оценка информативности радиолокационных данных при анализе фронтальной кучево-дождевой облачности в Западной Сибири

***В.П. Горбатенко, Л.И. Кижнер,
Х.Т. Апостолиди, А.А. Карпова***

*Национальный исследовательский Томский государственный
университет, г. Томск, Россия
vpgor@tpu.ru, kdm@mail.tsu.ru*

Целью исследований является выбор набора радиолокационных параметров, характеризующих фронтальную кучево-дождевую облачность во время регистрации гроз и града метеорологическими станциями в районе Новосибирска. За период с 2021 по 2023 год проанализированы 1883 случая с грозой и 67 с градом. Рассчитаны статистические характеристики радиолокационных параметров облачности для случаев с грозой и случаев с грозой с градом. Показано их различие и рассчитаны пороговые значения по данным ДМРЛ-С Новосибирск. В число рассмотренных параметров включены, кроме уже зарекомендованных на практике идентификации конвективных явлений, такие параметры, как турбулентность и вертикально интегрированная водность.

Ключевые слова: Западная Сибирь, гроза, град, ДМРЛ-С, радиолокационные характеристики, пороговые значения, метеорологические наблюдения

Evaluation of the information content of radar data in the analysis of frontal cumulonimbus clouds in Western Siberia

V.P. Gorbatenko, L.I. Kizhner, C.T. Apostolidi, A.A. Karpova

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
vpgor@tpu.ru, kdm@mail.tsu.ru*

The objective of the study was to select a set of radar parameters characterizing frontal cumulonimbus clouds during thunderstorms and hail events registered by meteorological stations in the Novosibirsk region. In total, 1883 thunderstorms and 67 hail events were analyzed from 2021 to 2023. Statistical characteristics of cloud radar parameters for thunderstorms and thunderstorms with hail were calculated. Differences between these parameters were demonstrated, and threshold values were calculated based on DMRL-C Novosibirsk data. In addition to the parameters already proven in practice for identifying convective phenomena, the examined parameters included turbulence and vertically integrated liquid water content.

Keywords: Western Siberia, thunderstorm, hail, DMRL-C, radar characteristics, threshold values, meteorological observations

Введение

Потепление климата повлияло не только на изменение средних величин температуры воздуха и количества выпавших осадков, но и на резкое увеличение частоты многих экстремальных погодных явлений [22]. Среди увеличивающегося многообразия неблагоприятных метеорологических явлений наиболее разрушительными являются те, которые формируются в процессе развития мощной конвекции: град, шквалы, смерчи, интенсивные грозы, сильные ливни [24]. Поэтому исследование особенностей их формирования при разных синоптических условиях и в разных регионах с целью повышения качества их диагноза и своевременного прогноза имеет большое практическое значение.

Актуально повышение качества прогноза града и потому, что число случаев его выпадения в умеренных широтах Западной Сибири в последнее десятилетие увеличилось в 3–5 раз [8]. Конвективные облачные системы, в которых образуется град, становятся все более обширными по площади, а мощные конвективные ячейки, продуцирующие развитие гроз и более частое выпадение града, стали формироваться значительно чаще, чем до потепления климата Западной Сибири.

Для помощи в решении таких проблем в России с 2012 года начато формирование сети современных метеорологических радиолокаторов отечественного производства ДМРЛ-С [11], задачами которой является, в частности, идентификация явлений погоды, в том числе опасных явлений, получение сумм выпавших осадков и построение объединенных карт этих и других продуктов. Для успешного решения запланированных задач очень важна валидация радиолокационных наблюдений по данным независимых метеорологических наблюдений, таких как наблюдения за явлениями погоды на метеостанциях, регистрация времени и координат молниевых разрядов современными сетями грозопеленгаторов, самолетных наблюдений и др.

Для повышения качества краткосрочного и текущего прогнозирования (уточнение локализации и интенсивности) мощных конвективных штормов и связанных с ними опасных явлений [13] необходимо выбрать предикторы, являющиеся важными для диагноза и прогноза конвективных явлений (вторичных радиолокационных продуктов в виде трехмерной модели облачной атмосферы), которые получают в результате компьютерной обработки первичных радиолокационных продуктов [15, 21]. Успешность применения разработанного алгоритма на практике оценивается по результатам оперативных независимых испытаний. Такие исследования актуальны для всех регионов, где размещаются ДМРЛ-С, поскольку характеристики грозовой и градовой облачности в разных физико-географических регионах могут существенно различаться. Для более эффективного использования радиолокационных параметров в прогнозе опасных конвективных явлений погоды необходимо уточнение пороговых значений физических характеристик облачности. Такая корректировка особенно необходима для регионов, где зафиксировано изменение климата.

Оценка повторяемости конвективных явлений на территории Западной Сибири сегодня – особенно трудная задача, поскольку для таких явлений характерна локальность формирования как по территории, так и во времени. Сеть метеорологических наблюдений для обнаружения таких явлений в Западной Сибири редка. Здесь функционируют около 120 метеорологических станций, расстояние между которыми составляет от 100 до 500 км в южной части региона до значений около 1000 км на севере. Трудности определения параметров облачности при наличии грозовых и градовых процессов над Западной Сибирью обусловлены не только редкой сетью метеорологических станций, но и отсутствием сети метеорологических радиолокаторов. Появившиеся спутники системы Арктика-М также являются перспективой при решении диагностирования и прогноза конвективных явлений погоды на территории Западной Сибири.

В настоящее время есть надежда на достоверную диагностику грозовых и градовых облаков по данным единственного в регионе радиолокатора ДМРЛ-С, который установлен в районе г. Новосибирска, и на создание сети таких радиолокаторов на территории Западной Сибири.

Современные метеорологические радиолокаторы, созданные в России, обладают уникальными возможностями – оперативностью, способностью охватывать большие территории, давать детальную информацию о внутренней структуре зон облачности и осадков [19]. Современная радиолокационная метеорологическая информация широко используется для сверхкраткосрочного прогноза погоды (наукастинга) [5, 7, 19], в том числе для предупреждения об опасных явлениях: ливнях, грозах, граде, шквалах, смерчах.

Радиолокационные измерения ряда параметров облачности с высокой частотой обновления информации позволяют отслеживать скорость развития конвективной облачности и фиксировать процессы формирования ливневых осадков, гроз и града. Использование для конкретных регионов уточненных пороговых значений параметров грозовой и градовой облачности по данным ДМРЛ-С позволит повысить точность прогноза таких явлений, а также может быть учтено при разработке и совершенствовании системы наукастинга таких явлений для территории Западной Сибири.

Создаваемая в России сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С) предназначена для проведения непрерывных наблюдений в составе радиолокационной сети Росгидромета по единому регламенту с использованием единого программного обеспечения [2].

Целью настоящего исследования является выбор и определение значений радиолокационных параметров фронтальной кучево-дождевой облачности по информации ДМРЛ-С во время регистрации гроз и града метеорологическими станциями, расположенными в радиусе 200 км от радиолокатора, установленного в районе Новосибирска.

Известно, что радиолокационная отражаемость облачности зависит от турбулентности, водности облаков, размеров облачных частиц и их

фазового строения [7]. Различия в этих характеристиках и являются причиной того, что облака, относящиеся к одному типу, могут в одних случаях обнаруживаться, а в других – не обнаруживаться радиолокаторами. Поэтому актуальным является исследование возможности дополнительно использовать значения вертикально интегрированной водности атмосферы и турбулентности, как потенциальных предикторов уточнения идентификации гроз и града разной интенсивности и разных условий их формирования.

Град на территории Западной Сибири – явление очень локальное и кратковременное, его средняя продолжительность составляет около 5 минут [8]. В том случае, если град выпадает в районе, где нет метеостанций, а значит и информация о его выпадении в метеорологических сводках отсутствует, его диагноз с помощью ДМРЛ-С и уточнение в случае необходимости прогноза является актуальным и востребованным, поскольку на фоне наблюдающегося потепления климата Западной Сибири это важно для избегания экономических потерь в ряде отраслей экономики.

В последние годы конвективные облачные системы, в которых образуется град, становятся все более обширными по площади, а мощные конвективные ячейки, продуцирующие развитие гроз и более частое выпадение града, стали формироваться значительно чаще, чем до потепления климата Западной Сибири. Например, в анализируемой базе данных ДМРЛ-С за 06.07.2021 в течение суток на большей части метеорологических станций, расположенных в радиусе 200 км от радиолокатора, регистрировались грозы, конвективная облачность которых фиксировалась в 50 конвективных ячейках.

Методы исследования

В работе использованы методы радиолокационных и метеорологических наблюдений, метод сравнения, статистический метод.

Анализировались данные наблюдений ДМРЛ-С, расположенного в районе Новосибирска, и 37 метеорологических станций в радиусе 200 км от него за период с 2021 по 2023 год. Проводилось сопоставление радиолокационных данных и информации о времени зарегистрированных в радиусе 10 км от метеостанций гроз и града, что считается достоверной информацией [19].

Поскольку грозы обычно подразделяются на два основных типа: фронтальные и внутримассовые, возникающие вдали от фронтальных зон и обусловленные особенностями местных воздушных масс, некоторые из радиолокационных параметров этих двух типов могут различаться.

Максимальная повторяемость града в исследуемом районе отмечена на холодных фронтах и фронтах окклюзии, поэтому в рамках настоящего исследования радиолокационные параметры конвективной облачности, из которой зарегистрировано выпадение града, анализировались и сравнивались с параметрами грозовой облачности, тоже образовавшейся

на холодных фронтах и фронтах окклюзии, а также и для случаев гроз без града. Такое сравнение необходимо для повышения качества прогноза и для определения вероятности развития гроз или гроз с градом.

Радиолокационный метод идентификации гроз и града, согласно Программному обеспечению вторичной обработки информации «ГИМЕТ-2010», является вероятностным [15], поэтому актуально и в рамках исследования сравнить совпадение данных ДМРЛ-С с информацией метеорологических станций, расположенных в зоне действия радиолокатора, как принято для верификации работы отдельных локаторов при их оперативной работе.

При оперативной работе сети ДМРЛ-С в критериях идентификации как града, так и грозы, в первую очередь используются значения высоты верхней границы облачности и вертикальный профиль радиолокационных отражаемостей [1], а именно их значения на специальных уровнях (высоте нулевой изотермы и на уровне интенсивной кристаллизации, т. е. на уровне изотермы $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, превышающей, как правило, уровень нулевой изотермы на 2–2,5 км). Большое значение для диагноза развития конвективных явлений имеет и максимальное значение радиолокационной отражаемости в столбе атмосферы [15].

Таким образом, в исследовании данных ДМРЛ-С анализировалась кучево-дождевая облачность на холодных фронтах и фронтах окклюзии, с которой связано образование гроз и гроз с градом, только для случаев, когда метеостанции в контрольном круге радиусом 200 км от радиолокатора фиксировали грозы или грозы с градом.

Для сравнения параметров конвективной облачности с грозой и градом, зарегистрированными метеорологическими станциями, анализировались следующие радиолокационные параметры ДМРЛ-С:

1. Высота верхней границы облачности (ВВГО, км) регистрируемая и радиолокаторами, и метеорологическими спутниками, поскольку эта информация позволяет прогнозировать вероятность развития конвективных явлений и их интенсивность.

2. Максимальная радиолокационная отражаемость (Z_{\max} , dBZ) в анализируемом столбе атмосферы является интегральной характеристикой конвективной ячейки и может быть использована как для диагноза состояния, так и для прогноза развития мощной конвекции, формирующей молнии и град. Детализация пороговых значений Z_{\max} , используемых в диагнозе и прогнозе вероятности образования разных конвективных явлений над Западной Сибирью, является актуальной задачей.

3. Значения радиолокационной отражаемости (Z , dBZ) на уровнях с температурой $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($Z_{0\text{ }^{\circ}\text{C}}$, dBZ) и $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($Z_{-15\text{ }^{\circ}\text{C}}$, dBZ) благодаря тому, что эти параметры важны для диагноза и прогноза грозовой и градовой облачности в конвективных ячейках.

4. Турбулентность атмосферы (Турб., cm^2/s), определяющая скорость диссипации турбулентной энергии, рассчитывается при наличии

измеренной радиолокационной отражаемости анализируемой ячейки и ширине доплеровского спектра. Данная радиолокационная характеристика в настоящем исследовании проходит экспериментальную апробацию, как и при оперативной работе локаторов. Турбулентность атмосферы в разных регионах может сильно различаться, поэтому анализ турбулентности актуален [25].

5. Интегральная водность конвективных облаков в процессе образования в них гроз и града (VIL , $кг/м^2$). Величина VIL может быть хорошим индикатором для идентификации формирования гроз и града [15, 19]. Исследования возможности использования параметра VIL в качестве предиктора явлений «град слабый» – «град сильный» продолжаются [15]. Такие исследования актуальны и для Западной Сибири, поскольку в последнее десятилетие увеличилось число случаев выпадения града в 3–5 раз [8], а повторяемость градин диаметром более 10 мм в рассматриваемый период и в период 2015–2019 гг. составила 10 % [9].

Результаты

Каждая анализируемая на карте ДМРЛ-С в рамках исследования точка характеризует фронтальную облачность с грозой и грозой с градом, зарегистрированную одной метеостанцией.

За период исследования в выборке с 2021 по 2023 год количество фронтальных гроз, соответствующих заданным критериям отбора, составило 1883 случая, а случаев града различного диаметра – 67.

Проверка точности диагностики грозовой и градовой облачности над Западной Сибирью непосредственно для ДМРЛ-С Новосибирск ранее не исследовалась, поэтому предлагаемые результаты весьма актуальны.

Анализ результатов сопоставления радиолокационных и наземных случаев регистрации гроз и града продемонстрировал достаточно высокий уровень согласования данных о наличии анализируемых явлений погоды. Несовпадение составило около 16 %. Следовательно, полученные для Западной Сибири результаты соответствуют оценке «хорошо» [19].

В табл. 1 приведены статистические характеристики всех перечисленных выше радиолокационных параметров фронтальной конвективной облачности, в которой были зарегистрированы грозы и град над Западной Сибирью метеорологическими станциями, расположенными в радиусе 200 км от радиолокатора. Есть основания полагать, что сравнение параметров фронтальной и грозовой облачности разного масштаба и разного синоптического происхождения позволит улучшить качество их прогноза и вероятности развития при уточнении пороговых значений радиолокационных параметров. Вероятность формирования гроз и града даже при наличии одинаковых пороговых значений может отличаться на территориях с разным климатом и при разных синоптических ситуациях, поэтому сопоставление результатов регистрации гроз метеостанциями и радиолокатором дает информацию о надежности регистрации явлений,

а статистические характеристики всех перечисленных выше радиолокационных параметров фронтальной конвективной облачности позволяют определить вероятность развития анализируемых явлений.

Таблица 1. Радиолокационные параметры фронтальной облачности

Table 1. Radar parameters of frontal clouds

Статистика	ВВГО, км	VIL, кг/м ²	Z 0°C, dBZ	Z-15°C, dBZ	Турб., см ² /с	Z _{max} , dBZ
Грозовая облачность						
Среднее	11,0	8,5	43	36	12	43
Медиана	11,0	7	43	35	10	43
Стандартное отклонение	2,0	7	8	10	23	8
Облачность с грозой и градом						
Среднее	11,7	11,7	45	41	9	45
Медиана	12,0	8	50	45	10	50
Стандартное отклонение	2,0	8	9	10	17	9

Известно, что первым, реагирующим на развитие и эволюцию конвективных облаков, параметром облака является ВВГО [20].

Для территории Западной Сибири средние значения ВВГО грозовой и грозовой с градом облачности составляют 11,0 и 11,7 км, медианы – 11,0 и 12,0 км соответственно.

Сравнения со значениями ВВГО конвективной облачности с рассматриваемыми явлениями, регистрируемой радиолокаторами в других регионах, свидетельствует о высоких значениях параметра для Западной Сибири: наибольшее значение медианы этого параметра в Индии составляет 13,5 км, для Северного Кавказа – 10,7 км, для северо-западной части России – 9,5 км [20].

На рис. 1 дана гистограмма распределения ВВГО для случаев с грозой и с грозой, сопровождающейся градом, в сравнении с нормальным распределением характеристик.

Из рисунка видно, что наибольшая повторяемость верхней границы кучево-дождевой облачности с такими явлениями приходится на высоты 10–12 км.

Отметим, что типичной для умеренных широт высотой развития конвективной облачности считается высота 7–10 км, а все значения свыше этого считаются редко встречаемыми [6, 18]. Например, радиолокационные характеристики верхних границ грозовой облачности с вероятностью более 80 % на территории Уральского Прикамья [17] в период 1998–2002 гг. составили 10 км, а градовой 11,6 км. В результате настоящих исследований получено, что аналогичные высоты соответствуют 50 %

анализируемых явлений (табл. 2). Кроме того, результаты исследования аэрологических значений высоты верхних границ грозовой градовой облачности [9] в период 2015–2019 гг. иногда достигали 200 гПа (11,5–12 км).

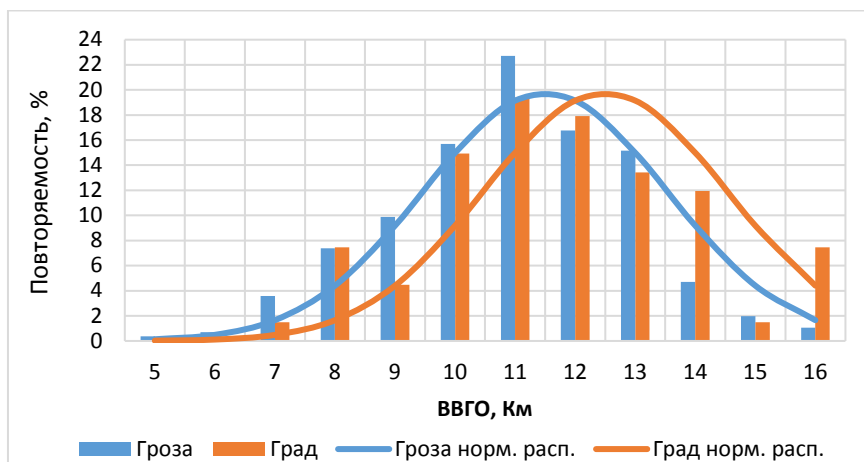


Рис. 1. Повторяемость (%) ВВГО фронтальной грозовой и градовой облачности над Западной Сибирью за период с 2021 по 2023 г.

Fig. 1. Frequency (%) of VVGO frontal thunderstorm and hail clouds over Western Siberia for the period from 2021 to 2023.

Таблица 2. Пороговые значения ВВГО возникновения фронтальных гроз и града для территории Западной Сибири

Table 2. Threshold values VVGO for the occurrence of frontal thunderstorms and hail for the territory of Western Siberia

Вероятность		50 %	70 %	80 %	90 %
Высота верхней границы облаков, км	С грозой	10,5	11,5	12,3	12,8
	С градом	11,2	12,4	13,1	13,9

При этом в собранном нами массиве данных случаев с высотой верхней границы грозовой облачности выше 10 км насчитывается 63 %, для облачности с градом – 72 %. Можно сказать, что есть тенденция к повышению отметки высоты верхней границы облачности и увеличению мощности вертикального развития конвективных облаков над территорией Западной Сибири. В случаях выпадения града 8 % конвективных ячеек достигали высоты верхней границы облачности 15–16 км, для грозовой облачности такой высоты достиг только 1 % ячеек (рис. 1). Возможно, это связано с активными конвективными процессами, которые сопровождались не только градом, но и шквалами, хотя на территории Уральского Прикамья [14] при наличии шквалов высота верхней границы облачности не была выше. При этом в период исследования радиолокационных

параметров высоты верхней границы облачности при шквалах над Западной Сибирью (в районе г. Томска) до 2004 г. [4] было получено, что она составляет 10–12 км. По результатам анализа спутниковой информации максимальные значения высоты верхней границы облаков в дни с выпадением града наблюдаются в июле и составляют примерно 12 км [18], а по данным аэрологического зондирования атмосферы H_{\max} находилась в этих же пределах [8, 10, 14].

Средние значения и медианы высоты верхней границы фронтальной грозовой облачности и облачности с грозой и градом в Западной Сибири за летний период в разные месяцы немного различаются (в среднем, на 0,5–1,0 км) и достигают максимальных высот в июле. Максимальные высоты верхних границ облачности при фронтальной грозе достигали в июле 15 км.

Минимальные высоты верхней границы для грозовой и грозовой с градом облачности совпадают и составляют 7 км. В 20 % случаев высота верхней границы грозовых облаков достигает 9 км, грозовых с градом в 27 % случаев – 10 км. Эта же характеристика в 20 % случаев с грозой превышает 12 км, в то время как при градовых процессах составляет выше 13 км. Отметим, что результаты измерения ВВГО ДМРЛ-С достаточно хорошо согласуются с результатами регистрации высоты градовой облачности с метеорологических спутников [10, 26].

Рассчитанные высоты (ВВГО) для грозовых и грозовых облаков с градом на холодных фронтах и фронтах окклюзии для Западной Сибири сопоставимы с высотами аналогичной облачности для Северного Кавказа [20]. На территории Уральского Прикамья радиолокатор ДМРЛ-С регистрирует град в конвективных ячейках тоже с ВВГО выше 10 км [14].

При сравнении высоты верхней границы градовых облаков с высотой тропопаузы выявлено, что если размер выпавших градин более 10 мм, то верхняя граница радиоэха облачности в июне и июле достигает высот 15–16 км. При этом верхняя граница тропопаузы, определенная по данным аэрологического зондирования, не превышает высоту 12 км. Если же размер градин менее 10 мм, то высота тропопаузы примерно совпадает с высотой верхней границы радиоэха градовой облачности, а если и превышает, то не более чем на 0,5 км.

На территории Уральского Прикамья градовые облака располагаются на 0,5–2,0 км выше уровня тропопаузы, а в среднем превышение составляет 0,7 км [14], что несколько выше, чем над территорией Западной Сибири.

Можно сделать вывод, что в случае формирования градовых процессов в июне и июле на холодных фронтах и фронтах окклюзии в Западной Сибири при выпадении града размером 10 мм и более, т. е. который может нанести ущерб, по данным ДМРЛ-С наблюдаются Сб высотой 15–16 км, пробивающие тропопаузу на значительную величину (~ 3 км), тогда как при грозах без града облака лишь достигают тропопаузы, либо превышают ее незначительно (не более 0,5 км).

Повторяемость максимальной радиолокационной отражаемости Z_{\max} (60 % всех случаев) для фронтальной грозовой деятельности приходится на диапазон 35–45 dBZ, для града – 66 % случаев приходится на диапазон 45–55 dBZ (рис. 2). Повторяемость максимальных и минимальных значений этой характеристики для грозовых фронтальных облаков составляет 11 и 1 %, для градовых облаков – 19 и 4 % соответственно.

Наибольшее значение максимальной отражаемости для фронтальной грозовой и градовой облачности Западной Сибири составляет 60 dBZ, наименьшее составило 20 и 25 dBZ соответственно.

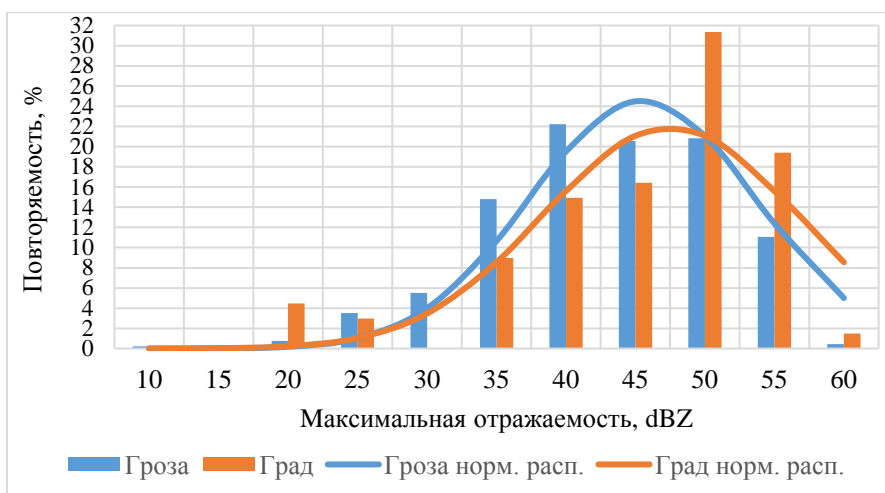


Рис. 2. Повторяемость (%) максимальной отражаемости Z_{\max} фронтальной грозовой и градовой облачности над Западной Сибирью за период с 2021 по 2023 г.

Fig. 2. Frequency (%) of maximum reflectivity Z_{\max} of frontal thunderstorm and hail clouds over Western Siberia for the period from 2021 to 2023.

Сравнение рассчитанных для Западной Сибири значений Z_{\max} с другими регионами мира показало следующее: Z_{\max} конвективной облачности как с грозой, так и с градом в Западной Сибири оказалась выше, чем в Индии, но немного ниже, чем на Северном Кавказе, северо-западной части России и на территории Уральского Прикамья, что связано, по-видимому, с условиями формирования крупных ледяных частиц в облаке [14, 20]. Причем, максимальная отражаемость для конвективных облаков Северо-Запада Российской Федерации оказалась наибольшей в момент появления первых разрядов молнии, что объясняется увеличением отражаемости в зоне таяния ледяных частиц.

Среднее значение максимальной радиолокационной отражаемости имеет пик в июле – 44 dBZ. Максимальная отражаемость в градовых облаках выше, чем в грозовых, только на 1–2 dBZ.

Среднее значение максимальной радиолокационной отражаемости для грозовой конвективной облачности, например, на территории Индии,

Северного Кавказа, северо-западной части России составляет 44, 49 и 51 dBZ соответственно [20], на территории Уральского Прикамья – 55 dBZ [14].

Пороговые значения максимальной отражаемости ДМРЛ-С (табл. 3) для вероятностей образования гроз и для возникновения гроз с градом более 70 % различаются несущественно. Однако при вероятности развития этих явлений в 50 % пороговые значения Z_{\max} различаются больше. Есть основания предполагать, что актуальным для улучшения качества прогноза гроз и града, формирующихся в разного рода мезомасштабных конвективных ячейках, является сравнение величин Z_{\max} .

Таблица 3. Пороговые значения максимальной радиолокационной отражаемости возникновения фронтальных гроз и града для территории Западной Сибири

Table 3. Threshold values of maximum radar reflectivity for the occurrence of frontal thunderstorms and hail for the territory of Western Siberia

Вероятность		50 %	70 %	80 %	90 %
Z_{\max} в облаках, dBZ	С грозой	41	46	48	51
	С градом	46	48	51	53

Радиолокационная отражаемость на уровне изотермы 0 °C для грозовых и градовых облаков совпадает, а вот *средняя отражаемость на высоте изотермы -15 °C* у градовых облаков составляет 41 dBZ, у грозовых облаков 36 dBZ. Радиолокационная отражаемость на уровне изотермы 0 °C имеет максимум так же, как ВВГО, в июле – 44 dBZ, а на уровне изотермы -15 °C не имеет выраженных значений максимума и минимума и составляет 36 dBZ.

Можно заметить, что в обоих случаях радиолокационная отражаемость на уровне изотермы 0 °C выше, чем на уровне изотермы -15 °C. По-видимому, этот факт можно объяснить тем, что максимум отражаемости фиксируется в зоне таяния, где кристаллические частицы покрываются водяной пленкой, что приводит к увеличению отражаемости за счет изменения диэлектрических свойств рассеивающих частиц [20].

Кроме выбора радиолокационных параметров грозовой и градовой облачности, расчета их статистических характеристик, задачей исследований являлось уточнение их пороговых значений над территорией Западной Сибири. Уточнение пороговых значений параметров облачности может способствовать уточнению идентификации гроз и гроз с градом по данным ДМРЛ-С, а также учитываться при прогнозе таких явлений в оперативной работе синоптиков.

Для определения пороговых значений радиолокационных параметров (высота верхней границы облачности, максимальная радиолокационная отражаемость, водность) при возникновении опасных явлений были построены гистограммы накопленных частот, которые позволяют выявить

вероятность возникновения грозовой и градовой деятельности при тех или иных значениях величин. Значимыми вероятностями, которые часто используются при анализе, являются 50, 70, 80, 90 %. Значения радиолокационных характеристик, которые имеют вышеуказанную вероятность, рассчитаны для грозовой и градовой облачности на фронтах и приведены в табл. 2 и 3.

Как видно из табл. 2 и 3, для возникновения кучево-дождевых облаков с градом высота верхней границы фронтальной облачности должна быть выше в среднем на 1 км, чем при возникновении фронтальных гроз. Так, фронтальным облакам с градом в 90 % случаев соответствует ВВГО не менее 13,9 км, а фронтальной грозе в 90 % соответствует ВВГО не менее 12,8 км. Значения высоты верхней границы облачности (табл. 2) для возникновения гроз и града, рассчитанные по данным ДМРЛ-С для Западной Сибири, оказались значительно выше, чем измеренные МРЛ-5 для Уральского региона и Прикамья [14]. Возможно, причиной таких различий является изменение климата за последнее двадцатилетие.

Для возможности повышения точности прогноза фронтальной грозовой и градовой облачности в Западной Сибири особый интерес представляют радиолокационные *параметры турбулентности и водности*. Следует заметить, что ДМРЛ-С может определить турбулентность только в облачном слое [15]. Поэтому данный параметр был рассмотрен для случаев возникновения турбулентности при наличии грозовых и градовых облаков над Западной Сибирью.

В анализируемой продукции ДМРЛ-С турбулентность представляет собой оценку скорости диссипации турбулентной энергии на основе измерений ширины спектра, радиолокационной отражаемости и рассчитанных сдвигов ветра [15]. Турбулентность в данном случае демонстрирует скорость развития кучево-дождевого облака. В базе данных ДМРЛ-С Новосибирск эта величина является самой вариативной. Интенсивность турбулентности делится на четыре категории: слабая, умеренная, сильная, чрезвычайная. Для территории Западной Сибири по результатам информации ДМРЛ-С выделено три степени развития турбулентности: слабая ($1 \text{ см}^2/\text{с}$), умеренная ($10 \text{ см}^2/\text{с}$) и сильная ($100 \text{ см}^2/\text{с}$) (табл. 4).

Таблица 4. Повторяемость (%) развития грозы и града при различной степени развития турбулентности

Table 4. Repeatability (%) of thunderstorm and hail development at different degrees of turbulence development

Опасное явление	Уровень турбулентности в грозовых облаках, $\text{см}^2/\text{с}$			
	1	10	100	Сумма
Град	37 %	55 %	8 %	100 %
Гроза	45%	48 %	7 %	100 %

Чаще всего (48–55 %) при фронтальных грозах и грозе с градом радиолокатором регистрировалась умеренная турбулентность. Реже всего (7–8 % случаев) наблюдалась сильная турбулентность. Максимальная турбулентность фиксировалась радиолокатором в грозовых облаках с высотой верхней границы 12–16 км.

Среднее значение уровня турбулентности для грозовых облаков составляет $12 \text{ см}^2/\text{с}$, а для градовых облаков $9,2 \text{ см}^2/\text{с}$. При этом стандартное отклонение составляет $17 \text{ см}^2/\text{с}$ для градовой облачности и до $23 \text{ см}^2/\text{с}$ для грозовой с градом. Максимальное среднее значение турбулентности составляет $13 \text{ см}^2/\text{с}$ в июне, минимальное – $10 \text{ см}^2/\text{с}$ в августе. Это зависит, по-видимому, от сочетания метеорологических условий (разницы температур с высотой, степени устойчивости атмосферы, синоптической ситуации), динамики атмосферы (вертикального сдвига ветра, волновых движений) и свойств подстилающей поверхности (неоднородности, деформации воздушного потока).

Пороговые значения интегральной водности (VIL) для разной вероятности возникновения грозы и грозы с градом различаются (табл. 5). При выпадении града значения интегральной водности конвективных ячеек выше, чем для формирования только гроз.

Таблица 5. Пороговые значения водности при формировании фронтальных гроз и града

Table 5. Threshold values of water content during the formation of frontal thunderstorms and hail

Вероятность		50 %	70 %	80 %	90 %
Водность, $\text{кг}/\text{м}^2$	Гроза	6,0	8,0	12,0	14,0
	Град	7,5	14,0	14,7	15,8

Диапазон изменения интегральной водности анализированных грозовых и градовых облаков варьируется в пределах $0,5\text{--}32 \text{ кг}/\text{м}^2$. Среднее значение водности грозовой облачности в течение всего периода исследований составляет $8,5 \text{ кг}/\text{м}^2$ и во все месяцы различается достаточно вариативно, что демонстрирует величина стандартного отклонения. Интегральная водность анализируемой грозовой облачности в течение летнего периода имеет максимум средних значений в июле – $9 \text{ кг}/\text{м}^2$, а минимум в июне – $7,7 \text{ кг}/\text{м}^2$. Для градовых облаков среднее значение интегральной водности составляет в целом $11,7 \text{ кг}/\text{м}^2$.

Согласно [13, 15, 23], величина VIL может быть хорошим индикатором для идентификации гроз и града. Исследования, проведенные в 2017–2019 гг. в ФГБУ «ЦАО», показали, что нижний порог значения VIL для явления «град» в большинстве случаев составляет $12 \text{ кг}/\text{м}^2$. Если по данным метеостанции отмечено явление «град», а значения VIL в это время вблизи этой метеостанции не превышают $8 \text{ кг}/\text{м}^2$, это очень часто означает, что

наблюдатель «крупу» принял за «град». Поскольку в результате наших исследований (табл. 5) получено, что в 50 % случаев градовой облачности значения VII не превышают 8 кг/м^2 , а в 90 % случаев – 16 кг/м^2 , исследования возможности использования параметра VII в качестве предиктора явлений «град» необходимо продолжить.

Заключение

В результате выполненной работы для территории центральной части Западной Сибири по данным анализа радиолокационных характеристик грозовой и градовой облачности, анализируемой в радиусе 200 км от ДМРЛ-С Новосибирск, можно сделать следующие выводы.

1. Сопоставление радиолокационных и наземных случаев регистрации гроз и града выявило достаточно высокий уровень согласования – 84 %. Вероятность определения гроз с использованием ДМРЛ оценивается как высокая, если регистрируется более 80 % гроз [12]. Заметим, что анализ результатов сопоставления радиолокационных и наземных наблюдений с помощью системы «ВАЛИРАД» над Европейской территорией России тоже продемонстрировал высокий уровень согласования данных (80 %) об опасных явлениях погоды по информации сети ДМРЛ-С и по данным на метеостанциях [16, 17].

2. Высота верхней границы облачности при фронтальных грозах составляет в среднем 11 км, а и при грозах с градом – 12 км; максимальные высоты при фронтальной грозе зарегистрированы в июле (15 км), а в случае градовой облачности верхняя граница трижды (13.07.2021, 14.07.2021, 27.06.2023) достигала высоты 16 км.

3. Высоты верхней границы грозовых и градовых облаков в Западной Сибири сопоставимы с высотами аналогичной облачности в более южных широтах [14, 20] и сопоставимы с результатами регистрации высоты такой облачности с метеорологических спутников [10, 26].

4. В дни регистрации гроз и гроз с градом высота тропопаузы не превышала 12 км. Высота тропопаузы примерно совпадала с высотой верхней границы радиоэха градовой облачности в случаях, когда размер градин составлял менее 10 мм. Во время регистрации более крупного града высота верхней границы облачности превышала высоту тропопаузы в среднем на 0,5 км, но иногда и на 2–3 км.

5. Интегральная водность градовых облаков значительно выше, чем конвективных облаков с грозами. Это связано с наличием более мощного облачного слоя с интенсивными восходящими движениями, благодаря чему над Западной Сибирью формируются облачные элементы в виде градин диаметром более 10 мм. Значения VII в таких градовых облаках меняются в пределах $16\text{--}32 \text{ кг/м}^2$, что соответствует инструкции для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике [12]. При

размере выпавших градин менее 10 мм значения VII регистрируются в диапазоне 8–16 кг/м².

6. Грозы и гроза с градом образуются в конвективной облачности только при наличии атмосферной турбулентности. Атмосферные фронты в циклонах могут формировать и среднюю, и сильную турбулентность в зависимости от ряда факторов. Большинство случаев сильной турбулентности вызвано быстрым движением холодного фронта, содержащего большое количество влаги [3]. Чем сильнее ветер и больше коэффициент трения, зависящий от шероховатости подстилающей поверхности, тем интенсивнее динамическая турбулентность. В результате представленных исследований самая высокая турбулентность наблюдается в облачности холодных фронтов. В 8 % градовой облачности зарегистрирована «сильная» [15] турбулентность, в 55 % – умеренная, а в 37 % – слабая. Почему в проанализированной градовой облачности турбулентность меньше чем в грозовой? – вопрос остается открытым и требует дополнительных исследований, поскольку мощные кучево-дождевые облака, из которых, выпадают ливневые осадки и град, всегда формируются сильной турбулентностью.

7. В мощных градовых конвективных ячейках измеряемые значения максимальной отражаемости увеличиваются до 60 dBZ, а в грозовых – не более 55 dBZ.

8. Значения радиолокационной отражаемости на уровнях температуры 0 °C и -15 °C различаются для грозовых и градовых облаков примерно на 20 %, поэтому эти параметры могут успешно использоваться для прогноза образования града.

Успехи в повышении точности диагностирования грозовых и градовых облаков имеют важное практическое значение. Полученные результаты могут также найти применение при наукастинге явления. Одна из основных задач наукастинга – передача результатов в автоматизированную систему управления воздушным движением, что особенно актуально для развития системы воздушного транспорта в Западной Сибири.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Наталье Ильиничне Серебрянник за анализ представленных результатов и за ряд ценных замечаний по содержанию данной статьи, способствовавших ее улучшению.

The authors express their gratitude to Natalia Ilyinichna Serebryannik, senior researcher at the Federal State Budgetary Institution «Central Aerological Observatory», for her analysis of the presented results and for a number of valuable comments on the content of this article, which contributed to its improvement.

Список литературы

1. Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Диагностика града на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2(388). С. 114–127. DOI 10.37162/2618-9631-2023-2-114-127.

2. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 360. С. 135-148.
3. Аль-Хулайфави И.А., Иошта А.Р. Анализ грозовой активности на территории Ирака и Турции // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. № 4 (72). С. 164-169.
4. Ананова Л.Г., Горбатенко В.П., Луковская И.А. Особенности радиолокационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 51–56.
5. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды: РД 52.27.723-2009. Обнинск «ИГ-СОЦИН», 2009. 38 с.
6. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалою Ю.А., Кондратюк В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И. Атлас облаков. СПб.: Д'АРТ, 2011. 248 с.
7. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 219 с.
8. Горбатенко В.П., Ананова Л.Г., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А. Аэросиноптические условия образования града над юго-востоком Западной Сибири // Труды СибНИГМИ. 2023. Вып. 108. С. 17–28.
9. Горбатенко В.П., Кузевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108-117.
10. Горбатенко, В.П., Яськов А.А. Характеристики грозовых облаков, зарегистрированные спутниками Terra и Aqua // Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству. СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2023. С. 336-340.
11. Дядюченко В.Н., Павлюков Ю.Б., Вылегжанин И.С. Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23-27.
12. Инструкция для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике [Электронный ресурс]. URL: http://omsk-meteo.ru/images/files/cci_doc/inv_n_3406.pdf (дата обращения 15.11.2025).
13. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Методика расчета водности и водозаписа кучево-дождевой облачности // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2008. № 1. С. 59-72.
14. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. №1. С. 84–95.
15. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М., 2019. 129 с.
16. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2023 г. Долгопрудный. 2024. 77 с.
17. Методическое письмо об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2024 г. Долгопрудный. 2025. 75 с.
18. Облака и облачная атмосфера. Справочник под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 646 с.
19. Павлюков, Ю.Б., Серебрянник Н.И., Карнов Б.Н. Валидация радиолокационных наблюдений опасных явлений погоды на сети ДМРЛ по данным наземной наблюдательной сети Росгидромета // Труды МФТИ. 2016. Т. 8, № 1 (29). С. 95–101.
20. Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М., Вое В.А., Rawar S.D., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Gopalakrishnan V., Геккиева Ж.М. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 932-936. DOI: 10.15372/AOO20201205.

21. Спрыгин А.А., Прохареня М.И. Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 6–22.

22. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.

23. Федеральные авиационные правила "Предоставление метеорологической информации для обеспечения полётов воздушных судов" (утв. Приказом Минтранса РФ № 60 от 03.03.2014).

24. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Корицунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27-41. DOI 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

25. Щукин, Г.Г., Булкин В.В. Метеорологическая пассивно-активная радиолокация // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 5. С. 549-572.

26. Яськов А. А., Горбатенко В.П. Параметры грозовых и градовых облаков над Западной Сибирью по данным спутника Terra за 2020 г. // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2023. С. 487-491.

References

1. Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M. Diagnostika grada na osnovе dannykh DMRL-S i rezul'tatov chislennogo modelirovaniya [Diagnosis of hail based on DMRL-C and numerical modeling data]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2023, no. 2 (388), 114-127. DOI 10.37162/2618-9631-2023-2-114-127 [in Russ.].

2. Alekseeva A.A., Peskov B.E. Otsenka maksimal'noy skorosti konvektivnogo potoka, kharakteristik livnevnykh osadkov i grada po radiolokatsionnoy informatsii [Assessment of the maximum rate of convective flow characteristics heavy rains and hail radiolokatsionnoy informatsii]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of Hydrometcentre of Russia]*. 2016, vyp. 360, pp. 135-148 [in Russ.].

3. Al-Khulaifawi I.A., Ioshpa A.R. Otsenka maksimal'noy skorosti konvektivnogo potoka, kharakteristik livnevnykh osadkov i grada po radiolokatsionnoy informatsii [Analysis of thunderstorm activity in Iraq and Turkey]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [News of the Ural State Mining University]*. 2023, no. 4 (72), pp. 164-169. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-4-164-169 [in Russ.].

4. Ananova L.G., Gorbatenko V.P., Lukovskaya I.A. Radar characteristics of convective clouds during squalls in the southeastern part of Western Siberia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007, vol. 32, no. 7, pp. 449-452. DOI: 10.3103/S1068373907070059.

5. Bazovyeye trebovaniya k tekhnologii podgotovki kratkosrochnykh prognozov pogody: RD 52.27-723-2009. Obninsk, IG-Sotsin Publ., 2009. 38 p. [in Russ.].

6. Bepalov D.P., Devyatkin A.M., Dovgalyuk Yu.A., Kondratyuk V.I., Kuleshov YU.V., Svetlova T.P., Suvorov S.S., Timofeyev V.I. Atlas oblakov [Atlas of Clouds]. St. Petersburg, D'ART Publ., 2011. 248 p. [in Russ.].

7. Brylev G.B., Gashina S.B., Nizdoymynoga G.L. Radiolokatsionnyye kharakteristiki oblakov i osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 219 c. [in Russ.].

8. Gorbatenko V.P., Ananova L.G., Apostolidi H.T., Karpova A.A. Aerosinopticheskiye usloviya obrazovaniya grada nad yugo-vostokom Zapadnoy Sibiri [Aerosynoptic conditions of hail formation over the southeast of Western Siberia]. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta [Transactions of the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute]*. 2023, vyp. 108, pp. 17-28 [in Russ.].

9. Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N., Chursin V.V., Konstantinova D.A. assessment of atmospheric convective potential variability in Western Siberia in changing climate. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, vol. 45, no. 5, pp. 360-367. DOI: 10.3103/S1068373920050076.

10. Gorbatenko, V.P., Yaskov A.A. Kharakteristiki grozovykh oblakov, zaregistrirovannyye sputnikami Terra i Aqua [Characteristics of thunderstorm clouds recorded by the Terra and Aqua satellites]. *Materialy IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu [Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity]*. St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2023. pp. 336-340 [in Russ.].

11. Дядюченко В.Н., Павлюков Ю.Б., Вылегжанин И.С. Doplerovskiy radiolokatory v Rossii [Doppler radars in Russia]. *Nauka v Rossii [Science in Russia]*. 2014, no. 1, pp. 23-27 [in Russ.].

12. Instruktsiya dlya operativno-prognosticheskikh i aviarnykh podrazdeleniy Rosgidrometa po ispol'zovaniyu informatsii DMRL v sinopticheskoy praktike [Elektronnyy resurs]. URL: http://omsk-meteo.ru/images/files/cci_doc/inv_n_3406.pdf (data obrashcheniya 15.11.2025) [in Russ.].

13. Kalinin N.A., Smirnova A.A. Metodika rascheta vodnosti i vodozapasa kuchevozhdzhevoy oblachnosti [Recovery of liquid water content and stores of a cumulonimbus cloud]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle [Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]*. 2008, no. 1. pp. 59-72 [in Russ.].

14. Kalinin N.A., Smirnova A.A. Study of radar characteristics for detection of hazardous weather associated with cumulonimbus clouds. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2005, no. 1, pp. 64-72.

15. Metodicheskiye ukazaniya po ispol'zovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike: Tret'ya redaktsiya. Moscow, 2019. 129 p. [in Russ.].

16. Metodicheskoye pis'mo ob itogakh raboty seti DMRL Rosgidrometa v 2023 g. Dolgoprudnyy, 2024, 77 s. [in Russ.].

17. Metodicheskoye pis'mo ob itogakh raboty seti DMRL Rosgidrometa v 2024 g. Dolgoprudnyy, 2025, 75 s. [in Russ.].

18. Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik pod red. I.P. Mazina i A.KH. Khrigiana. L.: Gidrometeoizdat Publ., 1989. 646 s. [in Russ.].

19. Pavlyukov Yu.B., Serebryannik N.I., Karpov B.N. Validatsiya radiolokatsionnykh nablyudeniy opasnykh yavleniy pogody na seti DMRL po dannym nazemnoy nablyudatel'noy seti Rosgidrometa [Validation of weather radar observations of severe weather phenomena with the ROSHYDROMET ground-based weather stations]. *Trudy MFTI [Proceedings of MIPT]*. 2016, vol. 8, no. 1 (29), pp. 95-101 [in Russ.].

20. Sinkevich A.A., Popov V.B., Abshaev A.M., Boe B.A., Pawar S.D., Mikhailovsky Yu.P., Toropova M.L., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh.M. Radar characteristics of cu during their transition to thunderstorm in different regions of the world. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020, vol. 33, no. 6, pp. 645-649. DOI: 10.1134/S1024856020060226.

21. Sprygin A.A., Prokharénya M.I. Diagnostika i prognoz konvektivnykh struktur s opasnymi yavleniyami po dannym modelirovaniya i distantsionnogo zondirovaniya nad territoriyey Belarusi i Tsentral'noy Rossii [Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2018, no. 3 (369), pp. 6-22. DOI 10.37162/2618-9631-2018-3-6-22 [in Russ.].

22. Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshcheye rezюме. St. Petersburg, Naukoyemkiye tekhnologii Publ., 2022, 124 p. [in Russ.].

23. Federal'nyye aviatsionnyye pravila "Predostavleniye meteorologicheskoy informatsii dlya obespecheniya polotov vozdushnykh sudov" (utv. Prikazom Mintransa RF № 60 ot 03.03.2014).

24. Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A., Korshunova N.N., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Shvets' N.V., Shikhov A.N., Yarinich Yu.I. Atmospheric severe convective events in Russia: changes observed from different data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022, vol. 47, no. 5, pp. 343-354. DOI: 10.3103/s106837392205003x.

25. Shchukin, G.G., Bulkin V.V. Meteorologicheskaya passivno-aktivnaya radiolokatsiya [Meteorological passive-active radar observations]. *Radiotekhnika i elektronika [Journal of communications technology and electronics]*. 2011, vol. 56, no. 5, pp. 509-530. DOI: 10.1134/s1064226911030089.

26. Yaskov A.A., Gorbatenko V.P. Parametry grozovykh i gradovykh oblakov nad Zapadnoy Sibir'yu po dannym sputnika Terra za 2020 g. *Gidrometeorologiya i fizika atmosfery: sovremennyye dostizheniya i tendentsii razvitiya: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. St. Petersburg, Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. 2023, pp. 487-491.

*Поступила 23.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 23.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-52-73>

УДК 504.3.054+504.06+551.509.51

Сравнение прогнозов температуры и скорости ветра по конфигурациям системы COSMO-Ru/icon на ЕТР за 6 месяцев 2025 года и в эпизоде неблагоприятных метеорологических условий в Москве

А.П. Ревокатова, И.Н. Кузнецова, А.А. Кирсанов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
revokatova@gmail.com*

Действующая в Гидрометцентре России технология прогнозирования метеорологического показателя рассеивания загрязнений (МППЗ) основана на использовании прогнозов конфигурации COSMO-Ru6ENA. В связи с переходом на применение прогнозов системы ICON-Ru с шагом горизонтальной сетки 6 км проведены сравнения модельных расчетов температуры и ветра на изобарических поверхностях 1000, 925 и 850 гПа двух конфигураций COSMO-Ru6ENA и ICON-Ru13/6N29 с данными радиозондирования на ЕТР. Установлено преимущество прогнозов ICON-Ru по сравнению с COSMO-Ru на тестируемой выборке. Совместный анализ прогнозов метеорологических характеристик ICON-Ru с данными наблюдений на Останкинской телебашне и в пункте радиозондирования выявил характерные особенности прогнозов вертикальных профилей температуры и скорости ветра, имеющие практическое значение для прогнозирования условий рассеивания примеси. Верификация прогнозов МППЗ проводилась по данным измерений концентраций загрязнений на телебашне и измерений на наземных станциях контроля ГПБУ «Мосэкомониторинг» для эпизода неблагоприятных метеорологических условия в конце марта 2025 года. Результаты подтверждают связь МППЗ-1 типа (слабое рассеивание) с повышением концентраций загрязняющих веществ на станциях городского типа и указывают на обоснованность использования данных системы ICON-Ru для прогноза МППЗ.

Ключевые слова: неблагоприятные метеорологические условия, метеорологический показатель рассеивания загрязнений (МППЗ), верификация, загрязнение атмосферы, ICON-Ru, COSMO-Ru

Comparison of temperature and wind speed forecasts for the COSMO-Ru/icon configurations in the European part of Russia for six months of 2025 and during the episode of adverse meteorological conditions in Moscow

A.P. Revokatova, I.N. Kuznetsova, A.A. Kirsanov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
revokatova@gmail.com*

The current technology for forecasting the meteorological indicator of pollution dispersion (MIPD) used at the Hydrometcentre of Russia is based on the COSMO-Ru6ENA configuration forecasts. Due to the transition to using ICON-Ru system forecasts with a 6 km

horizontal grid spacing, model calculations of temperature and wind at the levels of 1000, 925, and 850 hPa for the COSMO-Ru6ENA and ICON-Ru13/6N29 configurations were compared with radiosonde data over the European Part of Russia. An advantage of ICON-Ru forecasts over COSMO-Ru was revealed using the test sample. A joint analysis of ICON-Ru forecasts of meteorological characteristics with observational data from the Ostankino TV Tower and a radiosonde station revealed characteristic features of the forecasts of temperature and wind speed profiles. These results are of practical importance for predicting pollution dispersion conditions. The results of the MIPD forecast verification using pollutant concentration measurements at the TV tower and Mosekomonitoring surface monitoring stations during the episode of adverse meteorological conditions at the end of March 2025 confirmed the connection of type 1 MIPD (weak dispersion) with increased pollutant concentrations at urban-type stations and indicated reasonability of using the ICON-Ru system data for MIPD forecasting.

Keywords: adverse meteorological conditions, meteorological indicator of pollution dispersion (MIPD), verification, atmospheric pollution, ICON-Ru, COSMO-Ru

Введение

Установленные связи концентраций загрязняющих веществ в приземном воздухе с метеорологическими факторами являются основой для разработки статистических методов прогнозирования метеорологических условий, способствующих повышению уровня загрязнения. Разработка таких методов с применением комплексного метеорологического показателя рассеивания загрязнений (МППЗ) является традиционным направлением исследований в Гидрометцентре России [4]. Использование численных прогнозов метеорологических характеристик в атмосферном пограничном слое (АПС) обеспечило прогнозирование МППЗ на двое суток вперед с часовым шагом и с осреднением для характерных внутрисуточных периодов – ночь, утро, день, вечер [4, 8].

При расчете МППЗ применяются прогностические данные активно развивающихся в Гидрометцентре России численных моделей атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением [6, 7]. Для прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) реализована технология подготовки необходимой для расчетов МППЗ метеорологической информации с использованием данных конфигурации COSMO-Ru6ENA по исходным срокам 00 и 12 ч ВСВ [4, 8]. В связи с тем, что в настоящее время осуществляется переход с конфигурации COSMO-Ru6ENA модели COSMO на конфигурацию ICON-Ru13/6N29 модели ICON с шагом сетки по горизонтали 6 км (далее – ICON-Ru), имеющей более совершенные динамический и физический блоки, необходимо оценить качество воспроизводимых ICON-Ru метеорологических характеристик, задействованных в расчете МППЗ. При том, что регулярные стандартные оценки качества модельных расчетов ежемесячно приводятся на сайте Гидрометцентра России (<https://method.meteorf.ru/estimate/estimate.html>), проводятся также и авторские испытания для более подробной оценки успешности прогноза отдельных характеристик [3].

1. Методы

МПРЗ является функцией количественной величины температурной стратификации (градиента), средней скорости ветра в АПС, осадков и адвективных изменений температуры [4], поэтому важно оценить качество воспроизведения ICON-Ru температуры и ветра у поверхности и на вертикальных уровнях. Эта работа разделена на две части: в первой части представлены оценки прогноза полей температуры и скорости ветра на уровнях 1000, 925 и 850 гПа при помощи пакета METplus [9] за 6 месяцев (в отдельности за каждый, с января по июнь 2025 г.). Целью этой работы было в первую очередь выявление основных закономерностей изменения ошибок в зависимости от срока старта прогноза (рассматривались все прогнозы, стартовавшие от 0, 6, 12, 18 ч), в зависимости от заблаговременности (12–48 ч) и от сезона, а также сравнение прогнозов конфигураций систем COSMO-Ru и ICON-Ru между собой.

Вторая часть работы посвящена “case-study” – изучению конкретного случая НМУ в марте 2025 года. Приводятся данные прогнозов температуры и скорости ветра на стандартных вертикальных уровнях в конфигурациях COSMO-Ru6ENA и ICON-Ru13/6N29 и их сравнение с данными радиозондирования и контактных измерений на Останкинской телебашне, подчеркиваются внутрисуточные особенности формирования температурного профиля – инверсий и конвективных условий.

Оценки считались для ICON-Ru13/6N29 и COSMO-Ru6ENA с шагом сетки по горизонтали 6 км. Для верификации на вертикальных уровнях (1000, 925 и 850 гПа) пакет METplus использует данные радиозондов. Прогностические данные интерполируются с модельной сетки в точки станций с помощью билинейной интерполяции.

2. Результаты

2.2. Оценки прогнозов температуры и скорости ветра по COSMO-Ru и ICON-Ru

Температура воздуха

В табл. 1 приведены значения средней абсолютной ошибки MAE (Mean Absolute Error) для температуры воздуха на уровне 1000 гПа с января по июнь 2025 г. для территории ЕТР. Видно, что в большинстве случаев прогнозы по ICON-Ru оказались более успешными, единичные случаи, когда MAE COSMO-Ru была меньше, выделены в таблице жирным шрифтом. Выделяются прогнозы от 12 ч: с января по июнь для всех прогнозов температуры на 1000 гПа MAE по ICON-Ru немного больше, чем по COSMO-Ru. Это справедливо для заблаговременности прогноза 12 ч для всех месяцев, для заблаговременности 24 ч в феврале, для заблаговременности 36 ч в феврале, апреле, мае и июне, для заблаговременности 48 ч в мае и июне.

Это может быть связано как с начальными условиями, так и с особенностями подстилающей поверхности в модели, в частности, с наличием или отсутствием снежного покрова в весенние месяцы. Однако важно будет заметить, что разницы в ошибках между COSMO-Ru и ICON-Ru в этот срок относительно небольшие и варьируют от 0.01 до 0.27, что заметно меньше, чем разницы в значениях MAE в те сроки, когда прогноз по ICON-Ru лучше. В мае 2025 г. прогнозы по ICON-Ru отличались более высокими ошибками в полях температуры, чем в остальные месяцы. В целом наблюдается тенденция к увеличению ошибки по мере увеличения заблаговременности прогноза.

Таблица 1. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры MAE на уровне 1000 гПа. Январь–июнь 2025 г., конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON)

Table 1 Mean Absolute Error of temperature forecast (MAE) at the 1000 hPa level. January-June 2025, configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON).

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
6 ч	I			1.27	1.09			1.12	1.09
	II			1.34	1.22			1.15	1.14
	III			1.72	1.37			1.58	1.61
	IV			1.27	1.32			1.58	1.62
	V			1.40	1.33			1.63	1.85
	VI			1.32	1.13			1.42	1.56
12 ч	I	1.33	1.16			1.25	1.32		
	II	1.35	1.26			1.31	1.4		
	III	2.4	1.6			1.58	1.8		
	IV	1.68	1.45			1.53	1.63		
	V	1.7	1.42			1.55	1.85		
	VI	1.38	1.2			1.45	1.6		
18 ч	I			1.12	1.1			1.44	1.21
	II			1.25	1.12			1.44	1.38
	III			1.79	1.75			2.41	2.62
	IV			1.64	1.66			1.69	1.54
	V			1.59	1.85			1.62	1.45
	VI			1.42	1.53			1.4	1.23
24 ч	I	1.43	1.44			1.49	1.3		
	II	1.62	1.58			1.44	1.45		
	III	1.9	1.7			1.82	1.55		
	IV	1.76	1.7			1.65	1.55		
	V	1.68	1.82			1.6	1.6		
	VI	1.42	1.55			1.5	1.33		

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
30 ч	I			1.25	1.21			1.54	1.54
	II			1.4	1.22			1.72	1.65
	III			2.41	1.79			1.86	1.8
	IV			2.06	1.82			1.76	1.62
	V			1.81	1.69			1.7	1.87
	VI			1.74	1.39			1.49	1.52
36 ч	I	1.61	1.31			1.59	1.55		
	II	1.76	1.62			1.64	1.67		
	III	2.95	1.9			1.78	1.9		
	IV	2.22	1.85			1.68	1.68		
	V	2.03	1.73			1.68	1.95		
	VI	1.98	1.48			1.47	1.65		
42 ч	I			1.36	1.26			1.64	1.4
	II			2.09	1.88			1.79	1.68
	III			1.96	1.83			3.01	1.94
	IV			1.76	1.6			2.22	1.84
	V			1.81	1.84			1.95	1.72
	VI			1.56	1.53			1.96	1.6
48 ч	I	1.65	1.57			1.61	1.42		
	II	1.92	1.82			1.75	1.7		
	III	2.3	1.9			2.42	1.9		
	IV	1.8	1.6			2.2	1.82		
	V	1.98	2.03			1.8	1.81		
	VI	1.62	1.6			2.02	1.66		

В табл. 2 приведены значения MAE для температуры воздуха на уровне 925 гПа для территории ЕТР. В большинстве случаев прогнозы по ICON-Ru оказались более успешными. Сроки, для которых это неверно, выделены жирным шрифтом. Видно, что в большинстве своем это случаи с заблаговременностью 6, 12, 18 ч в теплый период. И разница между моделями составляет обычно сотые доли. Общей закономерностью является уменьшение MAE на уровне 925 гПа по сравнению с уровнем 1000 Па.

Ход среднего за 6 месяцев MAE температуры для запусков прогноза (init time) 0 и 12 ч ВСВ в зависимости от заблаговременности представлен на рис. 1. На уровне 1000 гПа (рис. 1а) ошибка на срок 00 ч при малых заблаговременностях прогноза (до 18 ч) по COSMO-Ru меньше, чем по ICON-Ru, при заблаговременности от 24 до 32 ч ошибки примерно одинаковые, при прогнозе более, чем на 36 ч, прогнозы ICON-Ru показали большую точность.

Таблица 2. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры MAE на уровне 925 гПа. Январь-июнь 2025 г., конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON)

Table 2. Mean Absolute Error of temperature forecast (MAE) at the 925 hPa level. January-June 2025, configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON)

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
6 ч	I			1.27	1.09			1.12	1.09
	II			1.34	1.22			1.15	1.14
	III			1.72	1.37			1.58	1.61
	IV			1.27	1.32			1.58	1.62
	V			1.40	1.33			1.63	1.85
	VI			1.32	1.13			1.42	1.56
12 ч	I	1.33	1.16			1.25	1.32		
	II	1.35	1.26			1.31	1.4		
	III	2.4	1.6			1.58	1.8		
	IV	1.68	1.45			1.53	1.63		
	V	1.7	1.42			1.55	1.85		
	VI	1.38	1.2			1.45	1.6		
18 ч	I			1.12	1.1			1.44	1.21
	II			1.25	1.12			1.44	1.38
	III			1.79	1.75			2.41	2.62
	IV			1.64	1.66			1.69	1.54
	V			1.59	1.85			1.62	1.45
	VI			1.42	1.53			1.4	1.23
24 ч	I	1.43	1.44			1.49	1.3		
	II	1.62	1.58			1.44	1.45		
	III	1.9	1.7			1.82	1.55		
	IV	1.76	1.7			1.65	1.55		
	V	1.68	1.82			1.6	1.6		
	VI	1.42	1.55			1.5	1.33		
30 ч	I			1.25	1.21			1.54	1.54
	II			1.4	1.22			1.72	1.65
	III			2.41	1.79			1.86	1.8
	IV			2.06	1.82			1.76	1.62
	V			1.81	1.69			1.7	1.87
	VI			1.74	1.39			1.49	1.52
36 ч	I	1.61	1.31			1.59	1.55		
	II	1.76	1.62			1.64	1.67		
	III	2.95	1.9			1.78	1.9		
	IV	2.22	1.85			1.68	1.68		
	V	2.03	1.73			1.68	1.95		
	VI	1.98	1.48			1.47	1.65		

Заблаговременность	Месяц	Срок старта прогноза							
		0 ч		6 ч		12 ч		18 ч	
		COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON	COSMO	ICON
42 ч	I			1.36	1.26			1.64	1.4
	II			2.09	1.88			1.79	1.68
	II			1.96	1.83			3.01	1.94
	IV			1.76	1.6			2.22	1.84
	V			1.81	1.84			1.95	1.72
	VI			1.56	1.53			1.96	1.6
48 ч	I	1.65	1.57			1.61	1.42		
	II	1.92	1.82			1.75	1.7		
	II	2.3	1.9			2.42	1.9		
	IV	1.8	1.6			2.2	1.82		
	V	1.98	2.03			1.8	1.81		
	VI	1.62	1.6			2.02	1.66		

При прогнозе на 12 ч ВСВ (init time = 12) наблюдается ярко выраженное различие в MAE температуры между конфигурациями, по COSMO-Ru ошибки заметно больше. На уровне 925 гПа (рис. 16) прогнозы температуры на нулевой срок с заблаговременностью 6 ч лучше по COSMO-Ru, на 12 часов дня – по ICON-Ru.

Начиная с заблаговременности 12 ч и до 54 ч ICON-Ru стабильно лучше. MAE в полдень всегда больше, чем в полночь. На уровне 850 гПа различия между моделями уже не такие большие, но сохраняется основная тенденция: на 0 ч прогноз точнее, чем на 12 ч. По ICON-Ru ошибки всегда меньше, за исключением прогнозов на нулевой срок с заблаговременностью 6 и 18 ч.

Скорость ветра

Аналогичные оценки проведены для прогнозов скорости ветра, анализ которых позволяет сделать следующие основные выводы:

– в холодный период (январь, февраль) в большинстве случаев прогнозы скорости ветра на уровне 1000 гПа оказались более успешными по COSMO-Ru, в марте и апреле – примерно в половине случаев прогнозы ICON-Ru были лучше, а в теплый период (май, июнь) прогнозы по ICON-Ru были заметно лучше;

– прогнозы скорости ветра на уровне 925 гПа для первых 6 месяцев 2025 года для территории ЕТР в подавляющем большинстве случаев были лучше по ICON-Ru для всех сроков старта и всех заблаговременностей. В январе в 80 % прогнозы по ICON-Ru были лучше.

Ход среднего за 6 месяцев RMSE прогноза скорости ветра для сроков старта прогноза (init time) 0 и 12 ч в зависимости от заблаговременности представлен на рис. 2.

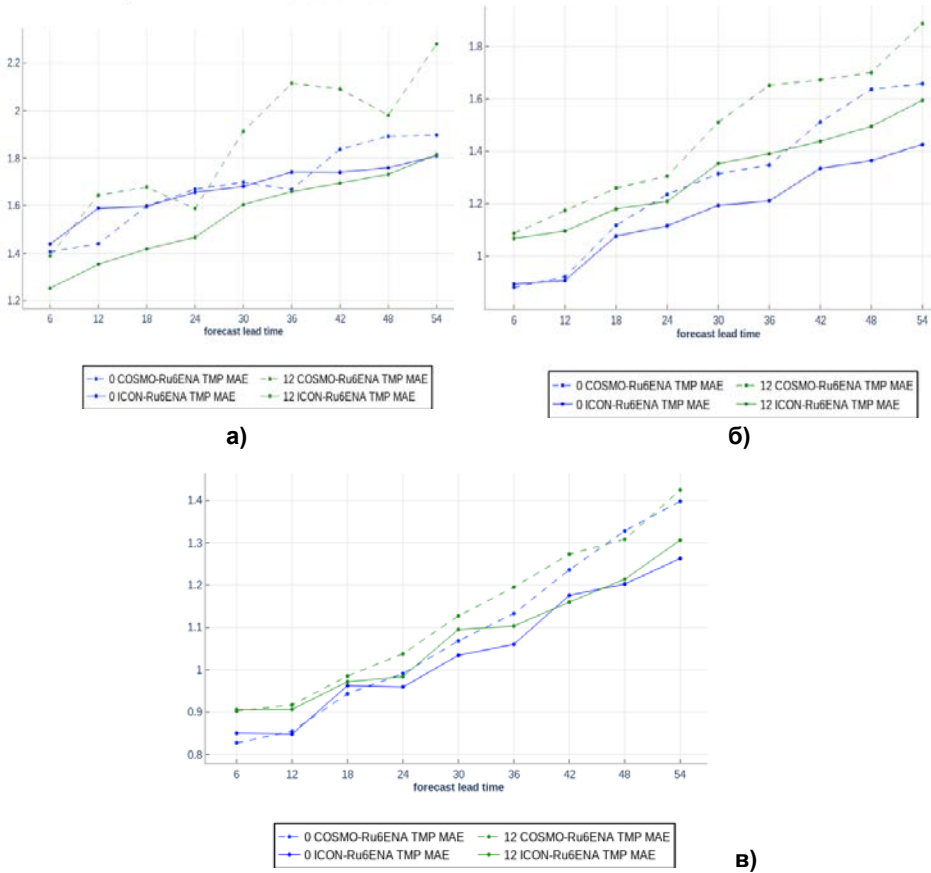


Рис. 1. Осредненная за период январь–июнь 2025 г. средняя абсолютная ошибка прогноза (MAE) температуры по исходному сроку 0 и 12 ч ВСВ с заблаговременностью до 54 час через 6 ч на уровнях: 1000 гПа (а); 925 гПа (б); 850 гПа (в). Конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON) с горизонтальным шагом сетки 6 км.

Fig. 1. Averaged over the period January – June 2025, Mean Absolute Error (MAE) of temperature forecast by initial time 0 and 12 UTC with lead times up to 54 hours in 6-hour increments at levels: 1000 hPa (а); 925 hPa (б); 850 hPa(в). Configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON) with a 6 km horizontal grid step.

На уровне 1000 гПа (рис. 2а) ошибка на срок 00 ч по COSMO-Ru больше, чем по ICON-Ru, а на 12-часовой срок, наоборот, меньше вплоть до 42 ч прогноза.

На уровне 925 гПа (рис. 2б) прогнозы скорости ветра на полночь и полдень лучше по ICON-Ru для всех заблаговременностей. То же самое верно и для уровня 850 гПа. В отличие от температуры, при прогнозах скорости ветра на всех уровнях ошибки на 12-часовой срок всегда заметно меньше, чем на нулевой срок.

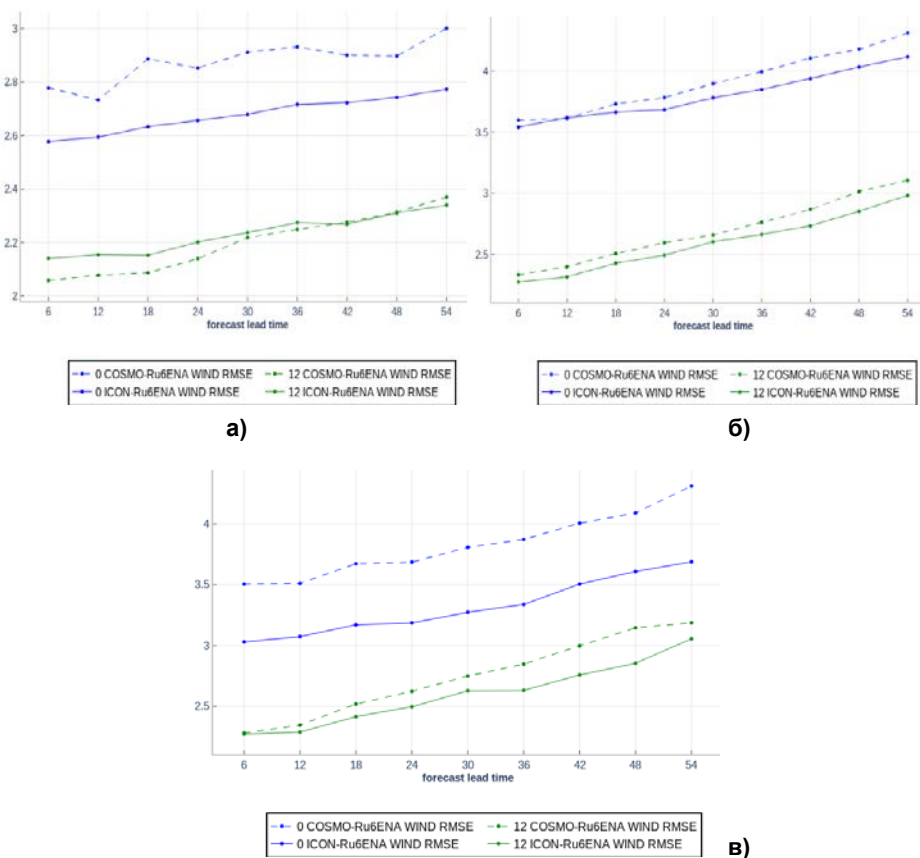


Рис. 2. Осредненная за период январь–июнь 2025 г. средняя квадратическая ошибка прогноза (RMSE) скорости ветра по исходному сроку 0 и 12 ч ВСВ с заблаговременностью до 54 час через 6 ч на уровнях: 1000 гПа (а); 925 гПа (б); 850 гПа (в). Конфигурации COSMO-Ru6ENA (COSMO) и ICON-Ru13/6N29 (ICON) с горизонтальным шагом сетки 6 км.

Fig. 2. Averaged over the period January – June 2025, Root Mean Square Error (RMSE) of wind speed forecast by initial time 0 and 12 UTC with lead times up to 54 hours in 6-hour increments at levels: 1000 hPa(а); 925 hPa (б); 850 hPa(в). Configurations COSMO-Ru6ENA (COSMO) and ICON-Ru13/6N29 (ICON) with a 6 km horizontal grid step.

2.2. Неблагоприятные метеорологические условия 28–31 марта 2025 года

В конце марта 2025 года в Московском регионе сформировались синоптические условия, благоприятные для накопления примесей, на большей части мегаполиса было зафиксировано повышение уровня загрязнения приземного воздуха (<https://mosecom.mos.ru/air-quality/>). Вначале (29 марта) погодные условия определял отрог казахского антициклона

со слабым ветром из южного сектора; эпизод НМУ закончился (31 марта) под влиянием южного циклона с дождями и усилением ветра местами до 12 м/с. Представленные на рис. 3 карты погоды на основе прогнозов ICON-Ru в деталях отражают особенности атмосферных процессов и их смену в эпизоде.

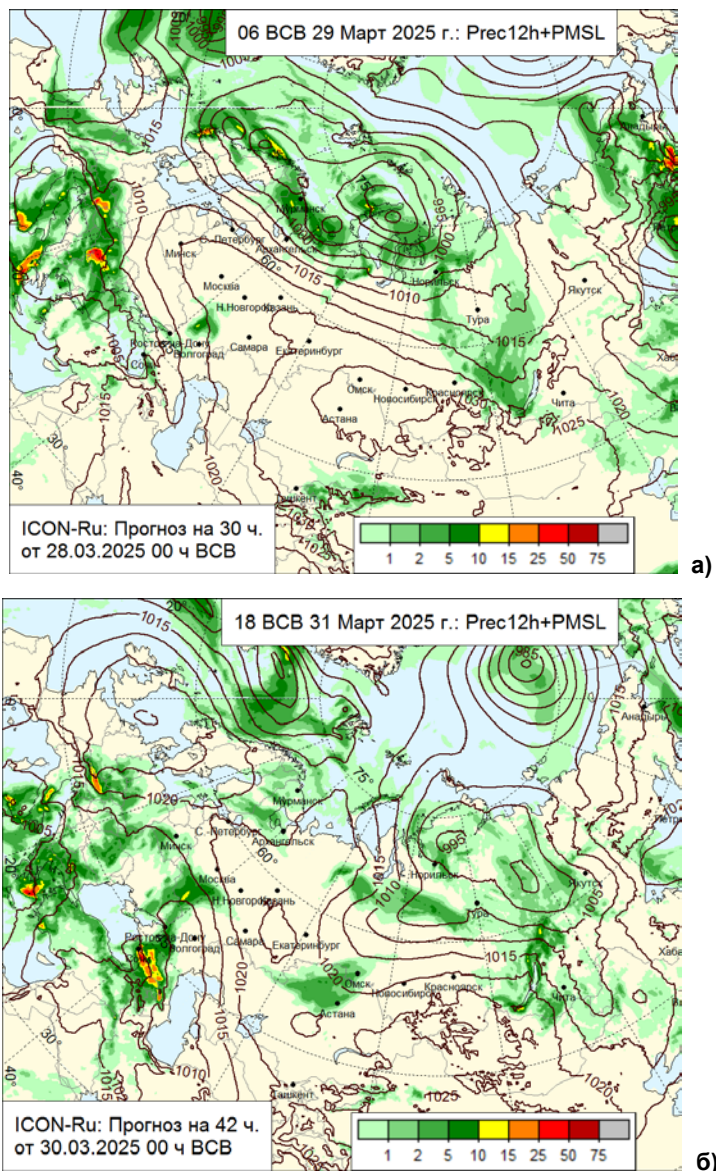


Рис. 3. Карты прогноза осадков и приземного давления ICON-Ru: 06 ч VCB 29 марта (а); 18 ч VCB 31 марта 2025 г. (б).

Fig. 3. Precipitation and surface pressure forecasts by ICON-Ru at a) 06 UTC March 29 (a); 18 UTC March 31, 2025 (б).

Качество прогнозов профилей температуры и ветра в АПС по обеим моделям COSMO-Ru и ICON-Ru в эпизоде НМУ оценивалось по данным измерений на Останкинской телебашне (ОТБ) и радиозонда в Долгопрудном в сроки 00 и 12 ч ВСВ. При анализе принималось во внимание, что модельные данные брались из узла модельной сетки в районе ВВЦ, а данные радиозонда – для удаленного Долгопрудного, поэтому сравнивать эти величины можно только на качественном уровне.

В целом, при сравнении модельных прогнозов и измерений в 4-суточном эпизоде оказалось, что температура воздуха конфигурациями систем COSMO-Ru и ICON-Ru была воспроизведена с большой точностью и, что очень важно для прогноза НМУ, модельные вертикальные градиенты температуры были близкими к реальным. Вместе с тем надо обратить внимание на некоторые детали сопоставлений модельных прогнозов и наблюдений, нашедшие отражение на рис 4.

Как видно (рис. 4а), в 00 ч 28 марта обе модели занижают температуру примерно на 1.5–2 °С. Возможно, это связано с недоучетом городского «острова тепла». По данным радиозондирования (РЗ) в Долгопрудном температура была ниже, чем по измерениям на ОТБ, кроме того, наблюдалась приподнятая инверсия на высоте около 250 м. По ICON-Ru в 00 ч значения температуры ближе к измеренным на ОТБ. По данным COSMO-Ru и ICON-Ru стратификация была более устойчивая, чем по радиозонду, но менее устойчивая, чем по ОТБ. Нужно отметить, что в 12 ч градиенты температуры по всем четырем видам данных практически совпадают. В отличие от нулевого срока, в 12 ч (рис. 4б) значения температуры ближе к измеренным на ОТБ по COSMO-Ru.

29 марта (рис. 4в) по данным ОТБ стратификация была устойчивая, инверсия наблюдалась на высоте 128 м. По данным обеих моделей и радиозонда высота инверсии составляла 200–300 м. COSMO-Ru дает значительно менее неустойчивую стратификацию (меньше вертикальный градиент) и почти на 2 °С завышает приземную температуру, значения ICON-Ru ближе к измеренным на ОТБ и станции ВВЦ. К 12 ч 29 марта (рис. 4г) воздух прогрелся до 12 °С, этот прогрев был хорошо воспроизведен ICON-Ru. Градиент температуры по данным ОТБ составлял 2.7 °С на 200 м, по модели ICON – 3 °С на 200 м, а по COSMO-Ru – 2 °С на 200 м. По данным радиозонда в Долгопрудном в этот срок было значительно теплее, чем в Москве.

Ночью 30 марта (рис. 4д) разница между температурой по данным ОТБ и моделями вновь достигла 2 °С, но при этом на станции ВВЦ в это время температура была на 0.5 °С выше температуры, прогнозируемой ICON-Ru. Вертикальный градиент температуры по ICON-Ru соответствует градиенту по данным ОТБ. К 12 ч 30 марта (рис. 4е) при интенсивном прогреве воздуха вертикальный градиент температуры со данным ОТБ и по обеим моделям составляет примерно 1–1,2 °С/100 м в нижнем 200-метровом слое, что близко к сухадиабатическому градиенту, и соответственно, приводит к усилению термического перемешивания. Важно отметить, что этот процесс был хорошо воспроизведен обеими моделями.

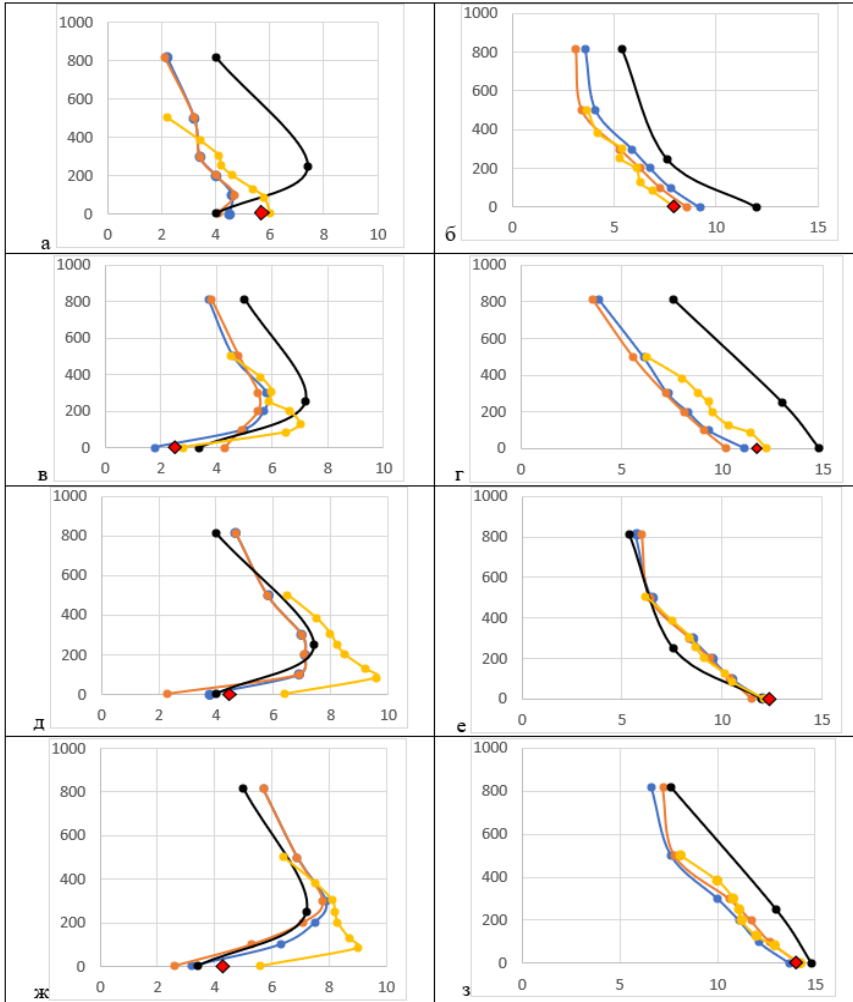


Рис. 4. Вертикальные профили температуры воздуха по прогнозам конфигураций ICON-Ru13/6N29 (синий) и COSMO-Ru6ENA (оранжевый), по наблюдениям на ОТБ (желтый), при радиозондировании в Долгопрудном (черный); красный ромб – температура на 2 м на метеостанции ВВЦ 28–31 марта 2025 г. (0 ч ВСВ – левый столбец, 12 ч ВСВ – правый столбец): 28.03 (а, б); 29.03 (в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

Fig. 4. Vertical profiles of air temperature according to forecasts of configurations ICON-Ru13/6N29 (blue) and COSMO-Ru6ENA (orange), according to observations at the Ostankino TV Tower (yellow), during radiosonde sounding in Dolgoprudny (black); red diamond - temperature at 2 m at the VVC weather station. March 28 – 31, 2025 (left column – 0 UTC, right column - 12 UTC). 28.03 (а, б); 29.03(в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

Ночью 31 марта (рис. 4ж) по данным ОТБ формируется сильная приземная инверсия с верхней границей на высоте 85 м, по модельным данным высота инверсии составляет 300 м. Как и в предыдущие сутки, по данным

ОТБ температура отличается в большую сторону по сравнению с данными ВВЦ. Обе системы в ночной срок занижают температуру, однако по ICON-Ru это занижение меньше. В 12 ч 30 и 31 марта обе модели прогнозируют практически полностью идентичные данным ОТБ значения температуры и ее вертикальных градиентов (рис. 4з).

Таким образом, в сроки 00 и 12 ч в рассматриваемом эпизоде обе модели удовлетворительно воспроизводили вертикальный градиент температуры. Для срока 12 ч выявлено очень хорошее согласие модельных данных и измеренных в приземном слое на ОТБ; в ночные часы прогностические значения приземной температуры были на 1.5–2 °С градуса ниже, чем измеренные на ОТБ, что, не исключено, содержит эффект влияния тела башни.

Были проведены сравнения прогнозов и измерений температуры в АПС и в другие сроки: 3, 6, 9, 15, 18 и 21 ч. Особое внимание уделено случаям, в которых модельные прогнозы заметно отличаются от данных измерений на ОТБ. Наиболее «проблемными» оказались прогнозы в сроки, близкие к восходу солнца и закату, – 6 и 18 ч ВСВ, проиллюстрированные на рис. 5. В конце марта по измерениям на ОТБ в 6 ч ВСВ еще сохраняется приземная инверсия (рис. 5а, в, д, ж), а по моделям уже начинается прогрев воздуха: повышается приземная температура, в результате чего в приземном слое формируется вертикальный профиль температуры, соответствующий сухой адиабате. Вечером в 18 ч ВСВ (рис. 5б, в, г, д) по модельным расчетам раньше, чем по наблюдениям, формируется приземная инверсия, и, возможно, модельное опережение перехода к термической устойчивости является отражением недоучета вклада сугубо городского тепла, удерживающего стратификацию температуры в состоянии от неустойчивой до нейтральной.

При анализе стратификации температуры в контексте ее влияния на рассеивание примесей важно рассмотреть воспроизведение моделью именно характеристик температурных инверсий, удерживающих примеси в приземном слое атмосферы. Примером модельных возможностей служат построенные для ночного срока в эпизоде НМУ прогностические поля НГИ – нижней границы температурной инверсии (рис. 6а) и $\Delta T_{\text{инв}}$ – интенсивности инверсионного слоя, определяемой как разность температуры на нижней и верхней границах инверсии (рис. 6б)

На рис. 6 представлены расчеты региональной конфигурации системы ICON-Ru для Центрального федерального округа с шагом сетки по горизонтали 6 км; на картах маркерами нанесены те же характеристики в пунктах аэрологического зондирования.

Можно отметить успешное воспроизведение моделью областей инверсий с различающейся нижней границей, согласующееся с данными аэрологического зондирования, а также воспроизведение неоднородности поля интенсивности инверсий с идентификацией областей слабой термической устойчивости, где $\Delta T_{\text{инв}}$ близка к нулю. Планируется провести количественные оценки воспроизведения слоев инверсий в модели.

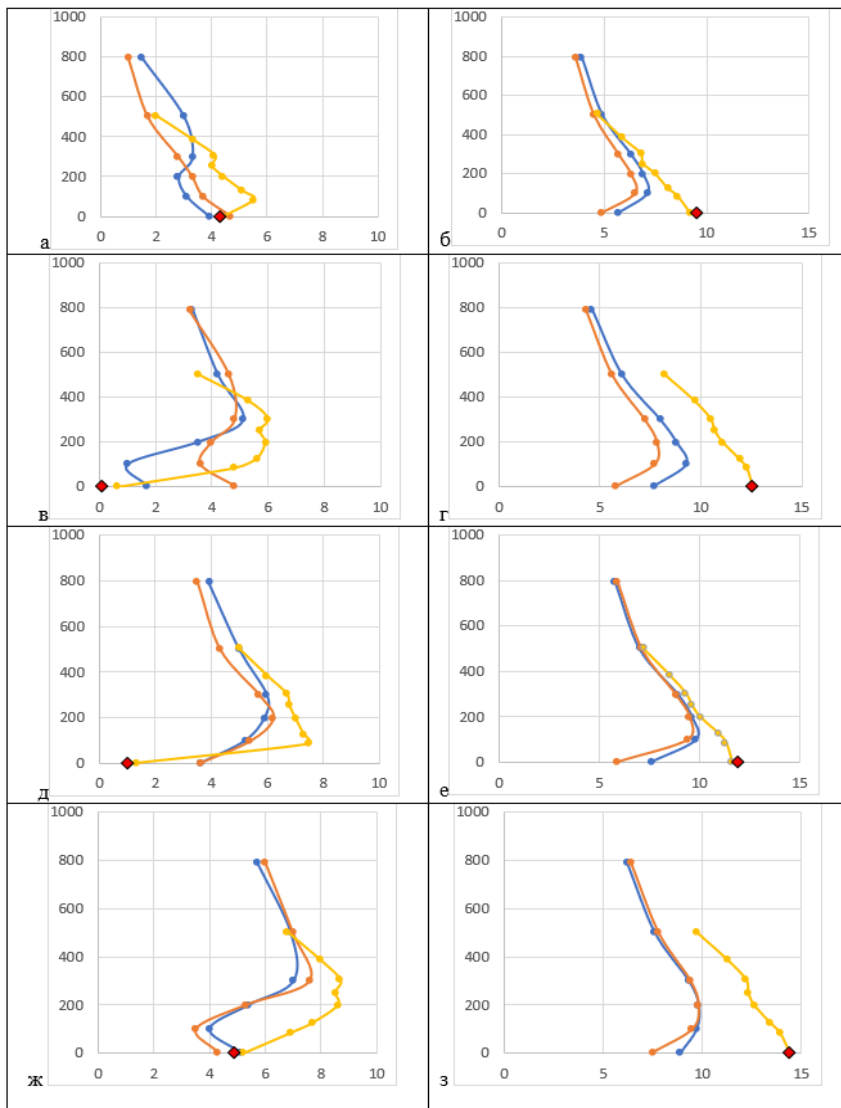


Рис. 5. Вертикальные профили температуры воздуха по данным ОТБ (желтый), ICON-Ru13/6N29 (синий) и COSMO-Ru6ENA (оранжевый); красный ромб – температура на 2 м на метеостанции ВВЦ 30–31 марта 2025 г. (6 ч ВСВ – левый столбец, 18 ч ВСВ – правый столбец): 28.03 (а, б); 29.03 (в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

Fig. 5. Vertical profiles of air temperature according to data from the Ostankino TV Tower (yellow), ICON-Ru13/6N29 (blue), COSMO-Ru6ENA (orange), and temperature at 2 meters at the VVC station - red diamond during the period March 30-31, 2025, at times 6 h and 18 h. 28.03 (а, б); 29.03 (в, г); 30.03 (д, е); 31.03 (ж, з).

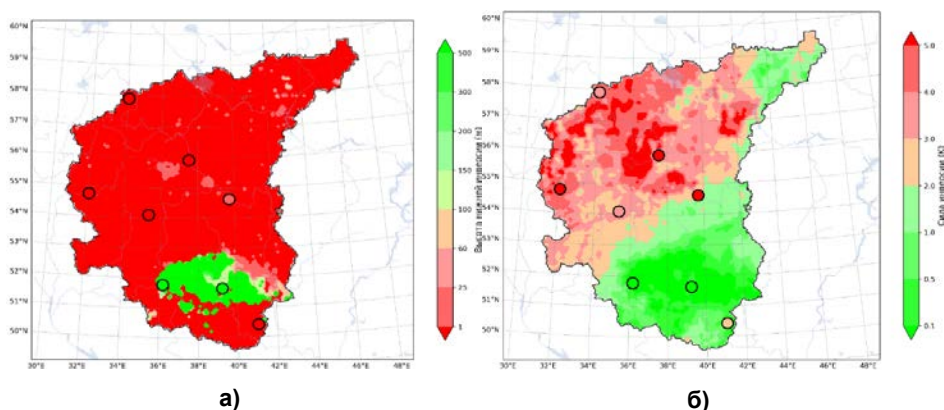


Рис. 6. Прогноз и измерения высоты нижней границы температурной инверсии, м (а) и интенсивности инверсии, К (б) конфигурации ICON-Ru на 00 ч ВСВ 29.03.2025.

Fig. 6. Forecast and measurements of the height of the lower boundary of the temperature inversion, m (a) and inversion intensity, K (б) for the ICON-Ru configuration at 00 UTC March 29, 2025.

Установленные особенности модельных расчетов температурной стратификации имеют практическую значимость для их интерпретации и пост-процессинга при прогнозировании НМУ.

2.3. Связь прогностического МПРЗ с концентрациями CO, NO и NO₂ в эпизоде НМУ 28–31 марта 2025 года

Изучению связей метеорологических условий с загрязнением воздуха посвящено много зарубежных и отечественных публикаций, список работ продолжает активно пополняться результатами региональных исследований. Во многих работах описываются связи загрязнений с отдельными или несколькими метеорологическими характеристиками – скоростью ветра, давлением, относительной влажностью, осадками, высотой геопотенциала и т. п. [1, 10, 12–14]. Реже, чем с наземными характеристиками, изучаются связи загрязнения с вертикальными метеорологическими параметрами. В частности, в [2], подтверждая результаты других авторов, отмечается значимое влияние температурной стратификации в пограничном слое, что созвучно нашим исследованиям.

Остается актуальной типизация крупномасштабной циркуляции как фактора загрязнения, в частности, установление определенного типа погоды в эпизодах сильного загрязнения [9, 12]. Разработанный в Гидрометцентре России показатель МПРЗ основан на учете воздействия конвективного перемешивания, турбулентного переноса при сдвигах ветра в АПС, удаления примеси осадками и предназначен для оценки предпосылок повышения уровня загрязнения приземного воздуха [2, 6]. МПРЗ разделяет полный диапазон атмосферных условий на три типа рассеивания: слабое –

1 тип, умеренное – 2 тип и интенсивное – 3 тип (соответственно, МПРЗ-1, МПРЗ-2, МПРЗ-3) [6]. Для верификации МПРЗ ранее нами были использованы данные о загрязнении приземного воздуха по измерениям на АСКЗА Мосэкомониторинг [3]; ниже обсуждаются результаты сравнений МПРЗ с измерениями концентраций на Останкинской телебашне на уровнях 0, 248 и 348 м (сайт) в эпизоде 28–31 марта 2025 года.

Как видно на рис. 7, где индикатором загрязнения является диоксид азота (NO_2), загрязнение с высотой в основном уменьшается: концентрация NO_2 на высоте 248 м примерно в 1.5 раза меньше, на высоте 348 м в 2–2.5 раза меньше, чем на нижнем уровне. При этом в ночные часы при МПРЗ-1 и МПРЗ-2 временами наблюдается специфическое нелинейное изменение с высотой концентрации NO_2 : при стабильности наибольшего загрязнения приземного слоя сближение концентрации в слое 248–348 м, а в отдельные часы и более высокие концентрации NO_2 на верхнем уровне (348 м), что обеспечивается переносом загрязнений благодаря турбулентному перемешиванию при термической устойчивости. При МПРЗ-3 в дневные часы (29, 30 и 31 марта) при интенсивном конвективном перемешивании наблюдается уменьшение загрязнения всего нижнего 350-метрового слоя.

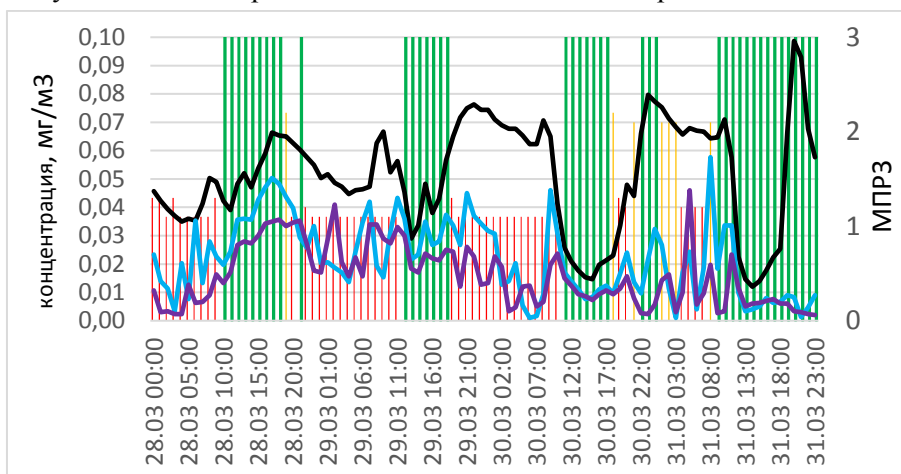


Рис. 7. Концентрация NO_2 (mg/m^3) по измерениям на ОТБ на уровне 0 м (черный), 248 м (голубой), 348 м (фиолетовый) и прогностические величины МПРЗ (столбцы гистограммы): красный МПРЗ-1, желтый МПРЗ-2, зеленый МПРЗ-3. 28–31 марта 2025 г.

Fig. 7. Concentration of NO_2 (mg/m^3) according to measurements at the Ostankino TV Tower at level 0 m (black), 248 m (light blue), 348 m (purple), and prognostic values of MIPD (histogram bars): red MIPD-1, yellow MIPD-2, green MIPD-3. March 28–31, 2025.

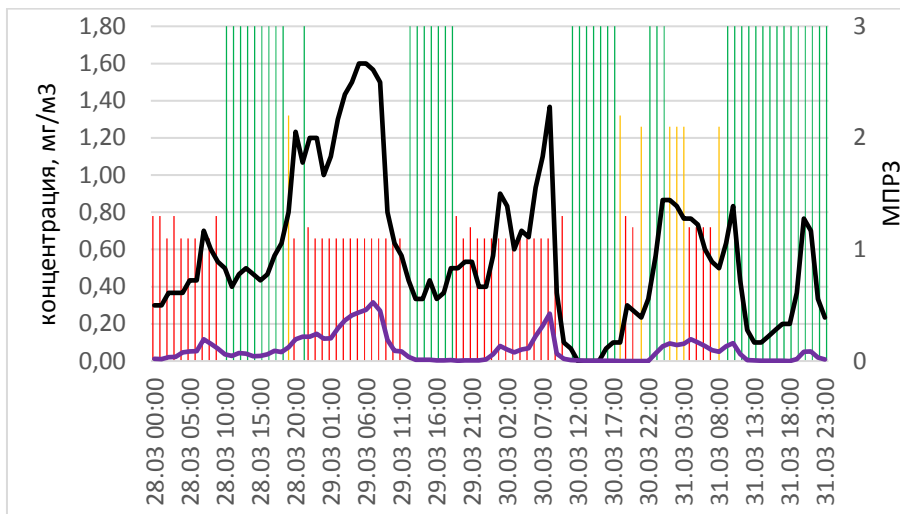
Отдельно заметим, что в эпизоде при МПРЗ-3 было два периода роста концентраций NO_2 . Первый (28.03) связан с редким явлением – возвратом прошедшей над Москвой воздушной массой. Ночью и рано утром прошли дожди, днем 28.03 северо-западный перенос сменился на юго-восточный,

в уже насыщенном городскими примесями воздухе и после обычного утреннего пика загрязнение продолжало увеличиваться. Аномальный рост был зафиксирован на многих АСКЗА, в частности на АСКЗА Лосиный остров, где концентрация к вечеру превысила обычный фон в 2 раза (рис. 9а). Второй период роста концентраций NO_2 при МПРЗ-3 имел место вечером 31.03 при умеренном юго-восточном переносе в отсутствие инверсии (рис. 5з). Этот случай повсеместного кратковременного всплеска загрязнения (с 18 до 21 ч), возможно, связан со специфическими процессами мезомасштабного переноса вторичных загрязнений и нуждается в детальном анализе. При этом следует принять во внимание, что оба аномальных «периода» роста NO_2 совпали с вечерним пиком трафика в пятницу и в понедельник, высокая вариабельность нагрузки в которых может существенно повлиять на рост концентраций.

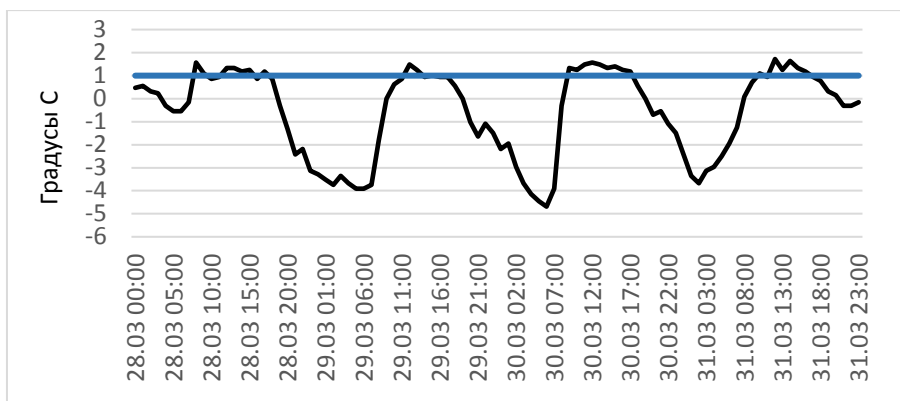
Представленный на рис. 8а временной ход концентрации оксидов азота и углерода (NO , CO) по измерениям на нижнем уровне ОТБ подтверждает описанные выше основные закономерности: наибольшие концентрации NO и CO наблюдаются при МПРЗ-1 и МПРЗ-2, а пиковых значений уровни загрязнения достигают в часы вечернего и утреннего максимума транспортной нагрузки (рис. 8а), что совпадает с приведенными в [7] данными.

Следует отметить, что при МПРЗ-1 и МПРЗ-2 процесс обычного вечернего повышения загрязнения до максимума занимает от 3 до 5 часов. В утренние часы при появлении МПРЗ-3 происходит быстрое снижение уровня загрязнения вследствие нарастающей с восходом солнца толщины слоя конвективного перемешивания. И только указанными в разделе 2.1 особенностями модельного прогноза стратификации, а именно, задержкой утром перехода к термической неустойчивости, можно объяснить резкое падение концентраций утром при «ложном» прогнозе МПРЗ-1 и МПРЗ-2 (рис. 8а). Поскольку по данным о температуре на ОТБ уже около 9 ч инверсия в приземном слое разрушалась (рис. 8б), что, по-видимому, служило началом процессов очищения даже при градиенте температуры меньше сухоадиабатического. Следует подчеркнуть, что ночное 3–5-кратное превышение фоновых уровней NO и CO наблюдалось при сохранявшихся не менее 12 часов приземных инверсиях, при максимальном развитии которых вертикальный градиент достигал 5–6 °C/100 м. В целом в рассматриваемом эпизоде температурный градиент в приземном слое хорошо согласуется как с МПД для верификации МПРЗ, кроме наблюдений на ОТБ, использованы данные о загрязнении на близко расположенных к Останкинской телебашне трех АСКЗА (Полярная, Глебовская и Лосиный остров). Представленные на рис. 9 МПРЗ и концентрации NO_2 , NO , CO на АСКЗА при и имеющих место локальных особенностях демонстрируют в целом удовлетворительное согласие колебаний уровней загрязнения с типом МПРЗ. В частности, наблюдается достаточно выраженная синхронизация (с временным лагом 1–2 часа) роста загрязнений на всех АСКЗА при наступлении НМУ в вечерние часы, характерное общее понижение ночного уровня при слабом рассеивании, а также формирование на всех АСКЗА утреннего

максимума при МПРЗ-1, МПРЗ-2, по сравнению с вечерним менее продолжительного из-за перехода АПС в состояние термической неустойчивости РЗ, так и с концентрациями рассмотренных загрязняющих веществ.



а)

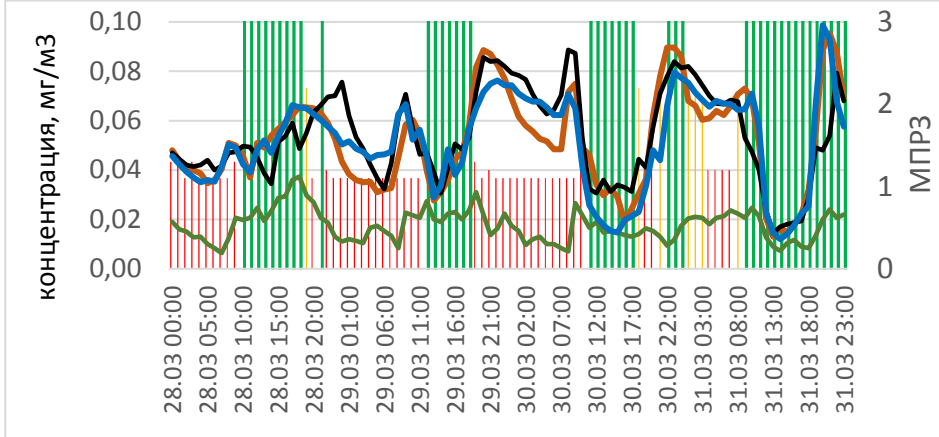


б)

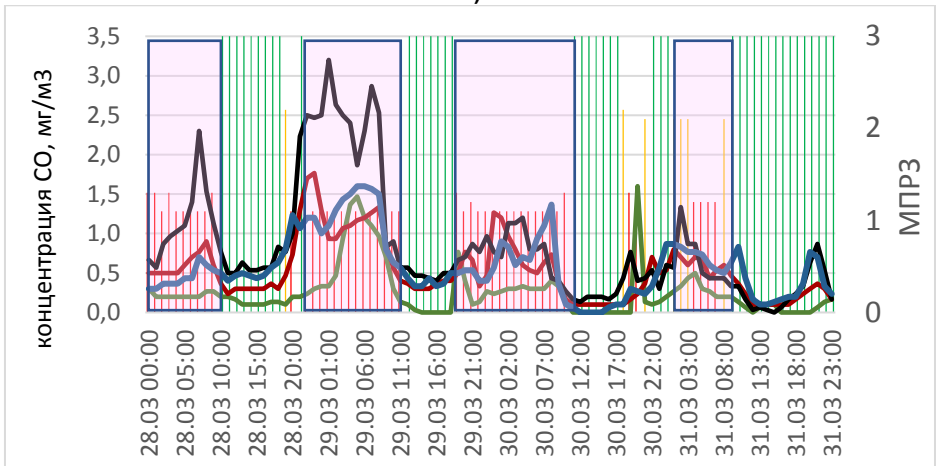
Рис. 8. Приземная концентрация NO (сиреневый), CO (черный), мг/м³, по измерениям на ОТБ и прогностические величины МПРЗ (столбцы гистограммы): красный МПРЗ-1, желтый МПРЗ-2, зеленый МПРЗ-3 (а); временной ход градиента температуры в приземном слое (°С/100 м) по измерениям на ОТБ – черная линия, синяя линия – сухоадиабатический градиент (б). 28-31 марта 2025 г.

Fig. 8. Surface concentration of NO (purple), CO (black), mg/m³, according to measurements at the Ostankino TV Tower and forecast values of MIPD (histogram bars): red MIPD-1, yellow MIPD-2, green MIPD-3 (a), time course of temperature gradient in the surface layer (°C/100 m) according to measurements at the Ostankino TV Tower - black line, blue line - dry adiabatic gradient (б). March 28-31, 2025.

Нельзя не отметить того, что содержание первичных загрязнений (NO , CO) достигало наибольших значений при МПРЗ-1, МПРЗ-2 уже в начале эпизода НМУ, а наиболее высокое загрязнение NO_2 наблюдалось на 2–3 сутки (рис. 9).



а)



б)

Рис. 9. Приземная концентрация NO_2 (а), CO (б), mg/m^3 , на АСКЗА Глебовская (бордовая линия), Полярная (черная линия), Лосиный остров (зеленая линия) и на ОТБ (синяя линия). Окна с розовой заливкой – прогноз МПРЗ-1 или МПРЗ-2. 28–31 марта 2025 г.

Рис. 9. Surface concentration of NO_2 (а), CO (б), mg/m^3 , according to measurements at the Glebovskaya (burgundy line), Polyarnaya (black line), Losinyy ostrov (green line) and at the Ostankino TV Tower (blue line). Windows with pink fill – prognostic values of MIPD-1 or MIPD-2. March 28–31, 2025.

Это может служить иллюстрацией того, что при длительных НМУ активизируются процессы образования вторичных загрязнений, более токсичных по сравнению с первичными выбросами, что и зафиксировано в условиях малооблачной сухой аномально теплой для конца марта погоды (в Москве температура повышалась до +14–16 °С. Заслуживает отдельного внимания тот факт, что вечером 31 марта отмеченный выше аномальный пиковый всплеск NO₂ по данным измерений первичных загрязнений NO, CO не наблюдался.

Заключение

В Гидрометцентре России ежедневно рассчитывается показатель МПРЗ, который позволяет делать выводы об условиях рассеяния примесей в течение текущих и следующих суток. Для расчета МПРЗ в последние годы использовались прогностические данные системы COSMO-Ru, а в связи с переходом на прогностические данные системы ICON-Ru выполнены предварительные оценки качества прогнозов конфигураций с шагом сетки по горизонтали 6 км (COSMO-Ru6ENA и ICON-Ru13/6N29) за 6 месяцев 2025 года. Используя пакет верификации METplus, проведены сравнения прогностических величин температуры, скорости ветра на изобарических поверхностях 1000, 925 и 850 гПа в пунктах радиозондирования на ЕТР. ICON-Ru показала преимущество над предыдущей моделью по качеству прогнозов большинства метеопараметров, можно отметить главные выводы:

– в большинстве случаев прогнозы температуры на 1000 и 925 гПа по ICON-Ru оказались более успешными, чем по COSMO-Ru;

– общей закономерностью является уменьшение MAE прогноза температуры на уровне 925 гПа по сравнению с уровнем 1000 гПа, при этом MAE растет по мере увеличения заблаговременности прогноза;

– оценки скорости ветра менее однозначные: в январе и в феврале в большинстве случаев прогнозы скорости ветра на уровне 1000 гПа оказались более успешными по COSMO-Ru, далее с каждым месяцем прогнозы по ICON-Ru улучшались, в мае и июне ошибки прогнозов ICON-Ru меньше, чем по COSMO-Ru.

Важным этапом исследований было сравнение прогнозируемых системами COSMO-Ru и ICON-Ru метеопараметров на вертикальных уровнях, для чего были привлечены данные радиозондов и наблюдений на Останкинской телебашне. Полученные результаты указывают на то, что прогнозы вертикальных профилей температуры ICON-Ru в большинстве случаев ближе к измеренным характеристикам, чем расчеты по COSMO-Ru.

Яркий эпизод НМУ 28–31 марта и повышенного загрязнения в Москве использован для верификации прогнозов МПРЗ по данным ICON-Ru с применением данных измерений концентраций загрязняющих веществ на трех высотных уровнях ОТБ и наземных измерений (CO, NO и NO₂) на близко расположенных к ОТБ станциях.

Изучены особенности временной динамики отдельных загрязнений при разных типах МПРЗ, подтверждена связь МПРЗ-1 типа (слабое рассеивание) с повышением концентраций загрязняющих веществ на станциях городского типа. В целом прогноз МПРЗ в период НМУ, рассчитанный по прогнозам параметров ICON-Ru, вполне успешно описывал воздействие крупномасштабных атмосферных процессов и локальных метеорологических условий на загрязнение приземного воздуха, что указывает на обоснованность и целесообразность оперативного использования данных модели ICON-Ru для прогноза МПРЗ.

Список литературы

1. Васильев Д.Ю., Вельмовский П.В., Семенов В.А., Семенова Г.Н., Чибилев А.А. Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе Уфе // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 1. С. 49-58. DOI: 10.15372/AOO20230107
2. 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.
3. Кирсанов А.А., Тарасова М.А., Бундель А.Ю., Астахова Е.Д., Шувалова Ю.О., Розинкина И.А., Блинов Д.В. Многофакторная верификация результатов численных прогнозов погоды оперативной системы COSMO-Ru и отдельных компонент развиваемой COSMO-Ru/icon // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 126-141.
4. Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Борисов Д.В. Методы прогнозирования метеорологических условий, влияющих на загрязнение приземного воздуха // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 87-103. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-8-87-103
5. Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И. Прогнозирование метеорологического показателя рассеивания загрязняющих веществ в приземном воздухе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 131-149.
6. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б. и др. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеоусловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского региона // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5-19. DOI: 10.3103/s1068373920070018
7. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Базров А.Н., Блинов Д.В. и др. Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов и γ-мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 6-34. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>
8. Ткачева Ю.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 3 (385). С. 161-177.
9. Brown B., Jensen T., Gotway J.H. et al. The Model Evaluation Tools (MET): More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification // Bulletin of the American Meteorological Society. 2021. Vol. 102, no. 4. P. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1
10. Ziyue Chen Danlu, Chuanfeng Meipo et al. Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism // Environ Int. 2020. Vol. 109. P. 105558. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105558
11. Pérez I.A., García M.Á., Sánchez M.L., Pardo N. et al. Points in Air Pollution Meteorology // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17. P. 8349. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>.
12. Nakyai T., Santasnachok M., Thetkathuek A., Phatrabuddha N. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand // Environmental Advances. 2025. Vol. 19. P. 100608.
13. Vasil'ev D.Y., Yelizariyev A.N., Kucherova D.S. et al. An analysis of meteorological conditions and concentrations of atmospheric impurities in the city of Ufa // Russ. Phys. J. 2025. Vol. 68. P. 1005-1009. <https://doi.org/10.1007/s11182-025-03528-7>

14. Zhang T., Zhang R., Zhong J., Shen X. *al.* Classification and estimation of unfavourable boundary-layer meteorological conditions in Beijing for pm_{2.5} concentration changes using vertical meteorological profiles// *Atm. Res.* 2023. 15 September 2023.

References

1. Vasilev D.Yu., Velmovsky P.V., Semenov V.A., Semenova G.N., Chibilev A.A. The influence of meteorological conditions on the level of atmospheric air pollution in Ufa. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2023, vol. 36, no. 3, pp. 234-243. DOI: 10.1134/S1024856023030211

2. 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. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2022, vol. 58, no. 1, pp. 92-108. DOI: 10.1134/S0001433822010029

3. Kirsanov A.A., Tarasova M.A., Bundel' A.Yu., Astakhova E.D., Shuvalova Yu.O., Rozinkina I.A., Blinov D.V. Multipurpose verification of the COSMO-Ru operational system and experimental technologies based on the ICON model. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2024, vol. 49, no. 8, pp. 750-761. DOI: 10.3103/S1068373924080041.

4. Kuznetsova I.N., Tkacheva Yu.V., Borisov D.V. Methods for Forecasting Meteorological Conditions Affecting Surface Air Pollution. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2024, vol. 49, no. 8, pp. 722-734. DOI: 3103/S1068373924080077

5. Kuznetsova I.N., Tkacheva Yu.V., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I. Forecasting a meteorological indicator of pollutant dispersion in surface air. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting].* 2021, vol. 381, no. 3, pp. 131-149 [in Russ.].

6. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Kiktev D.B. *et al.* Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region. *Russian Meteorology and Hydrology.* 2020, vol. 45, no. 7, pp. 455-465.

7. Rozinkina I. A., Rivin G. S., Bagrov A.N., Blinov D.V. *et al.* The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of β - and γ -mesoscale processes *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting].* 2023, vol. 388, no. 2, pp. 6-34 [in Russ.].

8. Tkacheva Yu.V., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Improved technology for forecasting meteorological parameters and conditions affecting air pollution. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting].* 2022, vol. 385, no. 3, pp. 161-177 [in Russ.].

9. Brown B., Jensen T., Gotway J.H. *et al.* The Model Evaluation Tools (MET): More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2021, vol. 102, no. 4, pp. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1

10. Ziyue Chen Danlu, Chuanfeng Meipo *et al.* Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism. *Environ Int.* 2020, vol. 109, pp. 105558. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105558

11. Pérez I.A., García M.Á., Sánchez M.L., Pardo N. *et al.* Points in Air Pollution Meteorology. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020, vol. 17, pp. 8349. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>

12. Nakyai T., Santasnachok M., Thetkathuek A., Phatrabuddha N. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand. *Environmental Advances.* 2025, vol. 19, pp. 100608.

13. Vasil'ev D.Y., Yelizariyev A.N., Kucherova D.S. *et al.* An analysis of meteorological conditions and concentrations of atmospheric impurities in the city of Ufa. *Russ. Phys. J.* 2025, vol. 68, pp. 1005-1009. <https://doi.org/10.1007/s11182-025-03528-7>

14. Zhang T., Zhang R., Zhong J., Shen X. *al.* Classification and estimation of unfavourable boundary-layer meteorological conditions in Beijing for pm_{2.5} concentration changes using vertical meteorological profiles. *Atm. Res.* 2023, 15 September 2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-74-93>

УДК 551.578.462

Тестирование новой модели снежного покрова SnowDraw для климатического прогноза оледенения Эльбруса

Е.Д. Дроздов^{1,2}, П.А. Торопов^{1,2,3}

¹*Институт географии Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

²*Московский государственный университет*

имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

³*Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Россия*
e.drozдов@igras.ru

Для условий горного ледника Эльбруса протестирована новая специализированная модель снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw, направленная на климатический прогноз динамики ледников и речного стока в горных районах. Верификация модели на данных прямых наблюдений на леднике показала высокое качество воспроизведения сезонной динамики и водозапаса снежного покрова. Сравнение результатов представленной модели с другими доступными моделями различного уровня сложности (NoahMP, SNOWPACK) показало, что она является вычислительно эффективным и качественным инструментом для прогноза динамики снежного покрова и оледенения в горах. Использование представленной модели в качестве блока параметризации горного оледенения IGRICE позволило получить оценки многолетнего распределения снежного покрова и величины снеговой компоненты стока для оледенения Эльбруса.

Ключевые слова: численное моделирование, данные наблюдений, снежный покров, верификация, Эльбрус, ледник Гарабаши, модель IGRICE

Testing a new specialized SnowDraw snow cover model for climate forecasting of Elbrus glaciation dynamics

E.D. Drozdov^{1,2}, P.A. Toropov^{1,2,3}

¹*Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

³*Water problems institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
e.drozдов@igras.ru

A new specialized SnowDraw snow cover model of intermediate complexity aimed at climate forecasting of glacier dynamics and river runoff in mountainous regions was tested for the Elbrus mountain glacier. The model verification versus direct observation data from the mountain glacier demonstrated a high-quality reproduction of the seasonal dynamics and water content of the snow cover. A comparison of results of the presented model with other available models of different complexity (NoahMP, SNOWPACK) demonstrated that it is a computationally efficient and high-quality tool for forecasting snowpack dynamics and glaciation in the mountains. Using the presented model as the IGRICE parameterization module for mountain glaciation allowed obtaining estimates of a long-term snow cover distribution and a snow component of runoff for the Elbrus glaciation.

Keywords: numerical modeling, observations, snow cover, verification, Elbrus, Garabashi glacier, IGRICE model

Введение

В условиях глобального потепления климата наблюдается существенная скорость сокращения площади и объема горных ледников в среднем на 0.5–1 % ежегодно [17]. Интенсивное отступление горных ледников и изменение количества снега в горах приводит к значительной перестройке водного режима рек [19], изменению доли ледникового и снегового питания [4, 20], а также вносит вклад в повышение уровня Мирового океана. На региональном масштабе подобные изменения приводят к изменению природных экосистем в горах [10] и существенно сказываются на сельском хозяйстве, строительстве, рекреационной сфере и благосостоянии населения горных и предгорных районов.

Основным инструментом современного климатического прогноза таких изменений являются модели Земной системы. Отечественная модель Земной системы ИВМ РАН – МГУ [1] продолжает развиваться, в частности, в направлении описания компонент деятельного слоя суши. Для модельных ячеек, попадающих на горные территории, это подразумевает развитие параметризаций горного оледенения, которые, в свою очередь, невозможны без специализированных моделей снежного покрова, который определяет энего- и массообмен ледника с атмосферой. В качестве такой параметризации горного оледенения предполагается использование глобальной гляциологической модели IGRICE [7], описывающей не только динамику ледника, но и снежного покрова на его поверхности.

В то же время для высокогорных районов существует набор специфических факторов, влияющих на формирование и динамику снежного покрова и требующих особого учета при его моделировании. Так, за счет высоких скоростей ветра существенное влияние на энергетический баланс и баланс массы снега оказывают процессы интенсивного метелевого переноса, ветрового уплотнения и сублимации снежных кристаллов [2, 21]. Ориентация и крутизна макросклонов приводят к изменению потока приходящей солнечной радиации и суммы осадков, с высотой изменяется и общее количество суммарной радиации и длинноволнового потока из атмосферы, что кардинальным образом определяет динамику снежного покрова. При этом в модели ИВМ РАН – МГУ применяется упрощенная схема расчета снежного покрова [15], слабо учитывающая специфические факторы формирования снежного покрова на горных ледниках.

В настоящее время известно множество различных моделей снежного покрова [18] различной комплексности. Однако некоторые из них являются вычислительно затратными и крайне требовательными к качеству входных данных, что делает их неприменимыми для задач прогноза климата. Другие модели пренебрегают многими эффектами, оказывающими влияние на снежный покров ледников, и направлены на описание снежного покрова равнинных территорий на крупном масштабе. К большинству моделей подходящей комплексности мы не имеем доступа. Прочие параметризации снежного покрова являются блоками моделей деятельного

слоя суши, что требует отделения снежного блока и существенной его переработки для применения в качестве блока параметризации горного оледенения, что, по сути, равноценно созданию новой модели.

Поэтому в рамках исследования была поставлена цель по созданию новой специализированной модели снежного покрова с включением описания специфических факторов на горных ледниках, которая сочетала бы в себе вычислительную эффективность и физическую обоснованность расчета характеристик снежного покрова и могла быть использована в качестве модуля глобальной гляциологической модели IGRICE [7]. В данной работе рассматриваются первые результаты применения разработанной модели на примере оледенения Эльбруса. В дальнейшем подходы, реализованные в данной модели, могут быть использованы в развитых отечественных моделях снежного покрова и в качестве блока модели деятельного слоя суши TerM [23].

Материалы и методы

Район исследований и данные наблюдений

Эльбрус является крупнейшим очагом оледенения в России, занимая около 20 % всего оледенения Кавказа по площади и объему [5]. Основные гляцио-климатические исследования на Эльбрусе проводятся на его южном склоне на опорном леднике Гарабаши (рис. 1а), что обусловлено его логистическим удобством и наличием рядов ежегодных наблюдений за балансом массы. Во время экспедиционной компании в августе 2024 г. в зоне абляции ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса на высоте 3970 м над у. м. был установлен современный автономный метеорологический комплекс (рис. 1б), направленный на постоянный мониторинг метеорологических условий на поверхности горного оледенения Эльбруса.

Монтаж металлических ферм проводился на скальных выступах таким образом, чтобы измерение радиационных компонент проводилось над снежно-ледовой поверхностью. На установленной ферме на высоте около 3 м над ледовой поверхностью проводятся измерения температуры и влажности воздуха, скорости ветра; на высоте около 2 м измеряются все компоненты радиационного баланса, а также слой накопления и стаивания снега и льда акустическим дальномером; также на высотах 2 и 3 м над поверхностью установлены два акустических метелемера, позволяющие оценить интенсивность метелевого переноса. Также вблизи АМС в снежно-фирновую толщу до глубины 2 м были забурены термокосы с шагом измерений 10 и 20 см.

Временная дискретность метеорологических измерений – 1 минута, слоя стаивания и температуры в снежно-ледовой толще – 1 час. Кроме того, рядом с метеорологической станцией в январе 2024 и 2025 гг., а также в июне 2025 г. проводились шурфования снежного покрова, что позволило получить данные о его плотности, водном эквиваленте и высоте. Более

подробно приборная база и некоторые результаты измерений на ледниках Эльбруса описаны в работах [3, 8].

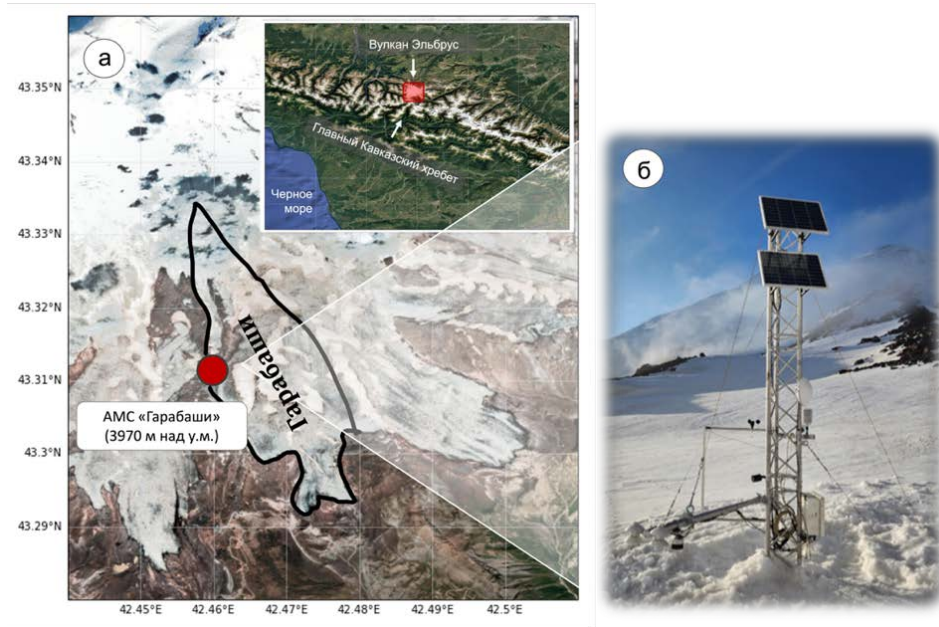


Рис. 1. Схема расположения района исследований и метеорологической станции (красный пунсон) на леднике Гарабаша на южном склоне Эльбруса (а), в качестве подложки использованы космические снимки с ресурса Google Earth; измерительный комплекс в зоне абляции ледника Гарабаша (б).

Fig. 1. Layout of the study area and meteorological station (red punch) on the Garabashi glacier on the southern slope of the Elbrus Mountain (а), with satellite images from Google Earth used as a background; the measuring complex in the ablation zone of the Garabashi glacier (б).

Комплекс практически бесперебойно функционирует более года, что делает эти наблюдения уникальными для района Большого Кавказа. Полученные данные прямых наблюдений не только дают представление о климатических параметрах на поверхности горного оледенения, но и служат для верификации реанализов и моделей снежного покрова. На данный момент доступны и использованы в исследовании данные за 10 месяцев: с августа 2024 по июнь 2025 года.

Описание модели снежного покрова SnowDraw

Разработанная модель снежного покрова может быть отнесена к классу схем промежуточной сложности. Она в явном виде описывает основные физические процессы, происходящие в снежном покрове, однако многие из них, например, такие как диффузия водяного пара вглубь

снежного покрова и образование отдельных ледяных прослоев, не рассматриваются. Многие из процессов параметризованы, а для вычисления радиационных и теплофизических характеристик снега используются эмпирические и упрощенные зависимости. При этом модель является многоуровневой, поскольку уравнения переноса тепла и влаги внутри снежного покрова разрешаются на равномерной пространственной сетке с фиксированным количеством уровней. В качестве входных данных модели на каждом шаге по времени необходимы сведения о температуре воздуха (К), атмосферном давлении (гПа), интенсивности выпадающих осадков (мм/ч), скорости (м/с) и направлении ветра (град.), относительной влажности воздуха (%), суммарной коротковолновой радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и длинноволновом излучении атмосферы ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Также в качестве начальных условий могут задаваться профили температуры и плотности снега.

Особое внимание в модели уделяется бюджету потоков тепла на поверхности. В условиях горного оледенения затраты тепла на сублимацию кристаллов в метели $L_s S_z$ становятся существенной компонентой теплового баланса. Поэтому уравнение теплового баланса для поверхности снега на горном леднике может быть записано в следующем виде:

$$c \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \alpha)Q + E_a - \varepsilon \sigma_{SB} T_s^4 - L_i E - H_s - L_i S_z + B, \quad (1)$$

где Q – суммарная коротковолновая радиация ($\text{Вт}/\text{м}^2$); α – альbedo снежного покрова; E_a – встречное излучение атмосферы ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $\varepsilon \sigma_{SB} T_s^4$ – собственное излучение поверхности ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $L_i E$ – турбулентный поток скрытого тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); H_s – турбулентный поток явного тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); B – поток тепла в снег ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $\sigma_{SB} = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Дж/($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K}^4$) – постоянная Стеффана – Больцмана; c – теплоемкость снега (Дж/кг·К). Уравнение (1) является нелинейным относительно температуры поверхности T_s , поэтому для его решения используется итерационный метод хорд. Найденное значение температуры поверхности используется в качестве верхнего граничного условия для одномерного уравнения теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z) + L_i M(z), \quad (2)$$

где ρ – плотность снега ($\text{кг}/\text{м}^3$); λ – коэффициент теплопроводности снега ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$). В качестве дополнительных источников тепла учитывается проникновение в снег солнечной радиации $Q(z)$ и фазовые переходы лед – вода внутри снежного покрова $L_i M(z)$. Для решения уравнения (2) используется неявная схема, что позволяет использовать пространственно-временную сетку с любым шагом. В данном исследовании использовалась версия с 6 уровнями по вертикали и шагом по времени 1 или 3 часа.

Изменение во времени количества водного эквивалента снежного покрова WE (м) происходит в зависимости от количества выпадающих осадков P (м за шаг по времени), скорости испарения E (м), метелевой

сублимации S_z (м) и слоя таяния M (м), что выражается в виде уравнения водного баланса снежного покрова:

$$\frac{\partial WE}{\partial t} = P - E - S_z - M. \quad (3)$$

Отдельно стоит выделить особенности разработанной модели, которые делают ее применимой для условий горного ледника и отличают от большинства прочих моделей снежного покрова.

Сублимация кристаллов льда при метелях является одной из важных составляющих теплового баланса и баланса массы снежного покрова на леднике [2]. Поэтому в модель SnowDraw был включен физически полный численный алгоритм расчета скорости сублимации кристаллов льда при метелях [13]. Скорость сублимации в метели рассчитывается следующим образом:

$$S_z = -\sum_r M_r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{n_r}{4\pi r^2 \rho_p} \left(\frac{\partial m}{\partial t} \right)_r \right], \quad (4)$$

где для каждого заданного радиуса метелевых частиц r (м) с учетом их общей массы M_r (кг) и количества n_r вычисляется скорость изменения массы отдельной частицы за счет сублимации $\partial m / \partial t$ (кг/с) в зависимости от дефицита влажности над снежной поверхностью, а также параметров турбулентности атмосферы. Полностью алгоритм описан в работе [2].

Для определения альbedo снежного покрова используется параметризация интегрального альbedo, разработанная для модели снежного покрова SPONSOR и подробно описанная в работе [9]. Её преимуществом является учет большинства физических процессов, влияющих на альbedo снежного покрова, выраженных простыми зависимостями. Альbedo снежного покрова в схеме вычисляется по следующей формуле:

$$\alpha_{sn} = \max(\alpha_{melt}, \alpha_{new} - S_{alb}). \quad (5)$$

Здесь $\alpha_{melt} = 0.3$ – минимально возможное альbedo сплошного снежного покрова; S_{alb} – это сумма различных факторов в изменение альbedo:

$$S_{alb} = \Delta\alpha_{den} + \Delta\alpha_{temp} + \Delta\alpha_{old} + \Delta\alpha_{gr} + d_{pol} - \Delta\alpha_{sol}, \quad (6)$$

где $\Delta\alpha_{den}$ отвечает за изменения альbedo в зависимости от возраста и плотности верхнего слоя снега; $\Delta\alpha_{temp}$ – от температурного и радиационного метаморфизма снега; $\Delta\alpha_{old}$ и d_{pol} – за счет старения снега и фонового загрязнения; $\Delta\alpha_{gr}$ – за счет влияния альbedo подстилающей поверхности; $\Delta\alpha_{sol}$ – учитывает увеличение альbedo при небольшой высоте Солнца.

Важным процессом динамики снежного покрова является изменение его плотности со временем. С учетом большой мощности снежного покрова на горных ледниках, а также высоких скоростях ветра необходимо использование подробной и физически обоснованной параметризации уплотнения снежного покрова, которая учитывала бы и гравитационное

уплотнение нижних слоев снега, и ветровое уплотнение на его поверхности. Поэтому для добавления в представленную модель была выбрана параметризация из блока снежного покрова модели ISBA [16]. Согласно ей изменение плотности снежного покрова ρ_{sn} на каждом шаге по времени и каждом расчетном уровне i в снеге определяется следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_{sn}}{\partial t} = \rho_{sn}(i) \cdot \frac{\sigma(i)}{\eta(i)} + \max\left(0, \frac{\rho_{max} - \rho_{sn}(i)}{\tau_w}\right), \quad (7)$$

где σ – вертикальное давление (Па); η – вязкость снега (Па·с); $\rho_{max} = 350$ – максимальная плотность снега (кг/м³). Величина $\sigma(i)/\eta(i)$ отражает гравитационное уплотнение, а скорость ветрового уплотнения τ_w в модели учитывается только на верхнем уровне и рассчитывается согласно [16].

Кроме того, корректная оценка динамики снежного покрова и горных ледников невозможна без качественных выходных данных по осадкам и приходящим компонентам радиационного баланса. Однако данные реанализов позволяют получать значения этих величин только для средней высоты ячейки и тем самым существенно недооценивают значения сумм осадков и приходящей солнечной радиации. В таком случае, чтобы получить наиболее качественные значения этих величин на леднике, необходимо производить модельный расчет их изменения с высотой.

Для получения входных данных модели снежного покрова по осадкам предварительно применялась модель орографической компоненты осадков [6], основанная на алгоритме расчёта скорости конденсации водяного пара в воздухе, вынужденно поднимающегося вдоль горного склона с наветренной стороны. Пересчет количества солнечной радиации происходит исключительно с учетом геометрических параметров: азимута и среднего угла наклона ледовой поверхности, а также закрытости горизонта по модифицированным зависимостям Кондратьева. Также для нисходящих потоков прямой коротковолновой и длинноволновой радиации вводится поправка на абсолютную высоту по эмпирическим градиентам [11].

Результаты и обсуждение

Верификация разработанной модели на данных наблюдений на леднике Гарабаши

Первая серия численных экспериментов с разработанной моделью была проведена с использованием в качестве граничных условий на поверхности данных прямых наблюдений в зоне абляции ледника Гарабаши на высоте 3970 м над у. м., а количество осадков было посчитано с использованием модели орографического добавка. Расчеты проводились с часовым временным шагом для всего периода, обеспеченного данными наблюдений, который составил более 9 месяцев: с 01.09.2024 по 20.06.2025.

Сравнение результатов моделирования по SnowDraw с данными автоматических наблюдений и шурфов (рис. 2) показывают, что созданная модель достаточно хорошо воспроизводит динамику накопления снежного

покрова за рассматриваемый период. Стоит отметить, что первая половина сезона аккумуляции снега на леднике оказалась аномально малоснежной: так на момент шурфования 31 января 2025 г. высота снега вблизи метеостанции составила лишь 33 см (110 мм в. э.), в то время как модель воспроизвела малое накопление снега в начале зимы, однако несколько завысила количество снега (55 см и 195 мм в. э.). Однако в других частях ледника на той же высоте были получены значения высоты снежного покрова до 1 м, а столь малое количество снега вблизи АМС может быть обусловлено локальными особенностями точки и метелевым переносом снега в другие части ледника.

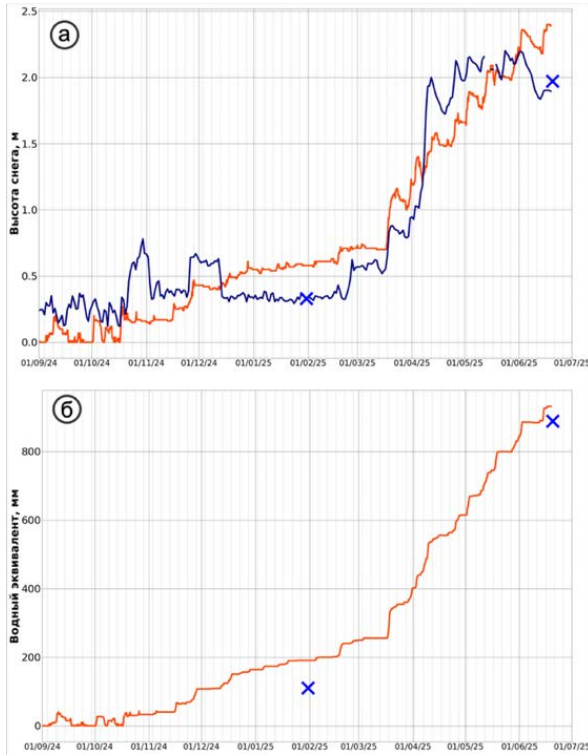


Рис. 2. Временной ход высоты (а) и водного эквивалента (б) снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаша в период с 01.09.2024 по 20.06.2025 по результатам моделирования (оранжевая линия), автоматических наблюдений (синяя линия) и данным шурфования снега (синие крестики).

Fig. 2. Time course of snow height (a) and water equivalent (b) in the Garabashi glacier ablation zone in the period from 09.01.2024 to 06.20.2025 by modelling results (orange line), automatic observations (blue line) and snow pitting data (blue crosses).

Также модель достаточно точно воспроизвела скорость накопления снежного покрова в весенний период, а к концу мая было получено практически полное соответствие расчетной высоты снежного покрова данным

автоматических наблюдений. Это указывает не только на адекватное описание в модели процесса накопления снежного покрова, но и на качественное воспроизведение суммы и времени выпадения осадков по модели орографического добавка [6]. До конца расчетного периода как по данным наблюдений, так и по результатам моделирования наблюдалась аккумуляция снега и на 18.06.2025 модель показала значение водного эквивалента снега (925 мм) весьма близкое к полученному в шурфе (890 мм). В то же время во второй половине июня началось появление жидкой влаги и уплотнение снежного покрова, что привело к уменьшению его высоты по данным наблюдений, что не было воспроизведено моделью, поэтому значение высоты снежного покрова оказалось завышенным на 40 см. В то же время полученные результаты позволяют говорить, что созданная модель адекватно воспроизводит динамику высоты снежного покрова в течение его аккумуляции, а также значение максимального водозапаса снежного покрова к началу снеготаяния.

Сравнение модельного значения температуры поверхности снега с радиационной температурой, восстановленной по данным наблюдений за восходящим длинноволновым потоком радиации, показало высокую степень соответствия расчетных значений температуры поверхности наблюдаемым (рис. 3).

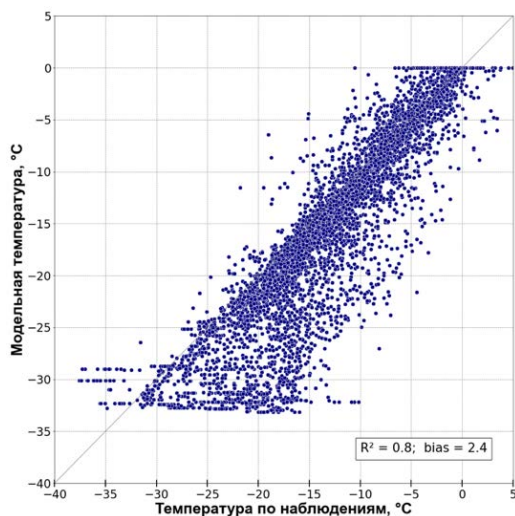


Рис. 3. Диаграмма рассеяния для температуры поверхности снежного покрова, полученной по результатам моделирования и данным наблюдений в зоне абляции ледника Гарабаши в период с 01.11.2024 по 18.06.2025.

Fig. 3. Scatterplot for snow surface temperature obtained from modelling results and observational data in the Garabashi glacier ablation zone in the period from 01.11.2024 to 18.06.2025.

Коэффициент детерминации для этих рядов составляет $R^2=0.8$, что указывает прежде всего на высокое качество воспроизведения временной изменчивости. Среднее смещение результатов моделирования составляет $2.4\text{ }^\circ\text{C}$, что является достаточно высоким результатом. Однако в отдельные сроки ошибка моделирования может составлять до $15\text{--}18\text{ }^\circ\text{C}$. При этом модель в среднем занижает значение температуры поверхности, особенно в ночные часы, что связано с проблемой определения турбулентных потоков явного и скрытого тепла над снегом. Тем не менее представленные результаты позволяют говорить, что созданная модель снежного покрова на высоком уровне воспроизводит тепловой баланс и значения температуры поверхности снега.

Также были проведены оценки воспроизведения созданной моделью плотности снежного покрова. Для доступных шурфов было получено очень близкое соответствие среднего значения плотности всей снежной колонки: ошибка воспроизведения средней плотности снега составила всего 13 и 14 кг/м^3 для шурфов к середине холодного периода и к началу снеготаяния. Столь незначительные ошибки определения плотности снежного покрова позволяют говорить о высоком качестве выбранной параметризации уплотнения снега [16]. Однако модель несколько завышает значения плотности снега в средней части толщи и не воспроизводит ветровой насти на поверхности снега.

Сравнение результатов созданной модели с другими моделями снежного покрова

Вторая серия численных экспериментов с моделью SnowDraw была проведена на временном масштабе более года – с 09.2023 по 07.2025. Выбранный период обусловлен наличием трех шурфов для верификации результатов модели: 28.01.2024, 31.01.2025 и 18.06.2025. В данном случае в качестве атмосферного форсинга модели использовались данные реанализа ERA5 Pressure levels, приведенные для высоты 3800 м , что соответствует верхней части зоны абляции ледника Гарабаши и высоте установки метеостанции. В данной серии экспериментов проводился как расчет сумм осадков с учетом орографического добавка к осадкам, так и пересчет количества солнечной и длинноволновой радиации в зависимости от высоты и характеристик склона. В начальный момент времени предполагалось отсутствие снега в модельной точке. Для снижения объема требуемых данных при подготовке атмосферного форсинга шаг интегрирования модели по времени был выбран равным 3 часам.

С использованием идентичных входных данных и шага по времени были проведены расчеты с более упрощенной моделью снежного покрова NoahMP [22], применяемой в мезомасштабной модели WRF, и моделью физики снежного покрова SNOWPACK [12]. Эти модели могут рассматриваться в качестве «конкурентов» для представленной модели снежного покрова.

Модель SnowDraw показала высокое качество воспроизведения водного эквивалента снега в сравнении с данными шурфов и существенно превзошла результаты других моделей (рис. 4а). Так, для января 2024 г. созданная модель занизила величину водного эквивалента лишь на 20 мм, для января 2025 г. – завысила на 40 мм, а к июню 2025 года ошибка моделирования составила всего 2 мм в. э. При этом прочие модели снежного покрова во всех случаях завышают скорость накопления снежного покрова на леднике, что особенно ярко проявляется в начале зимы 2024/2025 гг., где модели NoahMP и SNOWPACK завышают значение водного эквивалента более чем в 2.5 раза. Стоит, однако, отметить несколько более позднее начало таяния по представленной модели в оба года.

Аналогичные результаты были получены и для высоты снежного покрова (рис. 4б), где ошибка воспроизведения величины по разработанной модели не превышает 0.3 м и во всех трех случаях оказывается ниже, чем по другим моделям. Заметно также, что по более упрощенной модели NoahMP ошибка определения высоты снежного покрова оказалась больше, чем для водного эквивалента, что указывает на занижение в этой модели плотности снежного покрова и более слабое описание его уплотнения.

Также аналогичная серия численных экспериментов для этого же периода с 09.2023 по 07.2025 была проведена с моделями SnowDraw и NoahMP для различных высотных зон ледника Гарабаши от 3200 м над у. м. (язык ледника) до 4400 м над у. м. (зона питания ледника) с шагом по высоте 300 м. В качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа ERA5 Pressure levels, приведенные для соответствующих расчетных высот, а также производился пересчет сумм осадков с учетом орографического добавка и потоков приходящей радиации. В начальный момент времени предполагалось отсутствие снега в модельной точке, что, вообще говоря, неверно для высот выше линии равновесия ледника (около 4000–4100 м над у. м. для ледника Гарабаши). Проведенное сравнение модельных результатов с космическими снимками Sentinel-2 в различные даты лета 2024 г. позволяют оценить качество воспроизведения сроков залегания снежного покрова в различных зонах ледника, а значит, и существенного эффекта на альbedo поверхности.

Результаты моделирования высоты снежного покрова в различных высотных зонах (рис. 5) демонстрируют, что модель SnowDraw адекватно воспроизводит основные паттерны пространственно-временного изменения снежного покрова на леднике. Так, за счет увеличения количества осадков наибольшая высота снежного покрова в холодный период наблюдается на языке ледника (высоты 3200 и 3500 м над у. м.), однако таяние на этих высотах начинается раньше и идет интенсивнее – снег полностью сходит в начале июля. Процесс накопления и таяния снежного покрова на больших высотах запаздывает по сравнению с нижними зонами. При этом в районе линии равновесия ледника (4100 м над у. м.) получено активное таяние снега, но неполный его сход. В зоне аккумуляции ледника Гарабаши (4400 м над у. м.) по созданной модели таяния практически не происходит.

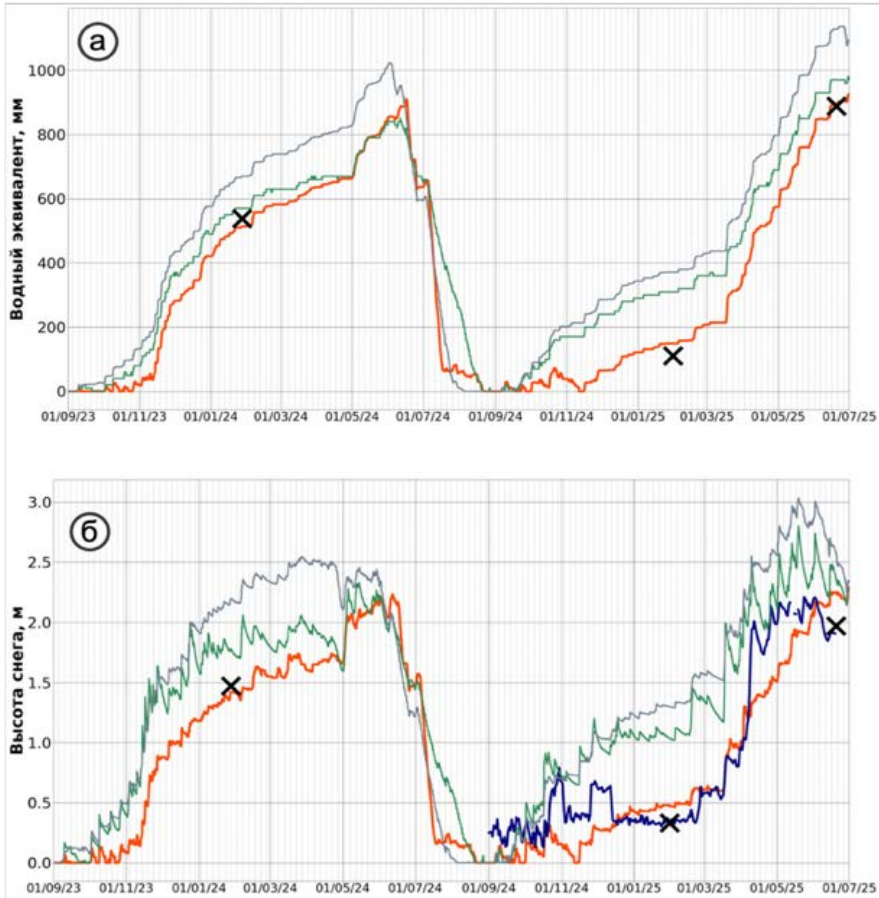


Рис. 4. Временной ход водного эквивалента (а) и высоты (б) снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаша в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования на данных реанализа ERA5 с помощью моделей SnowDraw (оранжевая линия), SNOWPACK (серая линия) и NoahMP (зеленая линия), а также по данным автоматических наблюдений (синяя линия) и данным шурфования снега (черные крестики).

Fig. 4. Time course of the snow water equivalent (a) and depth (b) in the Garabashi glacier ablation zone in the period from 01.09.2023 to 30.06.2025 by modelling results based on ERA5 reanalysis data using the SnowDraw (orange line), SNOWPACK (gray line) and NoahMP (green line) models, as well as automatic observation data (blue line) and snow pitting data (black crosses).

При этом модель NoahMP, во-первых, существенно завышает высоту снежного покрова практически во всех высотных зонах, а, во-вторых, время схода снежного покрова на высотах от 3200 до 3800 м над у. м. практически не отличается и является поздним, что указывает на слабое

воспроизведение в этой модели физических процессов изменения характеристик снежного покрова в горах и, как следствие, отсутствие реакции на изменение атмосферного форсинга. В то же время на высоте 4400 м над у. м. наблюдается небольшое таяние, которое не наблюдается в разработанной модели.

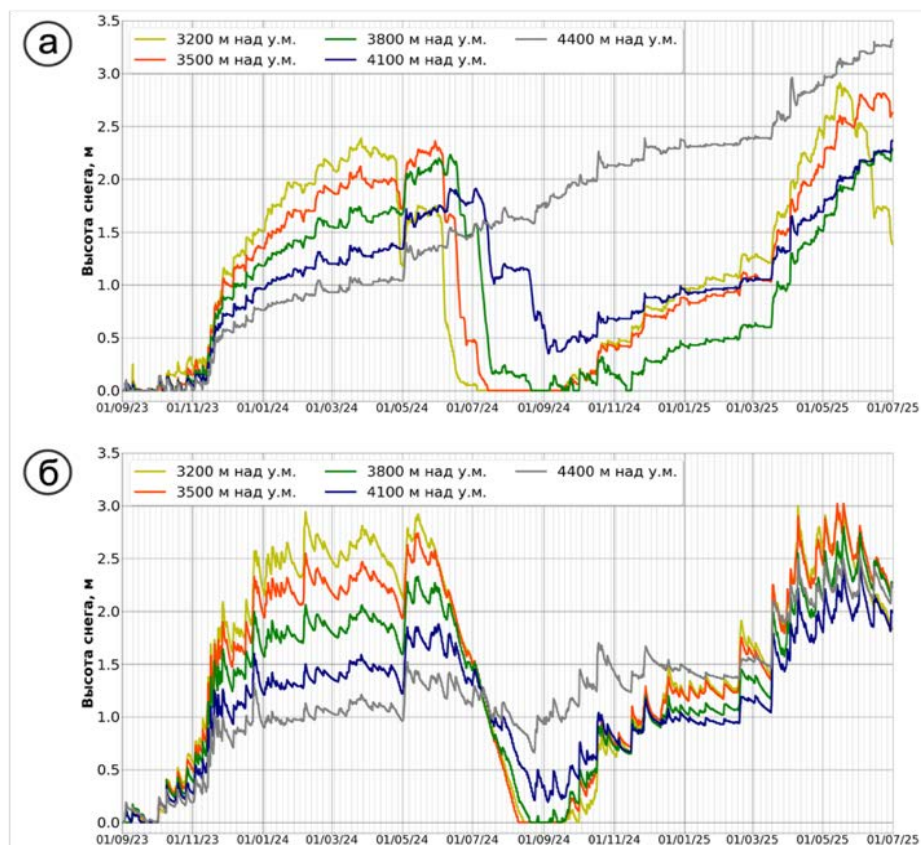


Рис. 5. Временной ход высоты снежного покрова в различных высотных зонах ледника Гарабаша в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования по моделям SnowDraw (а) и NoahMP (б) на данных реанализа ERA5.

Fig. 5. Time course of snow cover depth in different altitude zones of the Garabashi glacier in the period from 01.09.2023 to 30.06.2025 by modelling results using the SnowDraw (a) and NoahMP (б) models based on ERA5 reanalysis data.

Космические снимки Sentinel-2 позволяют установить, что в начале июня снеговая линия лежит на высотах порядка 3000 м над у. м., а сход снега на высоте 3200 м над у. м. происходит в 20-х числах июня. По созданной модели сход снежного покрова на 3200 м над у. м. происходит 4 июля, а по NoahMP – лишь 10 августа. На высоте 3500 м над у. м. снег

полностью сошел около 5 июля (13 июля в созданной модели и 15 августа по NoahMP). Таким образом, специализированная модель SnowDraw адекватно описывает время схода снежного покрова на языке ледника с ошибкой в 7–10 дней, в то время как модель NoahMP во всех перечисленных случаях опаздывает со сходом снега на месяц и более, что вносит существенный и ошибочный вклад в летнюю абляцию ледника.

Однако по космическому снимку за 09.08.2024 было установлено, что снеговая линия соответствует высоте около 4200–4300 м над у. м., а это указывает на практически полное отсутствие снега на леднике Гарабаши к середине-концу августа 2024 г. Однако ни одна из моделей не воспроизвела полного стаивания снега на высотах 4100 и 4400 м над у. м. Столь слабые результаты в зоне аккумуляции ледника могут быть связаны с низким качеством входных данных в модель, поскольку данные реанализа ERA5 Pressure levels не учитывают влияния Эльбруса на атмосферу на этой высоте и существенного прогрева поверхности на его южном склоне летом, а соответствуют скорее свободной атмосфере.

Представленные выше результаты позволяют утверждать, что представленная модель снежного покрова показывает высокое качество воспроизведения сезонной динамики снежного покрова на горном леднике. При этом более упрощенная модель снежного покрова NoahMP показала более слабые результаты с точки зрения воспроизведения как скорости накопления и таяния снега, так и характеристик снежной толщи. Показано также, что модель полной физики снежного покрова SNOWPACK, являясь наиболее продвинутым инструментом для расчета стратиграфии снежного покрова и теплофизических свойств его толщи, не гарантирует высоких результатов воспроизведения сезонной динамики снежного покрова при отсутствии достаточного количества входных данных. Стоит отметить, что время счета эксперимента в одной расчетной точке по представленной модели SnowDraw аналогично времени по модели NoahMP, в то время как модель SNOWPACK затрачивает на тот же эксперимент в 100 раз больше компьютерного времени. Поэтому с вычислительной точки зрения представленная модель является значительно более экономным инструментом расчета динамики и характеристик снежного покрова и подходит для задач прогноза климата.

Пример расчета многолетней динамики снежного покрова для оледенения Эльбруса

Представленная выше верификация новой модели SnowDraw показала возможность ее применения в качестве блока параметризации горного оледенения IGRICE [7]. С этим модельным комплексом, включающем разработанную модель снежного покрова, был проведен численный эксперимент на данных реанализа ERA5 для всего оледенения Эльбруса с 1983 по 2025 г. Расчеты проводились по 12 азимутам и 9 высотным зонам (с 3200

до 5600 над у. м. с шагом 300 м), что позволило получить климатическую оценку пространственно-временного распределения снежного покрова на Эльбрусе.

Было получено, что среднеемноголетняя высота снежного покрова для мая (период максимального снегонакопления) в зонах абляции достигает максимума в 2.7 м на наветренном юго-западном склоне и уменьшается до 1.5 м на северо-восточном склоне (рис. 6а). При этом с высотой наблюдается закономерное уменьшение количества снежного покрова (менее 1 м в привершинной части), связанное как с уменьшением количества осадков, так и его ветровым переносом в нижние зоны. Аналогично для августа (период максимальной абляции на ледниках Эльбруса) снег полностью сходит в зонах абляции ледников (рис. 6в) и сохраняется выше линий равновесия (4000–4100 м над у. м.).

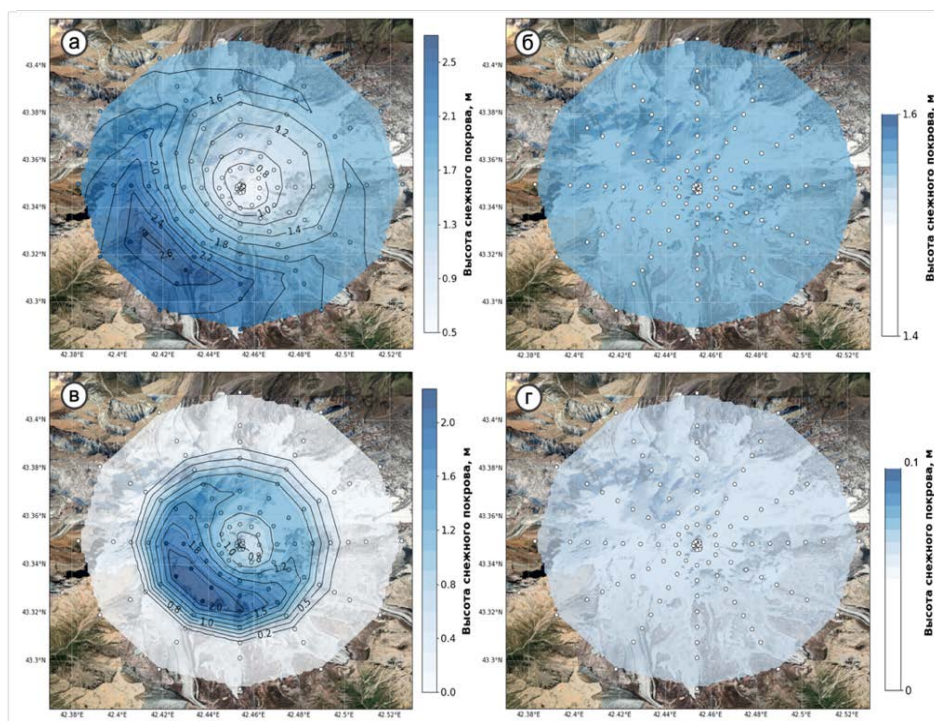


Рис. 6. Пространственное распределение средней многолетней высоты снежного покрова (за период с 1983 по 2025 г.) по оледенению Эльбруса для мая (а, б) и августа (в, г) по результатам моделирования с помощью модели SnowDraw (а, в) и данным реанализа ERA5-Land (б, г).

Fig. 6. Spatial distribution of the average long-term snow cover depth (for the period from 1983 to 2025) for the Elbrus glaciation for May (а, б) and August (в, г) based on results using the SnowDraw model (а, в) and ERA5-Land reanalysis data (б, г).

Стоит отметить, что по данным по снежному покрову из реанализа ERA5-Land в мае его высота по всему Эльбрусу составляет около 1.5 м, а в августе снег полностью отсутствует (рис. 6б, г). Кроме того, максимум снегонакопления по реанализу наблюдается в феврале-марте с более низким значением высоты снежного покрова, чем по данным наблюдений. Таким образом, данные реанализа неверно воспроизводят как сроки залегания снежного покрова на леднике, так и время и величину максимального водозапаса. Для ледника Гарабаши было получено, что вследствие этого данные реанализа по снежному покрову занижают среднегодовой сток за счет таяния снега на 151 мм в. э. с 1 м^2 по сравнению с результатами расчетов с представленным модельным комплексом, что только для одного ледника Гарабаши дает недоучет объема стока в $755\,000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Все это позволяет утверждать, что использование данных реанализов не дает получать реалистичные параметры снежного покрова на горных ледниках и они непригодны для прогноза динамики горного оледенения. В то время как использование модельного комплекса, включающего специализированную модель снежного покрова, позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость снежного покрова на леднике и получать более достоверные оценки динамики оледенения и величины снегового питания в стоке.

Заключение

В рамках исследования была создана новая модель снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw с включением описания специфических факторов снежного покрова в высокогорных районах, направленная на климатический прогноз динамики ледникового покрова и речного стока в горных районах. На основе верификации представленной модели на собранных данных прямых наблюдений на леднике Гарабаши на южном склоне Эльбруса было получено высокое качество воспроизведения как сезонной динамики и водозапаса снежного покрова на горном леднике, так и температуры поверхности снега и его средней плотности.

Сравнение результатов представленной модели с другими доступными моделями различного уровня комплексности (NoahMP [22], SNOWPACK [12]) для ледника Гарабаши показало, что она демонстрирует более высокие результаты воспроизведения мультисезонной динамики снега на горном леднике: ошибка моделирования не превысила 40 мм в. э. На основе анализа космических снимков Sentinel-2 было показано, что модель SnowDraw адекватно воспроизводит время схода снежного покрова на языке ледника, однако недооценивает скорость таяния в зоне аккумуляции. В то же время использование специализированной модели SnowDraw позволяет существенно улучшить описание характеристик снежного покрова на леднике по сравнению с другими моделями при низких затратах компьютерного времени, что делает представленную модель вычислительно

эффективным и качественным инструментом для прогноза динамики снежного покрова и оледенения в горах и пригодной к использованию в качестве блока параметризации горного оледенения.

По расчетам с помощью гляциологической модели IGRICE была получена оценка климатического распределения снежного покрова по всему оледенению Эльбруса. Показано, что использование модельного комплекса, включающего специализированную модель снега, позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость снежного покрова на леднике и получать более достоверные оценки динамики оледенения и речного стока по сравнению с данными реанализов.

Помимо дальнейшей доработки и усовершенствования модели SnowDraw планируется полное ее совмещение с глобальной гляциологической моделью IGRICE [7] с последующим проведением численных экспериментов для других горно-ледниковых районов России и мира. В дальнейшем данный модельный комплекс может быть использован в качестве блока модели деятельного слоя суши TerM [23].

Благодарности

За консультации по построению схемы модели выражается благодарность зам. директора НИВЦ МГУ д.ф.-м.н. Степаненко В.М.; за помощь в работе с космическими снимками – в.н.с. ИГ РАН к.г.н. Носенко Г.А.

Развитие и тестирование модели снежного покрова SnowDraw выполнена по проекту РФФ № 23–17–00247; оценка снежно-ледовой составляющей речного стока на Эльбрусе выполнена в рамках проекта РФФ № 24–17–00152.

Acknowledgements

We would like to thank V.M. Stepanenko, Dep. Dir. of the MSU RCC, for consultations on developing the model. We would also like to thank G.A. Nosenko, Leading Researcher at the IG RAS, for assistance with satellite imagery.

The development and testing of the SnowDraw snow cover model was carried out under RSF project № 23–17–00247; the assessment of the river runoff snow-ice component on Elbrus was carried out under RSF project № 24–17–00152.

Список литературы

1. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, № 1. С. 19-26.

2. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Турков Д.В., Шестакова А.А., Андросова Е.Е.. Оценка эффекта сублимации ледяных кристаллов при метелях над поверхностью горного ледника на основе натуральных данных и численного моделирования // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. 2021. С. 397-404.

3. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Авиллов В.К., Артамонов А.Ю., Полохов А.А., Железнова И.В., Ярынич Ю.И. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции // Лед и снег. 2024. Т. 64, № 1. С. 25-40.
4. Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Влияние изменений климата и деградации оледенения на водный режим в высокогорной части бассейна р. Терек // Лёд и Снег. 2024. Т. 64, № 2. С. 173-188. DOI: 10.31857/S2076673424020014
5. Михаленко В.Н. и др. Ледники и климат Эльбруса. СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
6. Торопов П.А., Шестакова А.А., Ярынич Ю.И., Кутузов С.С. Моделирование орографической составляющей осадков на примере Эльбруса // Лед и снег. 2022. Т. 62, № 4. С. 485-503.
7. Торопов П.А., Дебольский А.В., Полохов А.А., Шестакова А.А., Поповнин В.В., Дроздов Е.Д. Минимальная модель Урлеманса как возможный инструмент описания горного оледенения в моделях Земной системы // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 5. С. 524-537.
8. Торопов П.А. и др. Гляциологические исследования Института географии РАН на Эльбрусе в 2024 г. // Лёд и Снег. 2024. Т. 64, № 4. С. 480.
9. Турков Д.В., Дроздов Е.Д., Ломакин А.А. Альbedo снежного покрова и его параметризация для целей моделирования природных систем и климата // Лёд и снег. 2024. Т. 64, № 3. С. 403-419.
10. Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A. Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses // Regional Environmental Change // 2019. Vol. 19, № 5. P. 1225-1228.
11. Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008. 505 p.
12. Bartelt P.A., Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model // Cold Reg. Sci. Technol. 2002. Vol. 35, no. 3. P. 123-145.
13. Bintanja R. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet // J. Appl. Meteorol. 2001. Vol. 40. P. 1952-1966.
14. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M., Kostrykin S.V., Tarasevich M.A., Vorobyeva V.V. Modification and validation of the soil-snow module in the INM RAS climate model // Atmosphere. 2024. Vol. 15, no. 4. P. 422.
15. Decharme B., Brun E., Boone A., Delire C. et al. Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model // The Cryosphere. 2016. Vol. 10, no. 2. P. 853-877.
16. Hock R., Rasul G. et al. High Mountain Areas. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019). 2019.
17. Krinner G. et al. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geosci. Model Dev. 2018. Vol. 11. P. 5027-5049.
18. Milner A.M., Khamis K., Battin T.J. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, no. 37. P. 9770-9778.
19. Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps // Water Resources Research. 2010. Vol. 46, № 10. <https://doi.org/10.1029/2009WR009039>
20. Pomeroy J.W., Jones H.G. Wind-Blown Snow: Sublimation, transport and changes to polar snow // Chemical exchange between atmosphere and polar snow. NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 1996. Vol. 43. P. 453-489.
21. Smirnova T.G., Brown J.M., Benjamin S.G., Kenyon J.S. Modifications to the Rapid Update Cycle Land Surface Model (RUC LSM) Available in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model // Mon. Weather Rev. 2016. Vol. 144. P. 1851-1865.
22. Stepanenko V.M. et al. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2024. Vol. 39, no. 6. P. 363-377.

References

1. Volodin E.M. Vosproizvedenie sovremennogo klimata model'ju klimaticheskoj sistemy INMCM60 [Reproduction of the modern climate using the INMCM60 climate system model]. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2023, vol. 59, № 1, pp. 19-26 [in Russ.].
2. Drozdov E.D., Toropov P.A., Turkov D.V., Shestakova A.A., Androsova E.E. Ocenka jefekta sublimacii ledjanyh kristallov pri meteljah nad poverhnost'ju gornogo lednika na osnove naturnyh dannyh i chislennogo modelirovaniya [Estimation of the effect of sublimation of ice crystals during snowstorms over the surface of a mountain glacier based on field data and numerical simulation]. *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: Materialy IV Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoj k Godu nauki i tehnologii [Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Science and Technology]*. 2021, pp. 397-404 [in Russ.].
3. Drozdov E.D., Toropov P.A., Avilov V.K., Artamonov A.Yu., Polyukhov A.A., Zheleznova I.V., Yarinich Yu.I. Meteorological regime of the Elbrus high-mountain zone during the accumulation period. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024, vol. 60, no. S2, pp. S202-S213.
4. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Yu.G., Korneva I.A., Postnikova T.N., Rybak O.O. Vlijanie izmenenij klimata i degradacii oledeneniya na vodnyj rezhim v vysokogornoj chasti bassejna r. Terek [The impact of climate change and glacier degradation on the water regime in the high-mountain part of the Terek River basin]. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024, vol. 64, no. 2, pp. 173-188 [in Russ.].
5. Mikhailenko V.N. et al. Ledniki i klimat Elbrusa. [Glaciers and climate of Elbrus]. Saint-Petersburg, Nestor-Istoria publ., 2020, 372 p. [in Russ.].
6. Toropov P.A., Shestakova A.A., Yarinich Yu.I., Kutuzov S.S. Modeling orographic precipitation using the example of Elbrus. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023, vol. 59, no. S1, pp. S8-S22. DOI: 10.1134/s0001433823130108.
7. Toropov P.A., Debol'skii A.V., Polyukhov A.A., Shestakova A.A., Popovnin V.V., Drozdov E.D. Oerlemans Minimal Model as a Possible Instrument for Describing Mountain Glaciation in Earth System Models. *Vodnye resursy [Water resources]*. 2023, vol. 50, no. 5, pp. 524-537 [in Russ.].
8. Toropov P.A., Lavrentiev I.I., Artamonov A.Yu., Drozdov E.D., Kiseleva T.D., Abramov A.A., Sushintsev I.M., Degtyarev A.I., Khairedinova A.G., Elagina N.E.. Gljiaciologicheskie issledovanija Instituta geografii RAN na Jel'bruse v 2024 g. [Glaciological research by the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences on Elbrus in 2024]. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024, vol. 64, no. 4, pp. 480 [in Russ.].
9. Turkov D.V., Drozdov E.D., Lomakin A.A. Al'bedo snezhnogo pokrova i ego parametrizacija dlja celej modelirovaniya prirodnyh sistem i klimata [Snow cover albedo and its parameterization for the purposes of modeling natural systems and climate]. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024, vol. 64, no. 3, pp. 403-419 [in Russ.].
10. Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A. Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses. *Regional Environmental Change*. 2019, vol. 19, no. 5, pp. 1225-1228.
11. Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press publ., 2008, 505 p.
12. Bartelt P.A., Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2002, vol. 35, pp. 123-145.
13. Bintanja R. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet. *J. Appl. Meteorol.* 2001, vol. 40, pp. 1952-1966.
14. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M., Kostykin S.V., Tarasevich M.A., Vorobyeva V.V. Modification and validation of the soil-snow module in the INM RAS climate model. *Atmosphere*. 2024, vol. 15, no. 4, pp. 422.
15. Decharme B., Brun E., Boone A., Delire C. et al. Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. *The Cryosphere*. 2016, vol. 10, no. 2, pp. 853-877.

16. Hock R. et al. "High Mountain Areas" in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019), 2019.
17. Krinner G. et al. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks. *Geosci. Model Dev.* 2018, vol. 11, pp. 5027-5049.
18. Milner A.M., Khamis K., Battin T.J. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2017, vol. 114, no. 37, pp. 9770-9778.
19. Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps. *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, no. 10. <https://doi.org/10.1029/2009WR009039>
20. Pomeroy J.W., Jones H.G. Wind-Blown Snow: Sublimation, transport and changes to polar snow. *Chemical exchange between atmosphere and polar snow.* NATO ASI Series, Berlin, Heidelberg, 1996, vol. 43, pp. 453-489.
21. Smirnova T.G., Brown J.M., Benjamin S.G., Kenyon J.S. Modifications to the Rapid Update Cycle Land Surface Model (RUC LSM) Available in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Mon. Weather Rev.* 2016, vol. 144, pp. 1851-1865.
22. Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Bogomolov V.Yu. et al. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* 2024, vol. 39, no. 6, pp. 363-377.

*Поступила 13.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 13.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-94-113>

УДК 551.466.33/.32

Оценка качества прогноза высоты волн и скорости ветра в Цемесской бухте Черного моря

*А.Д. Рыбалко¹, С.А. Мысленков^{1,2,3,4}, Е.Е. Круглова¹,
А.В. Григорьев⁵, В.Г. Сенченко⁶*

*¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова
Российской академии наук, Москва, Россия;*

*²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

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

*⁴Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

*⁵Государственный океанографический институт
имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия;*

*⁶Государственный морской университет
имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», г. Новороссийск, Россия
rybalko.ad@ocean.ru*

Исследована точность прогноза высоты ветровых волн в акватории Цемесской (Новороссийской) бухты с использованием спектральной модели WAVEWATCH III и прогноза ветра GFS (0.25°). Сравнение модельных расчетов с натурными измерениями, выполненными на пирсе Шесхарис в период декабрь 2023 – август 2025 гг., показало, что качество прогноза высоты волн для заблаговременности до трех суток удовлетворительное. Среднеквадратическая ошибка для прогноза высоты значительных волн составляет 0.17–0.22 м, коэффициент корреляции — 0.85–0.9, систематическая ошибка отрицательная (–0.09 – –0.13 м). Минимальные ошибки получены для заблаговременности 15 ч. Анализ сезонной изменчивости показал повышение точности прогноза в осенне-зимний период и снижение в весенне-летний сезон из-за влияния локальных ветровых эффектов. Установлено, что при ветрах с моря модель воспроизводит высоту волн точнее, чем при ветрах с суши. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности оперативных систем прогнозирования волнения и обеспечения безопасности морских операций в акватории Цемесской бухты.

Ключевые слова: Черное море, Цемесская бухта, ветровое волнение, прогноз волн, спектральная модель, WAVEWATCH III, GFS, точность прогноза, заблаговременность, Новороссийская бора

Evaluation of Wave Height and Wind Speed Forecast Quality in the Tsemess Bay of the Black Sea

A.D. Rybalko¹, S.A. Myslenkov^{1,2,3,4}, Kruglova E.E.¹,
A.V. Grigoriev⁵, V.G. Senchenko⁶

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

²*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

⁴*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

⁵*N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, Russia;*

⁶*Admiral Ushakov maritime state university, Novorossiysk, Russia
rybalko.ad@ocean.ru*

A study was conducted to assess the accuracy of wind wave height forecasts in the Tsemess (Novorossiysk) Bay using the spectral model WAVEWATCH III forced by GFS winds (0.25°). Comparison of model simulations with in situ measurements obtained at the Sheskhari pier during December 2023 – August 2025 showed that the system provides satisfactory forecast quality of wave heights for different lead times up to 72 hours. The root-mean-square error of significant wave height forecasts ranges from 0.17 to 0.22 m, the correlation coefficient is 0.85–0.9, and the systematic bias is negative (–0.09...–0.13 m). The smallest errors were observed for a lead time of 15 hours. Seasonal variability analysis revealed higher forecast accuracy in the autumn–winter period and lower accuracy in the spring–summer season due to the influence of local wind effects. It was found that the model reproduces wave characteristics more accurately during offshore winds (from sea to land) than during onshore winds (from land to sea). The obtained results can be used to improve the accuracy of operational wave forecasting systems and to enhance maritime safety in the Tsemess Bay area.

Keywords: Black Sea, Tsemess Bay, wind waves, wave forecast, spectral model, WAVEWATCH III, GFS, forecast accuracy, lead time, Novorossiysk bora

Введение

Цемесская (Новороссийская) бухта представляет собой залив в северо-восточной части Черного моря, ограниченный Суджукской косой с запада и мысом Дооб с востока, с глубинами до 27 м и протяженностью береговой линии около 15 км [1]. Цемесская бухта является одним из ключевых центров судоходной, портовой и промышленной деятельности на российском побережье Черного моря [7]. Здесь круглогодично функционирует крупнейший морской торговый порт России, через который проходят нефть и нефтепродукты, контейнерные грузы, продовольствие и лесоматериалы. Поскольку акватория незамерзающая, именно ветро-волновой режим является главным лимитирующим фактором успешного проведения портовых и морских операций: даже умеренное волнение приводит к вынужденным остановкам работ и аварийным ситуациям [7, 15]. Ветровые волны также являются значимым фактором в эрозии берегов при том, что для Черноморского побережья Кавказа характерно преобладание эрозионных

процессов над аккумулятивными и имеется дефицит пляжей [13]. Таким образом, работы связанные с прогнозом ветра и волн, являются актуальными для рассматриваемой акватории.

Климат восточного побережья Черного моря формируется под влиянием макроциркуляционных процессов Средиземноморского климатического региона. Основные сезонные особенности погоды связаны с взаимодействием Сибирского и Азорского максимумов, Азиатского минимума и Средиземноморского циклона [6, 8]. Как и для всего Черного моря, для акватории Цемесской бухты наиболее неблагоприятные ветро-волновые условия характерны для зимнего сезона – с конца ноября по март. Наибольшее влияние на формирование штормового волнения оказывают ветра южного, юго-западного и западного направлений [2]. Географическое положение бухты у подножья Маркотхского хребта и ее открытость к морю обуславливают высокую подверженность воздействию экстремальных гидрометеорологических явлений. Среди них особое место занимает новороссийская бора – сильный порывистый ветер, дующий с прибрежных горных хребтов на море. В среднем в Новороссийске наблюдается около 45 дней с борой в год, причем примерно в половине случаев скорость ветра достигает штормовых значений (20 м/с), а в отдельные годы наблюдаются аномально сильные события с порывами до 40–50 м/с, вызывающие катастрофические последствия [5, 12, 24, 29]. Даже при северо-восточных ветрах, несмотря на сравнительно короткий разгон, в акватории бухты может формироваться волнение с высотами волн до 1.5 м [7]. Все это подчеркивает необходимость совершенствования методов прогноза волнения для данного района.

В настоящее время существует несколько зарубежных и отечественных систем прогноза волнения в Черном море [19, 20, 31]. В ФГБУ «Гидрометцентр России» действует комплексная система оперативного прогноза волнения в Мировом океане и морях России на основе модели WAVEWATCH III с заблаговременностью до пяти суток [10, 11]. В этой системе реализуется подход сопряжения глобальных вычислительных сеток грубого пространственного разрешения с региональными сетками высокого разрешения в прибрежной зоне.

Наиболее важной характеристикой для каждой системы является достоверность воспроизведения параметров волнения, которая оценивается по данным прямых измерений или спутников [9, 27]. При анализе ошибок прогнозов возникают предпосылки для модернизации и улучшения систем прогноза. Основными источниками ошибок в моделях ветрового волнения являются поля ветра, которые, как правило, содержат ошибки. Кроме того, немаловажным является использование качественной батиметрии в прибрежной зоне. В [16] проведен анализ качества прогноза высоты волн при использовании региональных атмосферных моделей (например, WRF). В [24] показано, что величина среднеквадратической ошибки для прогноза высоты волн в среднем для Черного моря для заблаговременности 63 часа составляет 0.41 м для прогноза ветра GFS и 0.44 м при использовании

прогнозов COSMO-Ru. Вместе с тем сохраняется неопределенность, связанная как с качеством ветровых полей, так и с параметризацией нелинейных процессов в спектральных моделях [19].

Таким образом, прогнозирование ветрового волнения в Цемесской бухте остается важной научной и прикладной задачей. Сочетание высокой социально-экономической значимости региона и специфики локальной атмосферной циркуляции определяет необходимость дальнейших исследований в области численного моделирования волнения и повышения точности прогностических систем.

В настоящей работе выполнены оценки качества прогноза высоты волн по модели WAVEWATCH III на основе данных измерений в Цемесской бухте за период с декабря 2023 по август 2025 года, а также выполнены оценки качества скорости ветра прогнозов GFS на основе данных метеостанции.

Материалы и методы

Прогноз волнения выполнялся с использованием модели WAVEWATCH III [29] и прогностических полей ветра GFS 0.25° для акватории Цемесской бухты. Данная система прогнозов является развитием методов, описанных в работах [11, 17, 23, 30]. Выбор модели WAVEWATCH III обусловлен двумя ключевыми факторами. Во-первых, это основная модель, используемая Гидрометцентром России для оперативного прогноза волнения [10, 11], что обеспечивает согласованность и преемственность наших исследований с действующей системой прогноза. Во-вторых, современные версии моделей SWAN и WAVEWATCH III при одинаковых настройках, вычислительной сетке и форсинге дают практически одинаковые результаты, поэтому использование модели WAVEWATCH III представляется более методически оправданным для последующей интеграции в оперативную систему. Оперативный прогноз параметров ветрового волнения для Черного и Азовского морей выполняется ежедневно с заблаговременностью 72 часа с шагом 3 часа. В модели используется неструктурная вычислительная сетка, включающая в себя Черное и Азовское моря с шагом по пространству 6–12 км, а также прибрежную зону с шагом до 200 м (рис. 1а). Общее количество узлов сетки в рассматриваемой зоне составляет 59690. Данная вычислительная сетка успешно применялась для диагностических расчетов ветрового волнения [21, 22]. Благодаря неструктурной вычислительной сетке, эта система более приспособлена для прогноза ветрового волнения в прибрежных и мелководных районах.

Выходными данными модели являются следующие характеристики ветрового волнения: высота значительных волн, среднее направление их распространения, средняя длина и средний период волн. Под высотой волн в данном исследовании везде подразумевается высота значительных волн – стандартная метрика для ветровых волн. Со статистической точки зрения высота значительных волн определяется через спектральный анализ как четыре квадратных корня из нулевого момента волнового спектра (m_0): $H_s = 4\sqrt{m_0}$.

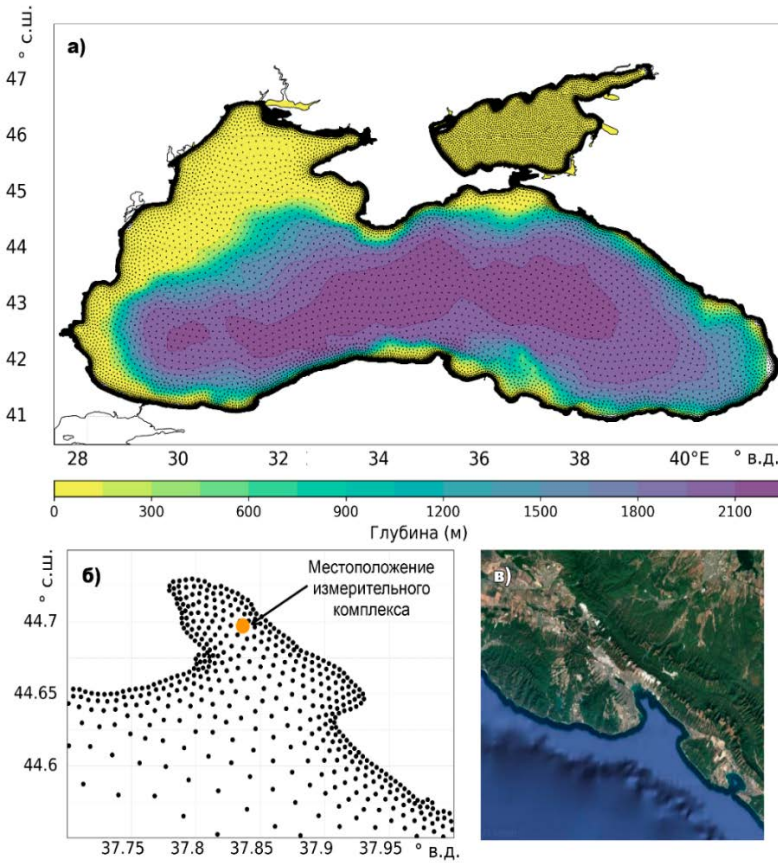


Рис. 1. Неструктурная сетка (а), узлы расчета модели в районе Цемесской бухты, оранжевым кружком отмечено местоположение измерительного комплекса (б); общий вид местности вокруг Цемесской бухты (в).

Fig. 1. Unstructured grid (a); model computation nodes in the area of Tsemes Bay, with the location of the measuring complex marked by an orange circle (б); general view of the area around Tsemes Bay (в).

Данные измерений

Для оценки качества прогноза высоты волн результаты моделирования сопоставлялись с данными инструментальных измерений в Цемесской бухте на пирсе Шесхарис (рис. 1б). Измерения выполнены прибором “Комплекс гидрологический ГМУ-4”. Он представляет собой автоматический автономный комплекс, предназначенный для измерения уровня моря, температуры воды, параметров волнения и атмосферного давления. Прибор измеряет высоту значительных волн, максимальную высоту волн и средний период. Шаг по времени в измерениях был около 10 минут. Для анализа использованы данные с 22.12.2023 по 22.08.2025 с некоторыми пропусками. В сумме пропуски по датам составляют 9,5 %, а всего доступных

записей более 15 тысяч и они охватывают все месяцы, что позволяет выполнить оценки качества прогнозов не только для всего периода, но и для отдельных сезонов.

Параметры оценки качества прогноза

Для сопоставления прогностических данных с измерениями ряд измерений был интерполирован на трехчасовые сроки, соответствующие выходным данным модели. Для каждой пары «модель – измерение» рассчитывался набор статистических характеристик:

- MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная ошибка;
- RMSE (Root Mean Square Error) – среднеквадратическая ошибка;
- Bias – систематическая ошибка;
- SI (Scatter Index) – индекс рассеяния (RMSE, отнесенный к среднему измеренному значению);
- R – коэффициент корреляции Пирсона.

Стандартные статистические характеристики были рассчитаны по следующим формулам:

$$Bias = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (P_i - O_i); \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}; \quad (2)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i}; \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2)}}, \quad (4)$$

где N – общее количество данных; P_i – прогноз; O_i – наблюдение; \bar{P} – среднее значение по прогнозу; \bar{O} – среднее значение по наблюдениям.

Перечисленные статистические характеристики являются стандартными в практике оценки прогнозов [18] и наиболее широко используемыми, что позволяет сопоставлять полученные результаты с расчетами, выполненными в работах других авторов. Однако стоит отметить, что в общем случае пара случайных величин «прогноз – наблюдение» образует двумерное распределение, из которого могут быть получены условные распределения и другие статистики более высокого порядка, позволяющие анализировать структуру ошибок. Подобные методы анализа совместных распределений подробно рассматривались в работах [3, 4, 14]. Данный подход представляется перспективным направлением для будущих исследований.

Также для гидрометеорологических прогнозов часто используется показатель оправдываемости [18], который определяется как «степень соответствия диапазона (градации) прогнозируемого значения метеорологической величины (с учетом допуска) фактически наблюдавшемуся значению

метеорологической величины, выраженная в процентах». Для расчета оправдываемости в настоящем исследовании в качестве допустимой ошибки прогноза была принята величина, равная 30 % от наблюдаемой высоты волны. То есть прогноз считался оправдавшимся, если

$$\frac{o_i - P_i}{o_i} \cdot 100 \leq 30, \quad (5)$$

Причем, согласно [18], прогноз считается оправдавшимся при любой наблюдаемой высоте волн от 0 до 0.25 м, так как в данном исследовании рассматривается акватория бухты.

Результаты

Общий объем статистической выборки для анализа точности прогноза составил 11 559 пар значений «модель – измерение» для значимой высоты волн. На рис. 2 показаны модельные и измеренные временные ряды для заблаговременности 15 часов и 63 часа. За весь период доступных инструментальных наблюдений средняя высота значительных волн в акватории Цемесской бухты составила 0.35 м при медианном значении 0.22 м, что указывает на преобладание слабого волнения. В течение анализируемого интервала времени было зарегистрировано три синоптических события, когда высота волн превышала 2 м. Анализ высоты волн согласуется с режимом волнения для всего Черного моря и с его сезонными особенностями [25, 26, 28]. Наиболее высокие волны наблюдались в зимние месяцы (декабрь–февраль), а минимальные значения высоты волн были характерны для летнего периода (июнь–август).

При анализе рис. 2 видно, что модель воспроизводит основные события, однако занижает высоту волн. С увеличением заблаговременности занижение становится больше.

Далее для каждой заблаговременности прогноза были рассчитаны статистические характеристики: MAE, RMSE, Bias, SI, R. Их значения представлены на рис. 3 и в таблице.

Анализ точности прогноза показал, что в среднем ошибка RMSE составляет 0.17–0.22 м, коэффициент корреляции 0.85–0.9, а систематическая ошибка всегда отрицательная -0.09 – -0.13 м. При заблаговременности 15 часов наблюдается повышение точности прогноза: значения MAE (0.12 м) и RMSE (0.17 м) уменьшаются, систематическое смещение составляет -0.09 м, а индекс рассеяния снижается до 0.48 при сохранении высокой корреляции с измерениями (0.9).

Следует отметить, что более высокое качество прогнозов наблюдается также для заблаговременностей 39 часов и 63 часа (кратно 15+24 и 15+48). Вероятно, это связано с усвоением данных измерений атмосферной моделью и, как следствие, неравномерным качеством прогноза ветра с увеличением заблаговременности, либо с бризовой циркуляцией, имеющей суточную цикличность, которая глобальной моделью плохо воспроизводится.

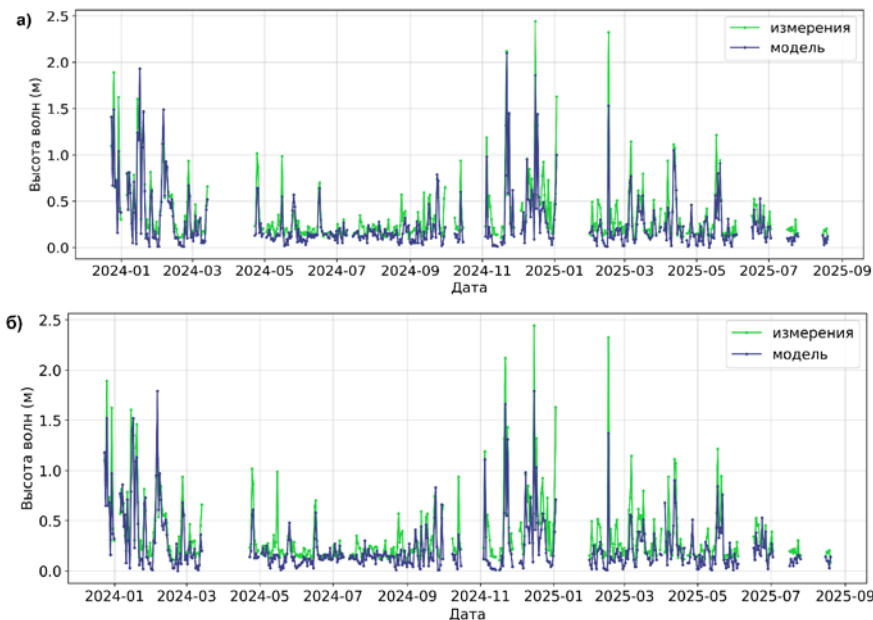


Рис. 2. Временные ряды высоты волн по результатам измерений и моделирования: заблаговременность 15 ч (а); 63 ч (б).

Fig. 2. Time series of wave height from measurements and model results: lead time of 15 h (a); 63 h (b).

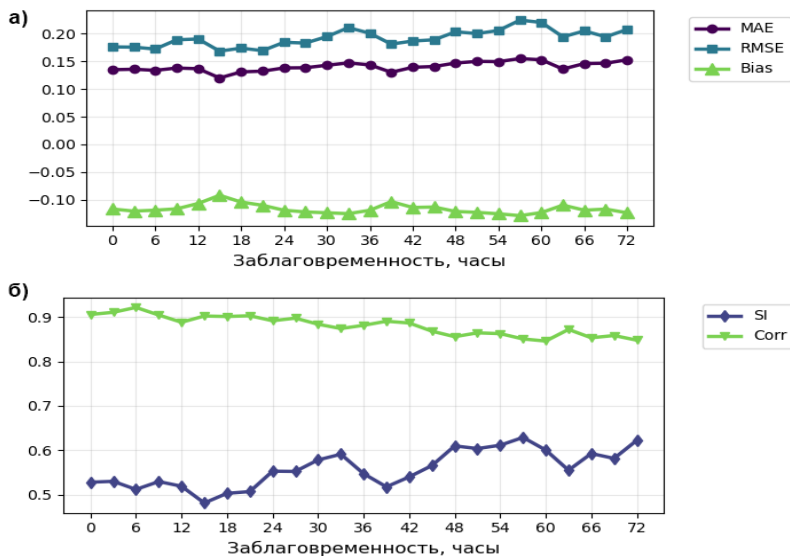


Рис. 3. Значения метрик качества прогноза (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) в зависимости от заблаговременности прогноза.

Fig. 3. Forecast quality metrics (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) for different forecast lead times.

Таблица. Значения метрик качества прогноза (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) в зависимости от заблаговременности прогноза. Выделены минимальные значения ошибок и максимальная корреляция

Table. Forecast quality metrics (MAE, RMSE, BIAS, SI, R) for different forecast lead times. Minimum error values and the maximum correlation are highlighted

Заблаговременность, часы	Кол-во пар	MAE	RMSE	Bias	SI	R
0	456	0.13	0.18	-0.12	0.53	0.91
3	461	0.14	0.18	-0.12	0.53	0.91
6	465	0.13	0.17	-0.12	0.51	0.92
9	466	0.14	0.19	-0.12	0.53	0.90
12	465	0.14	0.19	-0.11	0.52	0.89
15	462	0.12	0.17	-0.09	0.48	0.90
18	464	0.13	0.17	-0.10	0.50	0.90
21	462	0.13	0.17	-0.11	0.51	0.90
24	456	0.14	0.18	-0.12	0.55	0.89
27	461	0.14	0.18	-0.12	0.55	0.90
30	465	0.14	0.19	-0.12	0.58	0.88
33	466	0.15	0.21	-0.13	0.59	0.87
36	465	0.14	0.20	-0.12	0.55	0.88
39	462	0.13	0.18	-0.10	0.52	0.89
42	464	0.14	0.19	-0.11	0.54	0.89
45	462	0.14	0.19	-0.11	0.57	0.87
48	456	0.15	0.20	-0.12	0.61	0.86
51	461	0.15	0.20	-0.12	0.60	0.86
54	465	0.15	0.21	-0.13	0.61	0.86
57	466	0.16	0.22	-0.13	0.63	0.85
60	465	0.15	0.22	-0.12	0.60	0.85
63	462	0.14	0.19	-0.11	0.55	0.87
66	464	0.15	0.20	-0.12	0.59	0.85
69	462	0.15	0.19	-0.12	0.58	0.86
72	456	0.15	0.21	-0.12	0.62	0.85

При увеличении заблаговременности наблюдается ухудшение качества прогноза. Следует отметить, что коэффициент рассеяния меняется от 0.48 до 0.62, что является не очень хорошим результатом. Однако в данном случае волнение, как правило, слабое – среднее значение 0.3 м для всей выборки, и модель при слабом ветре работает неустойчиво, тем более что имеют место локальные ветровые эффекты.

Диаграммы рассеяния для заблаговременностей 15, 39 и 63 часов показаны на рис. 4.

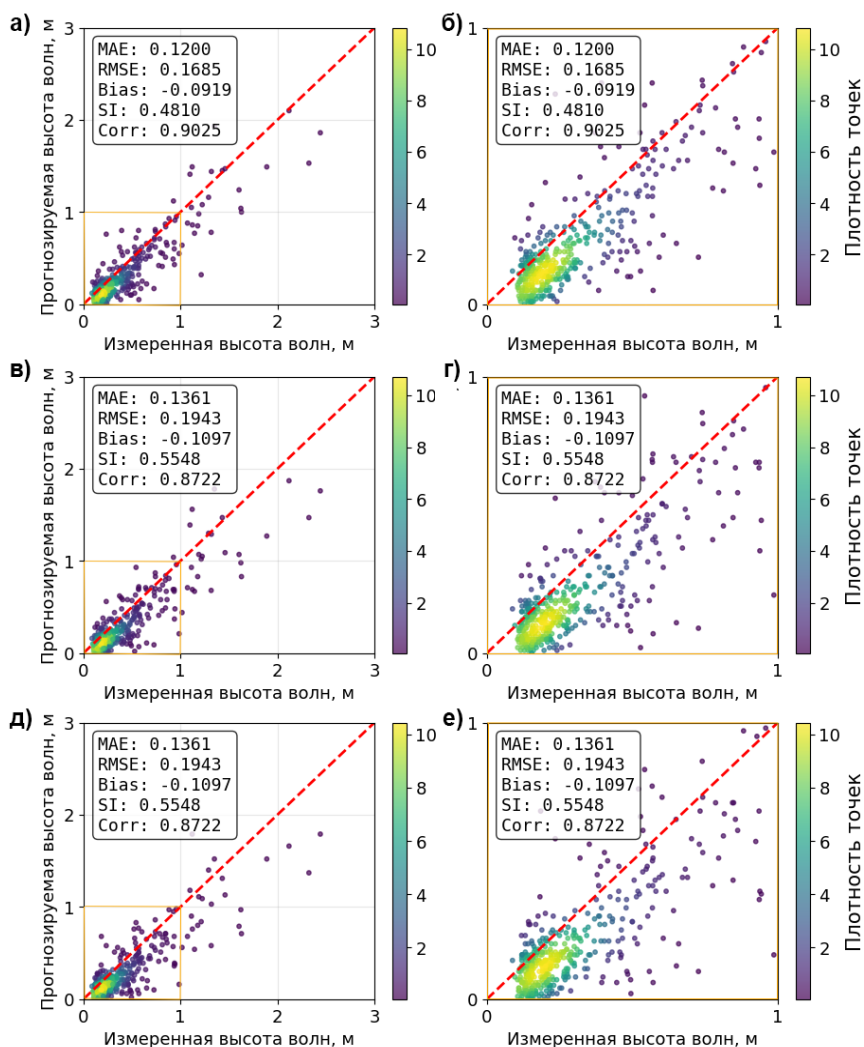


Рис. 4. Плотностные диаграммы рассеяния: для всего диапазона высот (а, в, д); для высот до 1 м (б, г, е). Заблаговременность прогноза: 15 ч (а, б); 39 ч (в, г); 63 ч (д, е).

Fig. 4. Density scatter plots: for the full range of wave heights (a, в, д); for heights up to 1 m (б, г, е). Forecast lead times: 15 h (а, б); 39 h (в, г); 63 h (д, е).

Количественная оценка изменений при переходе заблаговременности от 15 к 63 часам показывает, что абсолютное значение смещения (BIAS) возрастает на 22 %, средняя абсолютная ошибка (MAE) увеличивается на 17 %, индекс рассеяния (SI) – на 15 %, а среднеквадратичная ошибка (RMSE) – на 12 %. При этом корреляция (R) снижается незначительно –

всего на 3 %. Таким образом, для большинства метрик ухудшение не превышает 10–20 %, что подтверждает сохранение моделью удовлетворительной прогностической способности даже на срок около трех суток.

Оценка оправдываемости прогнозов волнения показала, что с увеличением заблаговременности доля верных прогнозов снижается. Для краткосрочного прогноза на 15 часов оправдываемость составила 80.5 %. На сутки (24 часа) этот показатель остается высоким – 77.2 %, а для прогноза на двое суток (48 часов) доля оправдавшихся прогнозов равна 75.4 %.

Для выявления зависимости точности прогнозов от абсолютных значений высоты волн все статистические метрики были отсортированы по высоте волн. На рис. 5 показаны значения MAE, RMSE, SI, BIAS для прогноза на 1 и 2 суток для диапазонов высоты волн с шагом 0.5 м.

Для слабого волнения (0–0.5 м) прогнозы всех заблаговременностей демонстрируют максимальную относительную ошибку: индекс рассеяния (SI) достигает 57–63 %, что свидетельствует о низкой точности прогноза в этом диапазоне. При этом систематическое смещение стабильно составляет около -0.09 м, указывая на постоянную недооценку высоты волн.

Для высоты волн в диапазоне (0.5–1.5 м) наблюдается улучшение показателей: SI снижается до 30–44%. Однако абсолютные ошибки возрастают - MAE увеличивается до 0.20–0.40 м, а систематическая ошибка увеличивается до -0.15 – -0.32 м.

Для высоты волн более 1.5 м модель показывает относительную точность с SI 28–38 % для всех исследуемых заблаговременностей, но RMSE и BIAS возрастают. При высотах свыше 2 метров абсолютная ошибка MAE достигает 0.66–0.83 м, а систематическая ошибка -0.60 – -0.83 м, что означает недооценку фактической высоты волн на 25–35%.

Для заблаговременности 72 часа сохраняются те же тенденции, что и для заблаговременности для 15 часов, но систематическая ошибка для высоты волн более 2 м увеличивается до -0.8 м, а RMSE возрастает до 0.9.

Однако следует отметить, что в имеющейся выборке было всего 17 значений для высоты волн более 2 м, и это были всего три синоптические ситуации. Соответственно, полученный результат не обеспечен статистически. С другой стороны, возможное занижение высоты волн моделью необходимо учитывать при принятии практических решений.

Таким образом, наблюдается существенное занижение прогностической моделью высоких для рассматриваемой акватории волн, что требует отдельной оценки причин этих ошибок и дополнительной калибровки модели.

На следующем этапе работы были выполнены оценки качества прогнозов для разных сезонов года. В данной работе под сезонами понимаются следующие: зима (декабрь–февраль), весна (март–май), лето (июнь–август), осень (сентябрь–ноябрь). Анализ сезонных особенностей прогноза представлен на рис. 6.

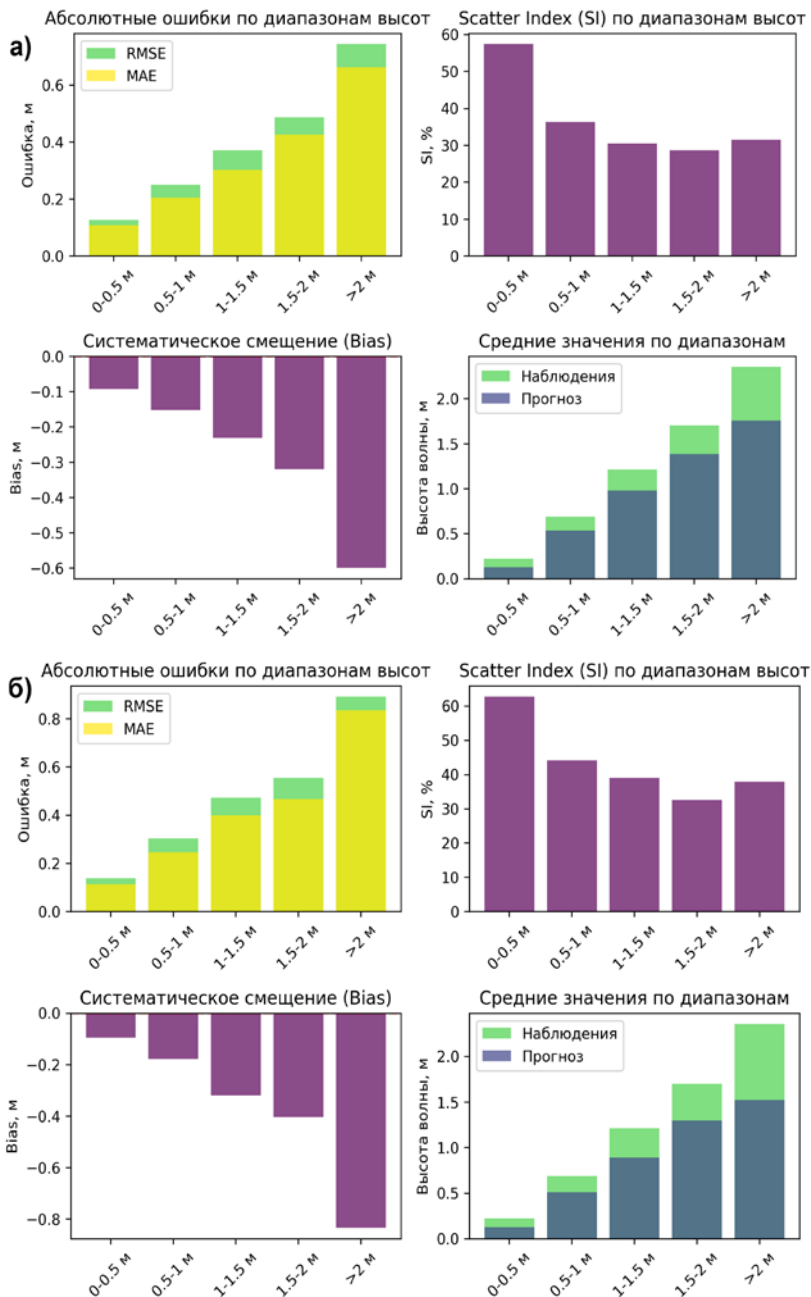


Рис. 5. Статистические параметры в зависимости от высоты волн для заблаговременности: 24 ч (а); 72 ч (б).

Fig. 5. Statistical parameters by wave height for forecast lead times of 24 h (a) and 72 h (б).

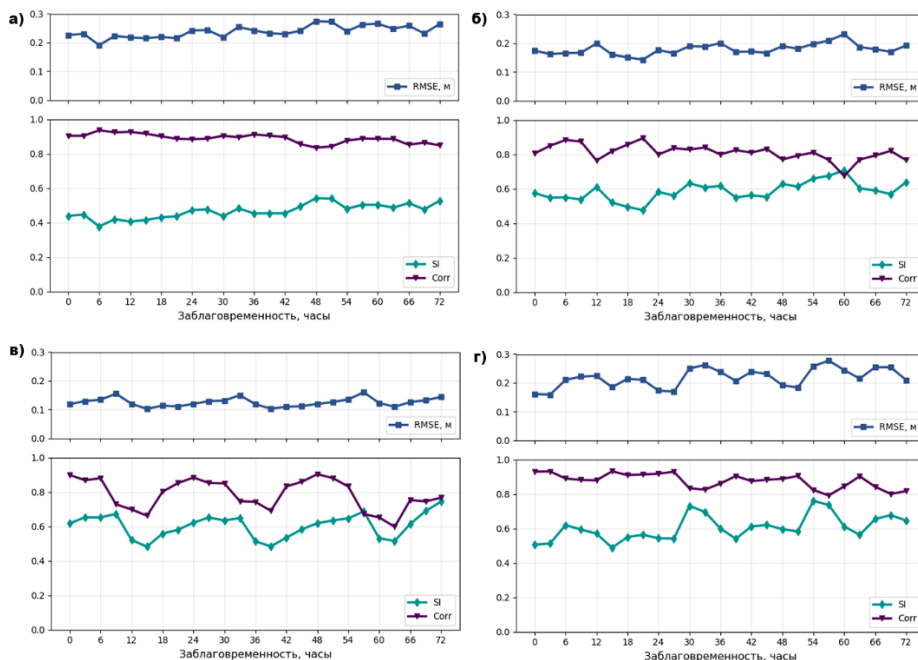


Рис. 6. Анализ сезонных особенностей прогноза: зима (а); весна (б); лето (в); осень (г).

Fig. 6. Analysis of seasonal forecast characteristics: winter (а); spring (б); summer (в); autumn (г).

Зимой модель показывает стабильное качество прогноза с высокой корреляцией (0.83–0.94) и умеренными ошибками (MAE 0.15–0.20 м). При заблаговременности 6 часов ошибки снижаются (MAE 0.15 м, RMSE 0.19 м) при высокой связи с измерениями (R 0.94). Систематическая ошибка находится в диапазоне -0.11 – -0.15 м. Весной точность прогноза уменьшается: корреляция снижается до 0.67–0.89, а относительные ошибки (SI) увеличиваются до 47–71 %. На 60-м часу прогноза наблюдается рост ошибок (SI 0.71) и ослабление связи с наблюдениями (R 0.68). При этом абсолютные ошибки (MAE 0.11–0.15 м) остаются меньше зимних значений, что связано с пониженной средней высотой волн. Летом при относительно небольших абсолютных ошибках (MAE 0.08–0.12 м) наблюдается снижение корреляции (0.6–0.9) и увеличение индекса рассеяния (SI 0.48–0.74). На 63-м часу прогноза фиксируется дальнейшее уменьшение корреляции (R 0.6) при SI 0.52. Осенью точность прогноза варьируется: на 3-м часу ошибки уменьшаются (MAE 0.14 м) при высокой корреляции (R 0.93), а к 57-му часу наблюдается рост ошибок (MAE 0.19 м, SI 0.74). Корреляция сохраняется в пределах 0.79–0.93.

Необходимо отметить, что повышение качества прогнозов для заблаговременности 15 часов, полученное для всей выборки, характерно только

для лета и в меньшей степени для осени. Именно в летний период в рассматриваемой акватории наблюдаются бризы, которые имеют суточную цикличность и могут генерировать в бухте волны с высотой до 0.8 м.

Таким образом, качество прогнозов выше в осенне-зимний период, тогда как в весенне-летний сезон точность существенно снижается, особенно в относительных показателях. Это связано с более качественным прогнозом ветра во время штормовых событий в зимнее время, тогда как в летний период преобладают локальные ветровые эффекты, которые глобальная атмосферная модель воспроизводит хуже. С другой стороны, для практического использования наиболее востребованы прогнозы именно в осенне-зимний период.

Анализ влияния ветровых условий на точность прогноза

Как уже было отмечено, результаты прогноза волнения главным образом зависят от поля скорости ветра, задаваемого в модели (далее форсинг). На рис. 7 показано сопоставление рядов скорости ветра из GFS и полученного автоматической метеостанцией для заблаговременности 15 часов.

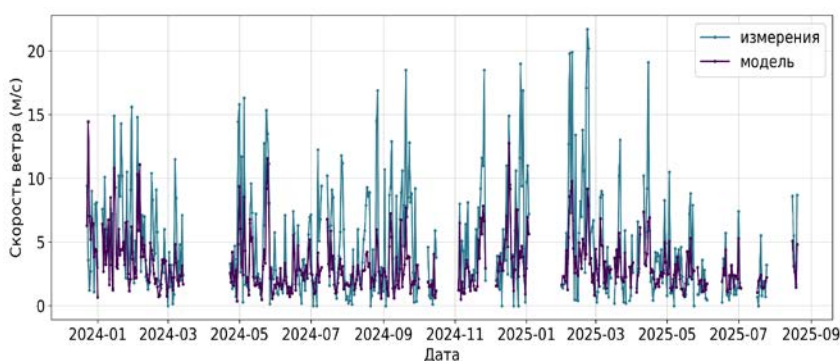


Рис. 7. Скорость ветра по данным измерений и по прогнозу на 15 часов.

Fig. 7. Comparison of measured and 15-hour forecast wind speeds.

Анализ прогнозов скорости ветра GFS показал его удовлетворительное качество с коэффициентом корреляции около 0.7, однако, как и для волн, наблюдается систематическое занижение скорости ветра.

Ввиду особенности положения анализируемой точки (подножие гор, новороссийская бора) было исследовано влияние двух вариантов направления ветра на ошибки прогноза волнения:

1. Ветер с суши (сектор 300–120°): на эту категорию приходится 59.1 % случаев.
2. Ветер с моря (сектор 120–300°): на эту категорию приходится 40.9 % случаев.

На рис. 8 показаны диаграммы рассеяния для высоты волн при разных направлениях ветра (с моря и с суши) для заблаговременности 15 часов.

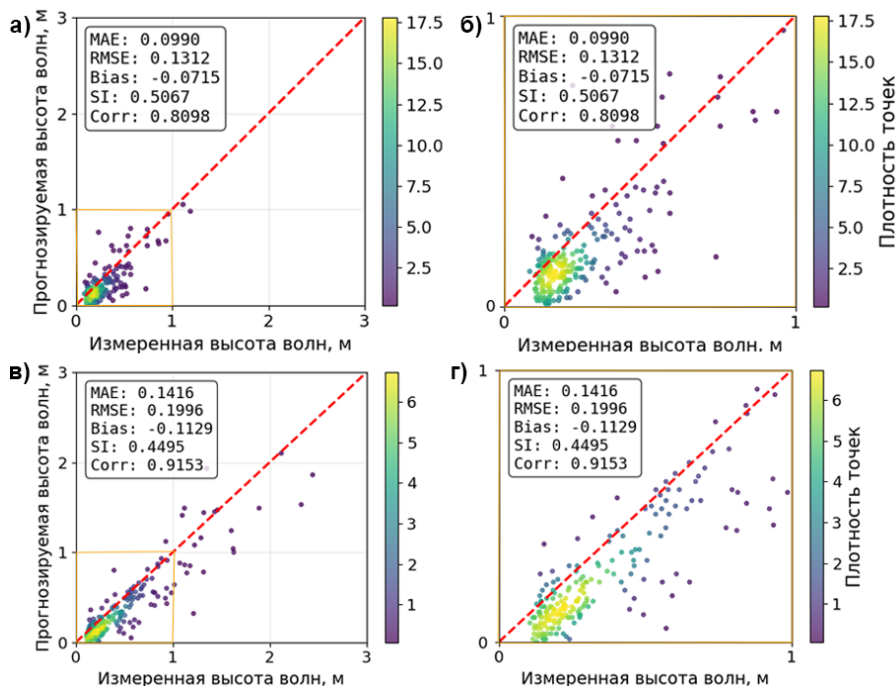


Рис. 8. Плотностные диаграммы рассеяния для высот волн заблаговременностью 15 часов: при ветре с суши (а, б); при ветре с моря (в, г).

Fig. 8. Density scatter plots of wave heights for a 15-hour forecast: with onshore wind (а, б); with offshore wind (в, г).

Сравнительный анализ метрик для различных направлений ветра при заблаговременности прогноза 15 часов демонстрирует существенную зависимость качества прогноза модели от ветровых условий. При ветре с моря модель показывает более высокую корреляцию (0.92 против 0.81) и лучший SI (0.44 против 0.51), что указывает на более точное воспроизведение динамики волнения. Однако в этом режиме наблюдается большее систематическое занижение результатов (BIAS -0.11 против -0.07), что объясняется разницей в высоте волн. При ветре с суши разгон в бухте небольшой. Это приводит к повышенным значениям ошибок MAE (0.14 против 0.1) и RMSE (0.2 против 0.13). Таким образом, модель лучше предсказывает волны, приходящие с моря при соответствующих направлениях ветра.

Обсуждение и заключение

На основе проведенного исследования выполнена комплексная оценка качества прогноза волнения в Цемесской бухте, выполненная с использованием модели WAVEWATCH III и ветрового форсинга GFS. Показано, что система демонстрирует удовлетворительное качество прогнозов во всем исследуемом диапазоне заблаговременности (0–72 часа). Высокое качество прогнозов наблюдается при заблаговременности 15 часов, где

зафиксированы минимальные значения ошибок (MAE 0.12 м, RMSE 0.17 м) и систематической ошибки (-0.09 м) при сохранении высокой корреляции с измерениями (0.9). При увеличении заблаговременности точность прогнозов снижется.

Для слабого волнения (0–0.5 м) наблюдаются максимальные относительные ошибки (SI 57–63 %) при систематической ошибке около -0.09 м. С ростом высоты волн относительная точность улучшается: для волнения (0.5–1.5 м) SI снижается до 30–44 %, а для волнения (>1.5 м) достигает минимальных значений (28–38 %). Однако абсолютные ошибки возрастают с увеличением высоты волн, достигая значений MAE 0.66–0.83 м и смещения -0.6 – -0.83 м для волн высотой более 2 метров.

Сезонный анализ демонстрирует более высокое качество прогнозов в осенне-зимний период с корреляцией 0.79–0.94 и умеренными ошибками. В весенне-летний сезон точность существенно снижается, особенно в относительных показателях, что связано с преобладанием слабого волнения и увеличением доли мезомасштабных процессов в ветровом режиме.

Полученные результаты согласуются с выводами предыдущих исследований, согласно которым ключевым источником ошибок в прогнозе волнения является качество ветрового форсинга. Систематическое занижение скорости ветра моделью GFS закономерно приводит к занижению прогнозируемых высот волн.

Исследование влияния ветровых условий подтвердило определяющую роль качества ветрового форсинга. Более высокая точность прогноза при ветрах с моря по сравнению с ветрами с суши объясняется лучшей воспроизводимостью крупномасштабных синоптических процессов в модели GFS.

Кроме того, в рамках исследования был проведен сравнительный анализ различных подходов к временному агрегированию данных. Помимо основного метода сравнения, основанного на интерполяции измеренных значений на трехчасовые прогностические сроки, выполнялась оценка с использованием часовых осреднений измеренных значений. Данный подход не показал статистически значимого улучшения метрик качества по сравнению с методом интерполяции, что свидетельствует о достаточности стандартной методики сопоставления для оперативной оценки качества прогнозов. Это также подтверждает, что основные источники ошибок связаны с фундаментальными ограничениями модели, а не с методами временного сопоставления данных.

Выявленные закономерности позволяют рекомендовать использование прогнозов с оптимальной заблаговременностью 15 часов для решения практических задач портовой деятельности и судоходства.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего совершенствования системы прогноза, в первую очередь за счет использования региональных атмосферных моделей для задания ветрового форсинга и специальной калибровки параметризаций для экстремальных

высот волн. Выявленные закономерности могут быть использованы для оптимизации оперативного прогнозирования волнения в акватории Цемесской бухты.

Моделирование выполнено С.А. Мысленковым в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121031900090-6). Обработка данных выполнена А.Д. Рыбалко в рамках Госзадания FMWE-2025-0002.

Список литературы

1. *Большая российская энциклопедия*. Цемесская бухта. URL: <https://bigenc.ru/>.
2. *Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Типичная ветрового волнения Черного моря по инструментальным данным // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 2. С. 289-297.
3. *Бухановский А.В., Лопатухин Л.И.* Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 4. С. 5-17.
4. *Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышева Е.С.* Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей. II. Расчет волнения по гидродинамическим моделям, режимные распределения и климатические спектры волн // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Науки о Земле. 2005. № 4. С. 56-69.
5. *Гавриков А.В., Иванов А.Ю.* Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51, № 5. С. 615-615.
6. *Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С.* Многолетняя изменчивость штормового волнения на Черном море по результатам моделирования // *Вестник Московского университета*. Серия 5. География. 2017. № 1. С. 38-47.
7. *Дивинский Б.В., Куклев С.Б.* Климатические колебания некоторых волновых параметров на входе в Новороссийскую бухту // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 2. С. 186-193.
8. *Евстигнеев В.П. и др.* Неопределенность оценки ветроэнергетического потенциала Азово-Черноморской прибрежной зоны вследствие климатических изменений ветрового режима // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 22-39.
9. *Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С.* Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане // *Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2016. Информационный сборник № 43. С. 133-147.
10. *Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л.* Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // *Труды Государственного океанографического института*. 2014. № 215. С. 90-101.
11. *Зеленько А.А., Мысленков С.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зайченко М.Ю.* Комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 8. С. 20-35.
12. *Иванов А.Ю.* Новороссийская бора: взгляд из космоса // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 2. С. 68-83.
13. *Крыленко В.В., Косьян Р.Д., Крыленко М.В.* Берега северо-западной части Черноморского побережья Кавказа в начале XXI века // *Океанологические исследования*. 2021. Т. 49, № 1. С. 68-92. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).5.
14. *Лопатухин Л.И.* Ветро-волновой климат Каспийского моря // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47, № 5. С. 89-97.
15. *Мысленков С.А.* О влиянии локального ветрового воздействия на высоту волн в Цемесской бухте Черного моря // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 7-2 (61). С. 42-47.

16. Мысленков С. А., Шестакова А. А., Торопов П. А. Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря с использованием различного ветрового форсинга // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 61–71.
17. Мысленков С. А., Столярова Е. В., Архипкин В. С. Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. Информационный сборник № 44. С. 126-135.
18. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. РД 52.27.759–2011. 201 с.
19. Ратнер Ю.Б., Фомин В.В., Холод А.Л., Иванчик А.М. Модернизированная система оперативного прогноза морского волнения Черноморского центра морских прогнозов // Морской гидрофизический журнал. 2021. № 5 (221). С. 623-640. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-5-623-640
20. Ратнер Ю. Б., Фомин В. В., Иванчик А. М., Иванчик М. В. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5 (197). С. 56-66. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-5-56-66.
21. Рыбалко А. Д., Мысленков С. А., Архипкин В. С. Анализ пространственно-временной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях // Метеорология и гидрология. 2024. № 12. С. 37-47.
22. Рыбалко А. Д., Мысленков С. А., Архипкин В. С. Использование классификации для анализа сезонной изменчивости спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 24-40.
23. Столярова Е. В., Мысленков С. А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 354. С. 24-35.
24. Торопов П. А., Мысленков С. А., Самсонов Т. Е. Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 2. С. 38-46.
25. Akpınar A., Bingölbali B., Van Vledder G. P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds // Ocean Engineering. 2016. Vol. 126. P. 276-298.
26. Arkhipkin V.S. et al. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014. Vol. 14, no. 11. P. 2883-2897.
27. Bidlot J. R., Holt M. W. Verification of Operational Global and Regional Wave Forecasting Systems against Measurements from Moored Buoys // JCOMM Technical Report. 2006. No. 30. 15 p.
28. Divinsky B. V., Kubryakov A. A., Kosyan R. D. Interannual variability of the wind-wave regime parameters in the Black Sea // Physical Oceanography. 2020. Vol. 27, no. 4. P. 337-351.
29. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Bayankina T. M. Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk // Physical Oceanography. 2019. Vol. 26, no. 5. P. 361-373. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.
30. Myslenkov S., Zelenko A., Resnyanskii Y., Arkhipkin V., Silvestrova K. Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 13099.
31. Ricker M., Behrens A., Staneva J. The operational CMEMS wind wave forecasting system of the Black Sea // Journal of Operational Oceanography. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 165-186.
32. WW3DG (The WAVEWATCH III® Development Group). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III® Version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 465 p.

References

1. *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya*. Tsemesskaya bukhta. Available at: <https://bigenc.ru/> [in Russ.].

2. Bukhanovskii A.V., Divinski, B.V., Kos'yan R.D., Lopatukhin L.I., Rozhkov, V.A. Tipizatsiya vetrovogo volneniya Chernogo morya po instrumental'nym dannym. *Okeanologiya [Oceanology]*. 2000, vol. 40, no. 2, pp. 289-297 [in Russ.].
3. Boukhanovsky A.V., Lopatukhin L.I. Extreme and Freak Wind Waves: Measurements, Calculation, Forecast. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika [Fundamental and Applied Hydrophysics]*. 2011, vol. 4, no. 4, pp. 5-17 [in Russ.].
4. Bukhanovskii A.V., Lopatukhin L.I., Chernysheva E.S. Podkhody, opyt i nekotorye rezul'taty issledovaniya volnovogo klimata okeanov i morei. II. Raschet volneniya po gidrodinamicheskim modelyam, rezhimnye raspredeleniya i klimaticheskie spektry voln. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle [Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences]*. 2005, no. 4, pp. 56-69 [in Russ.].
5. Gavrikov A.V., Ivanov A.Y. Anomalously strong bora over the Black sea: observations from Space and Numerical modeling. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2015, vol. 51, no. 5, pp. 546-556.
6. Gippius F.N., Arkhipkin V.S. Interannual variability of storm waves in the Black sea according to numerical modeling results. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]*. 2017, no. 1, pp. 38-47 [in Russ.].
7. Divinskii B.V., Kuklev S.B. Climate Variations of Certain Wave Parameters at the Entrance of the Novorossiysk Bay. *Okeanologiya [Oceanology]*. 2022, vol. 62, no. 2, pp. 186-193 [in Russ.].
8. Evstigneev V.P., Lemesheko N.A., Naumova V.A., Evstigneev M.P. Climate Change Induced Uncertainty of Wind Energy Potential for the Azov and Black Seas Coastal Zone. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*. 2020, no. 4, pp. 22-39 [in Russ.].
9. Zelenko A.A., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S. Rezul'taty ispytaniy sistemy prognozirovaniya vetrovogo volneniya v Mirovom okeane. *Rezul'taty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Informatsionnyy sbornik, 2016, no. 43, pp. 133-147 [in Russ.].
10. Zelenko A.A., Strukov B.S., Resnyanskii, Y.D., Martynov S.L. Sistema prognozirovaniya vetrovogo volneniya v Mirovom okeane i moryakh Rossii. *Trudy GOIN [Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute]*. 2014, no. 215, pp. 90-101 [in Russ.].
11. Zelenko A.A., Myslenkov S.A., Resnyanskii Y.D., Strukov B.S., Zaichenko M.Yu. Integrated System for Wind Wave Forecasting in the World Ocean and Russian Seas. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2024, vol. 49, no. 8, pp. 669-680. DOI: 10.3103/S1068373924080028.
12. Ivanov A.Yu. Novorossiyskaya bora: vzglyad iz kosmosa. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*. 2008, no. 2, pp. 68-83 [in Russ.].
13. Krylenko V.V., Kos'yan R.D., Krylenko M.V. The coasts of the Caucasian North-Western part of the Black sea at the beginning of the XXI century. *Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological Research]*. 2021, vol. 49, no. 1, pp. 68-92. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).5 [in Russ.].
14. Lopatukhin L.I. Caspian sea wind and wave climate. *Okeanologicheskie issledovaniya [Oceanological Research]*. 2019, vol. 47, no. 5, pp. 89-97 [in Russ.].
15. Myslenkov S.A. On Effect of Local Wind Influence on Wave Height in Tsemes Bay of the Black Sea. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]*. 2017, no. 7-2 (61), pp. 42-47 [in Russ.].
16. Myslenkov S.A., Shestakova A.A., Toropov P.A. Numerical simulation of storm waves near the northeastern coast of the Black Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, vol. 41, no. 10, pp. 706-713. DOI: 10.3103/S106837391610006X.
17. Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Arkhipkin V.S. Sistema prognoza vetrovogo volneniya v Chernom more s detalizatsiei v shelfovykh zonakh. *Rezul'taty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, Informatsionnyy sbornik no. 44, 2017, pp. 126-135 [in Russ.].
18. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. RD 52.27.759-2011. Moscow, 2011, 201 p. [in Russ.].
19. Ratner Yu.B., Fomin V.V., Ivanchik A.M., Ivanchik M.V. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*. 2021, vol. 28, no. 5, pp. 579-595. DOI: 10.22449/1573-160X-2021-5-579-595

20. Ratner Yu.B., Fomin V.V., Ivanchik A.M., Ivanchik M.V. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*. 2017, no. 5, pp. 51-59. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-5-51-59.

21. Rybalko A.D., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. Analysis of the Spatiotemporal Variability of Wind Wave Frequency Spectra in the Black Sea and the Sea of Azov. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2024, vol. 49, no. 12, pp. 1052-1060. DOI: 10.3103/S1068373924120033

22. Rybalko A.D., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S. Analysis of seasonal variability in wind wave spectra in the Black and Azov seas based on classification. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2024, vol. 391, no. 1, pp. 24-40 [in Russ.].

23. Stoliarova E.V., Myslenkov S.A. High resolution wave forecast system in Kerch strait. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*. 2015, no. 354, pp. 24-35 [in Russ.].

24. Toropov P.A., Myslenkov S.A., Samsonov T.E. Chislennoe modelirovanie novorossiiskoi bory i svyazannogo s nei vetrovogo volneniya. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]*. 2013, no. 2, pp. 38-46 [in Russ.].

25. Akpinar A., Bingölbali B., Van Vledder G.P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds. *Ocean Engineering*. 2016, vol. 126, pp. 276-298.

26. Arkhipkin V.S. et al. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014, vol. 14, no. 11, pp. 2883-2897.

27. Bidlot J.R., Holt M.W. Verification of Operational Global and Regional Wave Forecasting Systems against Measurements from Moored Buoys. *JCOMM Technical Report*. 2006, no. 30, 15 p.

28. Divinsky B.V., Kubryakov A.A., Kosyan R.D. Interannual variability of the wind-wave regime parameters in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 337-351.

29. Efimov V.V., Komarovskaya O.I., Bayankina T.M. Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk. *Physical Oceanography*. 2019, vol. 26, no. 5, pp. 361-373. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.

30. Myslenkov S., Zelenko A., Resnyanskii Y., Arkhipkin V., Silvestrova K. Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis. *Sustainability*. 2021, vol. 13, p. 13099.

31. Ricker M., Behrens A., Staneva J. The operational CMEMS wind wave forecasting system of the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*. 2024, vol. 17, no. 3, pp. 165-186.

32. WW3DG (The WAVEWATCH III® Development Group). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III® Version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. College Park, MD, USA, 465 p.

Поступила 16.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 16.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-114-128>

УДК 556.06

Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование уровней воды на реках России на основе статистических методов

**Ю.А. Симонов¹, А.В. Христофоров¹, Н.М. Юмина¹,
Н.К. Семенова¹, И.С. Волов¹, А.И. Шевченко²**

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

²*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической
информации – Мировой центр данных, г. Обнинск, Россия
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru, ashevchenko@meteo.ru*

Предлагается набор методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды на реках России. В методах используются данные наблюдений на речных гидрологических постах. Прогноз выражается в виде линейной зависимости от наблюдавшихся уровней воды и корректируется путем замены его экстремальных значений допустимым минимумом или максимумом.

В первом методе экстраполяции гидрографа учитываются только уровни воды, наблюдавшиеся в прогнозируемом створе. Во втором более общем методе дополнительно учитываются уровни воды, наблюдавшиеся в речном створе, расположенном выше по течению. В третьем еще более общем методе дополнительно учитываются уровни воды, наблюдавшиеся в створе, расположенном на притоке. Проверка методов на независимом материале показала, что каждый из них может давать удовлетворительные прогнозы для большого количества речных створов. Даны рекомендации по внедрению представленных методик в практику оперативных гидрологических прогнозов Росгидромета.

Ключевые слова: речной створ, уровень воды, краткосрочный и среднесрочный прогноз, качества прогноза, выбор метода

Short- and medium-range forecasting of water levels on Russian rivers based on statistical methods

**Yu.A. Simonov¹, A.V. Khristoforov¹, N.M. Yumina¹,
N.K. Semenova¹, I.S. Volov¹, A.I. Shevchenko²**

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

²*All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information –
World Data Center (RIHMI-WDC), Obninsk, Kaluzhsky region, Russia
simonov@mecom.ru, khristoforov_a@mail.ru, ashevchenko@meteo.ru*

A set of methods for short- and medium-range forecasting of water levels on Russian rivers is proposed. The methods utilize observation data from stream gages. The forecast is expressed as a linear function of observed water levels and is adjusted by replacing its extreme values with an acceptable minimum or maximum.

The first method of hydrograph extrapolation takes into account only water levels observed at the forecast gage. The second, more general method additionally takes into account water levels observed at an upstream gage. The third, even more general method additionally takes into account water levels observed at a tributary gauge. Validation of these methods using independent data showed that each can produce satisfactory forecasts for a great number of river gages. Recommendations for implementing the presented methods in Roshydromet's operational hydrological forecasting practices are provided.

Keywords: stream gage, water level, short- and medium-range forecast, forecast quality, choice of method

Введение

Увеличение точности и заблаговременности гидрологических прогнозов и расширение сферы их применения необходимо в целях повышения эффективности использования и охраны водных ресурсов и защиты населения и хозяйственных объектов от участвовавших в последние годы наводнений, вызванных интенсивным снеготаянием и дождевыми паводками [8, 17, 20].

Важная роль при этом отводится ежедневно выпускаемым краткосрочным и среднесрочным прогнозам расходов и уровней воды в речных створах с заблаговременностью от 1 до 5 суток и от 6 до 10 суток соответственно.

В настоящее время существует весьма обширный набор методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования речного стока. Эти методы в той или иной степени учитывают закономерности формирования стока на водосборе и движения воды в русловой сети. Они реализуются в виде физико-математических и концептуальных моделей или в виде статистических зависимостей прогнозируемой величины от известных к дате составления прогноза гидрологических и метеорологических характеристик [5, 8, 11, 16, 18].

Для разработки автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов целесообразно использование максимально простого и универсального метода, который позволял бы устойчиво получать с достаточной точностью ежедневные прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды в течение всего года. В связи с этим для получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов речного стока в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработан набор методов, основанных на использовании данных гидрологических наблюдений на реках и каналах наблюдательной сети Росгидромета.

Постановка задачи

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на основе метода экстраполяции гидрографа разработана методика получения краткосрочных (с заблаговременностью 1–5 суток) и среднесрочных (с заблаговременностью 6–10 суток) прогнозов уровней

воды на реках России. Методика реализована для 2776 речных створов и используется в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов и доведения прогностической продукции до всех заинтересованных потребителей [2, 3, 13]. Расположение прогнозируемых створов показано на рисунке.

Анализ результатов верификации прогнозов показал, что метод экстраполяции гидрографа, и реализующая его автоматизированная система, позволяет получать удовлетворительные прогнозы уровней воды для достаточно крупных рек с плавным изменением этих характеристик. Отнесение прогнозов к категории удовлетворительных выполнялось в соответствии с Наставлением [6]. В частности, удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью 10 суток могут выпускаться более чем для 200 речных створов.

В табл. 1 приведено относительное число речных створов с удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности.

Таблица 1. Относительное число речных створов с удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности

Table 1. Relative number of river gauges with satisfactory forecasts of varying lead times

Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительное число створов, %	45	33	25	20	17	14	12	11	9	8

В методе экстраполяции гидрографа прогноз среднесуточного уровня воды выражается в виде линейной зависимости от среднесуточных уровней воды, относящихся к дате составления прогноза и к нескольким предыдущим суткам. В настоящей работе рассматривается возможность и целесообразность использования более сложных методов, в которых учитываются наблюдавшиеся уровни воды не только в прогнозируемом речном створе, но и в створе, расположенном выше по течению, а также в створе, расположенном на основном притоке. Данные методы являются усовершенствованным вариантом широко используемой модели ARX авторегрессии с внешним входом (Auto-Regressive with Exogenous input), которая использует идею фильтра Н. Винера, применяемого для экстраполяции случайных процессов [12, 14, 15, 19].

Усовершенствование модели ARX состоит в ограничении получаемых прогнозов допустимыми минимумами и максимумами и в гидрологическом обосновании состава и способа учета внешних факторов, в качестве которых используются уровни воды, наблюдавшиеся в речных створах, расположенных на главной реке выше по течению и на ее притоке.

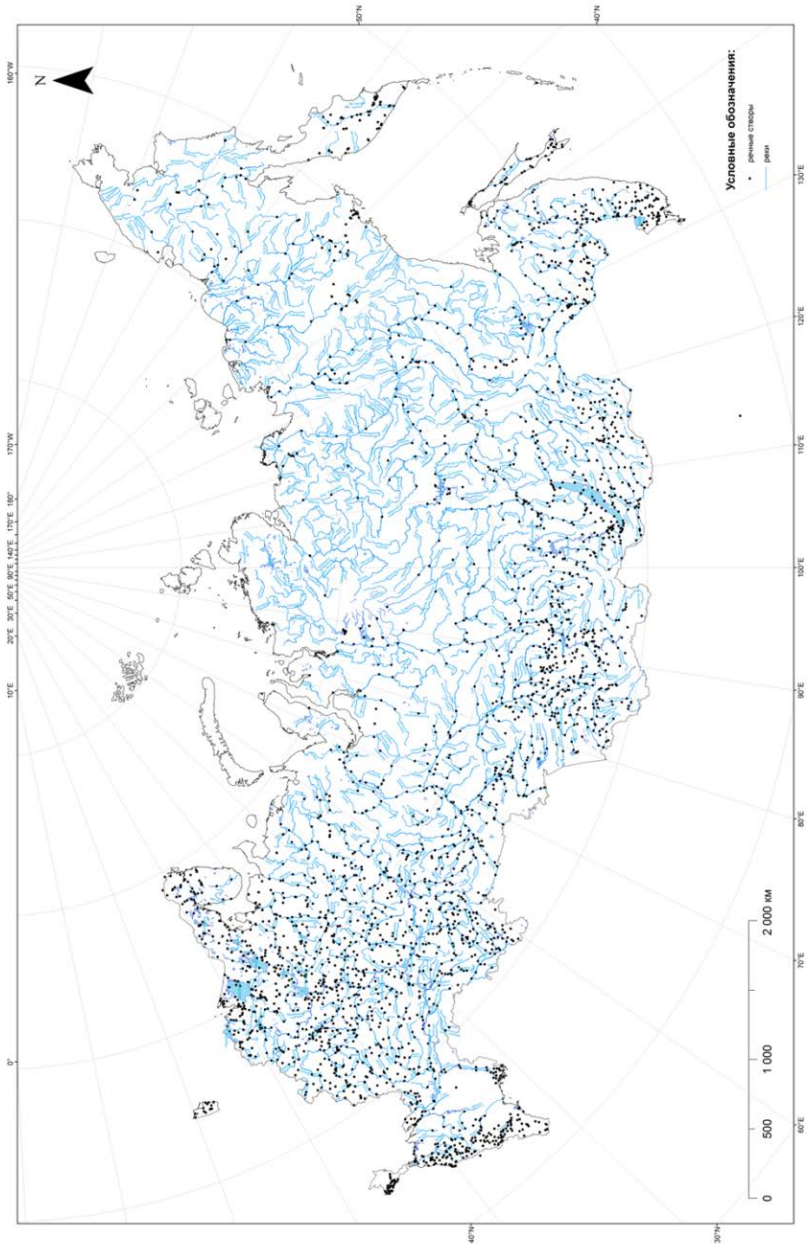


Рис. 1. Расположение прогнозируемых речных створов.
Fig. 1. Location of forecast gauges.

Исходные данные

Для разработки методов прогнозирования использованы данные, накопленные в Едином государственном фонде данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении (ЕГФД). Первичные данные наблюдений хранятся в ЕГФД в формате, соответствующем отраслевому стандарту. Для подготовки массивов среднесуточных уровней воды использованы данные срочных наблюдений, полученных традиционным способом, при помощи наблюдателя, и данные учащенных измерений, полученных при помощи автоматических гидрологических комплексов. Автоматизированная обработка данных наблюдений выполнена в соответствии с действующим руководящим документом определения гидрологических характеристик [9] при помощи программного обеспечения для обработки режимной гидрологической информации по рекам и каналам РЕКИ-РЕЖИМ [4, 10].

Гидрологические основы рассматриваемых вариантов прогнозирования

Метод экстраполяции гидрографа основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных уровней воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определения прогноза с заблаговременностью Δt от 1 до 10 суток в виде обобщенного полинома. Оценка $k+1$ параметров этого полинома по известным к дате составления прогноза t среднесуточным уровням воды $H(t)$, $H(t-1)$, ..., $H(t-k)$ приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}_{\text{ЭГ}}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)H(t-i) + b(\Delta t). \quad (1)$$

Параметры формулы (1) и оптимальное значение k зависят от заблаговременности прогноза Δt и подлежат оценке методом наименьших квадратов по данным гидрологических наблюдений в прогнозируемом створе [2].

Метод соответственных уровней для бесприточных участков реки учитывает уровень воды H_B в оборудованном гидрологическим постом речном створе, расположенном выше прогнозируемого. Прогноз на дату t определяется формулой:

$$\hat{H}(t) = bH_B(t - \tau_B) + c, \quad (2)$$

где τ_B – среднее время руслового добегания воды от верхнего створа до прогнозируемого. Время τ_B суток определяет заблаговременность прогноза, то есть $\Delta t = \tau_B$. Как правило, время τ_B убывает с ростом уровня

воды H_B в верхнем створе, так как при этом увеличивается скорость течения реки [7].

Использование метода соответственных уровней в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов уровней воды сопряжено с жесткой привязкой заблаговременности прогноза Δt к времени руслового добегания τ_B и нетривиальной зависимостью этого времени от уровня воды в верхнем створе.

Устранить этот недостаток и тем самым модифицировать метод соответственных уровней позволяет использование метода экстраполяции гидрографа и для верхнего створа. В этом случае прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}_{CV}(t + \Delta t) = \sum_{j=0}^l b_j(\Delta t) H_B(t - j) + c(\Delta t), \quad (3)$$

где число l должно превышать максимально возможное для данного участка реки время руслового добегания τ_B .

Сочетание метода экстраполяции и обобщенного метода соответственных уровней для бесприточных участков реки приводит к следующей формуле выпуска прогноза:

$$\hat{H}_{эCV}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t) H(t - i) + \sum_{j=0}^l b_j(\Delta t) H_B(t - j) + c(\Delta t). \quad (4)$$

Параметры формулы (4) и оптимальные значения k и l зависят от заблаговременности прогноза Δt и подлежат оценке методом наименьших квадратов по данным гидрологических наблюдений в прогнозируемом и расположенном выше створе.

Метод соответственных уровней при наличии бокового притока учитывает уровни воды H_B и H_{II} в верхнем створе и в оборудованном гидрологическим постом речном створе, расположенном на боковом притоке. Прогноз на дату t определяется формулой:

$$\hat{H}(t) = bH_B(t - \tau_B) + cH_{II}(t - \tau_{II}) + d, \quad (5)$$

где τ_{II} – среднее время руслового добегания воды от створа на боковом притоке до прогнозируемого. Наименьшая из двух величин τ_B и τ_{II} суток определяет заблаговременность прогноза. Как правило, время τ_{II} убывает с ростом уровня воды H_{II} в створе на боковом притоке, так как при этом увеличивается скорость течения реки [7].

Использование такого метода соответственных уровней в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска краткосрочных и среднесрочных прогнозов уровней воды также сопряжено с жесткой привязкой

заблаговременности прогноза к значениям τ_B , τ_{II} и их нетривиальной зависимостью от величин H_B и H_{II} .

Устранить этот недостаток и тем самым модифицировать метод соответственных уровней позволяет использование метода экстраполяции гидрографа и для верхнего створа и для створа на боковом притоке. В этом случае прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}_{CVII}(t + \Delta t) = \sum_{j=0}^l b_j(\Delta t) H_B(t - j) + \sum_{j=0}^m c_j(\Delta t) H_{II}(t - j) + d(\Delta t), \quad (6)$$

где число m должно превышать максимально возможное для данного участка реки и ее бокового притока время руслового добега τ_{II} .

Сочетание метода экстраполяции и обобщенного метода соответственных уровней для приточных участков реки приводит к следующей формуле выпуска прогноза:

$$\begin{aligned} \hat{H}_{эCVII}(t + \Delta t) = & \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t) H(t - i) + \sum_{j=0}^l b_j(\Delta t) H_B(t - j) + \\ & + \sum_{j=0}^m c_j(\Delta t) H_{II}(t - j) + d(\Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

Параметры формулы (7) и оптимальные значения k , l и m зависят от заблаговременности прогноза Δt и подлежат оценке методом наименьших квадратов по данным гидрологических наблюдений в прогнозируемом и расположенных выше створах на основной реке и на боковом притоке.

Сравниваемые методы прогнозирования

Параметры формул (1), (4) и (7) оценивались методом наименьших квадратов по данным гидрологических наблюдений за период с 01.01. 2006 по 31.12. 2015. В качестве оптимальных были приняты значения $k = 5$ и $l = m = 8$. В результате были получены три метода краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды.

1. Предварительный прогноз по первому методу определяется формулой:

$$\hat{H}_1(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^5 a_i(\Delta t) H(t - i) + b(\Delta t). \quad (8)$$

Все семь параметров формулы (8) для каждого значения $\Delta t = 1, 2, \dots, 10$ оценивались методом наименьших квадратов по данным ежедневных значений уровней воды в прогнозируемом створе за период с 2006 по 2015 год.

2. Предварительный прогноз по второму методу определяется формулой:

$$\hat{H}_2(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^5 a_i(\Delta t)H(t-i) + \sum_{j=0}^8 b_j(\Delta t)H_B(t-j) + c(\Delta t). \quad (9)$$

Все 16 параметров формулы (9) для каждого значения $\Delta t = 1, 2, \dots, 10$ оценивались методом наименьших квадратов по данным ежедневных значений уровней воды в прогнозируемом створе и в вышерасположенном створе за период с 2006 по 2015 год.

3. Предварительный прогноз по третьему методу определяется формулой:

$$\begin{aligned} \hat{H}_3(t + \Delta t) = & \sum_{i=0}^5 a_i(\Delta t)H(t-i) + \sum_{j=0}^8 b_j(\Delta t)H_B(t-j) + \\ & + \sum_{j=0}^8 c_j(\Delta t)H_B(t-j) + d(\Delta t). \end{aligned} \quad (10)$$

Все 25 параметров формулы (10) для каждого значения $\Delta t = 1, 2, \dots, 10$ оценивались методом наименьших квадратов по данным ежедневных значений уровней воды в прогнозируемом створе в вышерасположенном створе и в створе бокового притока за период с 2006 по 2015 год.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формул (8), (9) и (10) корректировались путем замены экстремальных значений прогноза допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Для каждого из трех методов с номерами $i = 1, 2, 3$ окончательный прогноз определяется формулой:

$$\tilde{H}_i(t + \Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}_i(t + \Delta t) < \min H; \\ \hat{H}_i(t + \Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}_i(t + \Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \hat{H}_i(t + \Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (11)$$

где $\min H$ – минимальный уровень воды в прогнозируемом створе за период с 2006 по 2015 год; $\max H$ – максимальный уровень воды в прогнозируемом створе за период с 2006 по 2015 год.

Проверка и сравнение методов

Проверка на независимом материале всех трех методов выполнена по данным за период с 01.01.2016 по 31.12.2024 продолжительностью $N = 3288$ суток.

Если обозначить через $H(t)$ фактическое значение уровня воды за сутки t , а через $\tilde{H}(t)$ ее прогноз по одному из трех методов, то среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [H(t) - \tilde{H}(t)]^2}. \quad (12)$$

Для каждого значения заблаговременности прогноза Δt суток вычислялась разность

$$d(t) = H(t) - H(t - \Delta t). \quad (13)$$

Погрешность альтернативного инерционного прогноза рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [d(i) - \bar{d}]^2}, \quad (14)$$

где \bar{d} вычисляется как среднее арифметическое ряда $d(1), \dots, d(N)$, образованного N значениями $d(i)$ в формуле (14).

В качестве другого показателя качества прогнозирования использована оправдываемость прогноза P , то есть частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную $0,674 \sigma_{\Delta}$.

Согласно Наставлению [6] метод прогнозирования относится к категории удовлетворительных, если показатель S/σ_{Δ} не превышает 0,80, а оправдываемость P не ниже 60 % [1].

Первый и второй методы сравнивались для 833 прогнозируемых створов, для которых могли использоваться данные гидрологических наблюдений не только в прогнозируемом, но и в створе, расположенном выше по течению. При этом на участке между верхним и прогнозируемым створом значительная боковая приточность отсутствовала. Среднее расстояние между верхним и прогнозируемым створом составляет 139 км.

Оправдываемость прогнозов P , получаемых с помощью сравниваемых методов оказалась достаточно высокой. Значения P в среднем составляют 81 % для первого метода и 83 % для второго.

Более высокой оправдываемости второго метода соответствуют и его более низкие значения среднеквадратической погрешности. Преимущество второго метода характеризует показатель

$$f_{1,2} = \frac{(S_1 - S_2)}{S_2} 100\%. \quad (15)$$

Средние для всех 833 прогнозируемых створов значения показателя $f_{1,2}$ при различной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, 2, \dots, 10$ суток приведены в табл. 2.

Таблица 2. Средние значения показателя $f_{1,2}$ преимущества второго метода

Table 2. Average values of the indicator $f_{1,2}$ showing advantages of the second method

Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{1,2}, \%$	8,9	11,2	10,8	9,8	8,8	8,0	7,4	6,8	6,4	6,0

Показатель $f_{1,2}$ варьирует от 6,0 до 11,2 % и в среднем равен 7,7 %. В табл. 3 для сравниваемых методов приведено относительное в долях от 833 число речных створов с удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности с показателем $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$.

Таблица 3. Относительное число речных створов с удовлетворительными прогнозами для сравниваемых методов

Table 3. Relative number of river gauges with satisfactory forecasts for the compared methods

Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительное число створов, % <i>Первый метод</i>	40	34	28	24	20	18	16	15	14	13
Относительное число створов, % <i>Второй метод</i>	59	52	47	41	36	32	30	28	27	26

Приведенные в табл. 3 данные показывают, что при любой заблаговременности Δt число удовлетворительных прогнозов, полученных вторым методом, больше, чем первым.

Таким образом, для 833 рассматриваемых речных створов второй метод, использующий гидрологические наблюдения в прогнозируемом створе и в расположенном выше по течению, имеет небольшое, но статистически достоверное преимущество перед первым методом экстраполяции гидрографа в прогнозируемом створе.

Все три метода сравнивались для 197 прогнозируемых створов, для которых могли использоваться данные гидрологических наблюдений не только в прогнозируемом, но и в створе, расположенном выше по течению и на главном боковом притоке. При этом на участке между верхним и прогнозируемым створом имеется значительный приток с расположенным на нем гидрологическим постом. Среднее расстояние между верхним и прогнозируемым створом составляет 148 км. Среднее расстояние между гидрологическим постом на притоке и прогнозируемым створом составляет 126 км.

Оправдываемость прогнозов P , получаемых с помощью сравниваемых методов оказалась достаточно высокой. Значения P в среднем составляют 83 % для первого метода, 85 % для второго и 86 % для третьего метода. Более высокой оправдываемости сравниваемого метода соответствуют и его более низкие значения среднеквадратической погрешности. Преимущество второго метода перед первым характеризует показатель $f_{1,2}$, определяемый формулой (15). Преимущество третьего метода перед первым

и перед вторым характеризуют показатели $f_{1,3}$ и $f_{2,3}$, определяемые аналогично формуле (15).

Средние для всех 197 прогнозируемых створов значения этих показателей при различной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, 2, \dots, 10$ суток приведены в табл. 4.

Таблица 4. Средние значения показателей преимущества
Table 4. Average values of indicators showing advantage of a method

Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{1,2}, \%$	9	14	16	15	14	13	12	11	10	9
$f_{1,3}, \%$	11	18	20	20	19	18	16	15	14	13
$f_{2,3}, \%$	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4

Среднее значение показателя $f_{1,2}$ равно 12 %, то есть в целом второй метод дает на 12 % более точные прогнозы, чем первый.

Среднее значение показателя $f_{1,3}$ равно 16 %, то есть в целом третий метод дает на 16 % более точные прогнозы, чем первый.

Среднее значение показателя $f_{2,3}$ равно 4 %, то есть в целом третий метод дает на 4 % более точные прогнозы, чем второй.

В табл. 5 для сравниваемых методов приведено относительное в долях от 197 число речных створов с удовлетворительными прогнозами различной заблаговременности с показателем $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$.

Таблица 5. Относительное число речных створов с удовлетворительными прогнозами для сравниваемых методов

Table 5. Relative number of river gauges with satisfactory forecasts for the compared methods

Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительное число створов, % <i>Первый метод</i>	74	62	52	49	43	37	33	32	29	29
Относительное число створов, % <i>Второй метод</i>	86	82	77	70	65	61	56	51	49	47
Относительное число створов, % <i>Третий метод</i>	87	85	83	79	73	70	65	61	58	56%

Приведенные в табл. 5 данные демонстрируют преимущество третьего метода при любой заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, 2, \dots, 10$ суток.

Таким образом, для 197 рассматриваемых речных створов третий метод, использующий гидрологические наблюдения в прогнозируемом створе, в расположенном выше по течению створе и в створе на боковом притоке, имеет небольшое, но статистически достоверное преимущество перед первыми двумя методами.

Заключение

Сравнивались три метода краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды на реках России, разработанные в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России». Во всех трех методах прогноз среднесуточного уровня воды выражается в виде линейной зависимости от наблюдавшихся уровней воды. Прогноз корректируется путем замены его экстремальных значений допустимым минимумом или максимумом.

В первом методе экстраполяции гидрографа учитываются только уровни воды, наблюдавшиеся в прогнозируемом створе.

Во втором более общем методе дополнительно учитываются уровни воды, наблюдавшиеся в речном створе, расположенном выше по течению.

В третьем еще более общем методе дополнительно учитываются уровни воды, наблюдавшиеся в створе, расположенном на притоке.

Входящие в формулу выпуска прогноза параметры оценивались по данным гидрологических наблюдений за период с 01.01.2006 по 31.12. 2015.

Проверка на независимом материале всех трех методов выполнена по данным гидрологических наблюдений за период с 01.01.2016 по 31.12.2024.

Первый и второй методы сравнивались для 833 речных створов, для которых могли использоваться данные гидрологических наблюдений не только в прогнозируемом, но и в расположенном выше по течению створе при отсутствии значительной боковой приточности на участке между верхним и прогнозируемым створом. Сравнение показало, что второй метод имеет небольшое, но статистически достоверное преимущество перед первым.

Все три метода сравнивались для 197 речных створов, для которых могли использоваться данные гидрологических наблюдений не только в прогнозируемом, но и в расположенном выше по течению створе при наличии значительного притока на участке между верхним и прогнозируемым створами. Сравнение показало, что третий метод имеет небольшое, но статистически достоверное преимущество перед остальными.

На основании полученных результатов рекомендуется:

– использовать третий метод для указанных 197 прогнозируемых створов;

- использовать второй метода для указанных 833 прогнозируемых створов;
- использовать первый метод для оставшихся 1746 прогнозируемых створов.

Для рассмотренных методик выполнены оперативные испытания, оценены их параметры и качество проверочных прогнозов. Рекомендуется их реализация в виде программного обеспечения в рамках системы мониторинга и прогнозирования ГИС «Гидрология» и использование оперативно-прогностическими учреждениями Росгидромета в практике выпуска гидрологических прогнозов и штормовых предупреждений.

Список литературы

1. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.
2. *Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
3. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. М.: Изд-во ФГБУ «Гидрометцентр России», 2023. 200 с.
4. *Готовченкова И.Л., Шевченко А.И.* Сбор, обработка и получение информационной продукции в системе обработки режимной гидрологической информации по рекам и каналам "РЕКИ-РЕЖИМ" // Труды Государственного океанографического института. 2013. № 214. С. 291-298.
5. *Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г.* Формирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 216 с.
6. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
7. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 356 с.
8. *Симонов Ю.А.* Оперативная гидрология в деятельности Всемирной метеорологической организации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 121-140.
9. РД 52.19.924–2022. Определение гидрологических характеристик по рекам и каналам в условиях автоматизированной обработки информации для получения материалов водного кадастра
10. *Шевченко А.И., Готовченкова И.Л., Сомова С.М.* Развитие технологий сбора и обработки режимной гидрологической информации по рекам и каналам в условиях модернизации наблюдательной гидрологической сети и новой концепции водного кадастра // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. № 177. С. 87-94.
11. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016. 480 p.
12. *Andreou E., Ghysels E., Kourtellos A.* Regression models with mixed sampling frequencies // Journal of Econometrics. 2010. № 58. P. 246-261.
13. *Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V.* Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method // Hydrology. 2022. Vol. 9, no. 1. P. 1-14.
14. *Box G.E., Jenkins P., Gwilym M., Reinsel G.C., Ljung G.M.* Time series analysis: forecasting and control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016. 53 p.
15. *Cogley T., Nason J.M.* Effects of the Hodrick-Prescott Filter on Trend and Difference Stationary Time Series Implications for Business Cycle Research // Journal of Economic Dynamics and Control. 1995. Vol. 19, no 1-2. P. 253-278.

16. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
17. WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. World Meteorological Organization, 2009. 302 p.
18. WMO-No. 1072. Manual on Flood Forecasting and Warning. World Meteorological Organization, 2011. 138 p.
19. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series; MIT Press: Cambridge, MA, USA. John Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1964. 171 p.
20. WMO-No. 1293. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. World Meteorological Organization, 2022. 61 p.

References

1. 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.].
2. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2021, vol. 380, no. 2, pp. 77-94 [in Russ.].
3. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovanie stoka rek Rossii. Moscow, FGBU «Gidrometcentr Rossii», 2023, 200 p. [in Russ.].
4. Gotovchenkova I.L., Shevchenko A.I. Gathering, Processing and obtaining of information production in system of processing of the regime hydrological information on the Rivers and Channels «Reki-Regim». *Trudy GOIN [Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute]*. 2013, vol. 214, pp. 291-298 [in Russ.].
5. Kuchment L.S., Demidov V.N., Motovilov Yu.G. Formirovanie rechnogo stoka. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1983, 216 p. [in Russ.].
6. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
7. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodohranilishch. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].
8. Simonov Yu.A. Activities of the World Meteorological Organization in the field of operational hydrology. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2025, vol. 396, no. 2, pp. 121-140 [in Russ.].
9. RD 52.19.924–2022. Opredelenie gidrologicheskikh harakteristik po rekam i kanalam v usloviyah avtomatizirovannoy obrabotki informacii dlya polucheniya materialov vodnogo kadastra [in Russ.].
10. Shevchenko A.I., Gotovchenkova I.L., Somova S.M. Development software of collection, processing and archiving hydrological information on rivers and canals emerged due in the modernization of hydrological network and a new concept water-resources inventory. *Trudy VNIIGMI-MTSD*. 2014, vol. 177, pp. 87-94 [in Russ.].
11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting – A Global Perspective. Academic Press, 2016, 480 p.
12. Andreou E., Ghysels E., Kourtellos A. Regression models with mixed sampling frequencies. *Journal of Econometrics*. 2010, no. 58, pp. 246-261.
13. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian Rivers Streamflow Forecasting Using Hydrograph Extrapolation Method. *Hydrology*. 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1-14.
14. Box G.E., Jenkins P., Gwilym M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: forecasting and control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016, 53 p.

15. Cogley T., Nason J.M. Effects of the Hodrick-Prescott Filter on Trend and Difference Stationary Time Series Implications for Business Cycle Research. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 1995, vol. 19, no 1-2, pp. 253-278.
16. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004, 1024 p.
17. WMO-No. 168. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO, Geneva, 2009, 302 p.
18. WMO-No. 1072. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO, Geneva, Switzerland, 2011, 138 p.
19. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series; MIT Press: Cambridge, MA, USA. John Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1964. 171 p.
20. WMO-No. 1293. Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning Systems. WMO, Geneva, Switzerland, 2022, 61 p.

*Поступила 15.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 15.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-129-143>

УДК 504.453

Усовершенствование методики прогноза характеристик весеннего стока рек Жайык-Каспийского бассейна в условиях доступной гидрометеорологической информации

***С.Б. Саиров, Т.А. Тиллакарим,
Н.Т. Серикбай, Б.Б. Айтымова***

*Республиканское Государственное Предприятие «Казгидромет»,
Республика Казахстан, г. Астана
sairov_s@meteo.kz*

Представлены результаты исследования и апробации усовершенствованной методики прогноза максимальных уровней воды в весенний период года с использованием регрессионного анализа. Объектом исследования выбраны реки Жайык-Каспийского (Урало-Каспийского) бассейна, относящиеся к казахстанскому типу с весенним половодьем. К факторам формирования весеннего стока (температурный режим, количество осадков зимнего периода, гидрологический режим рек на момент прогноза) в качестве дополнительных предложены предикторы: продолжительность и расходы воды на конец половодья предшествующего года, а также минимальный зимний сток. Учет этих факторов позволил повысить точность долгосрочного прогноза максимального уровня воды весеннего половодья.

Ключевые слова: гидрологический прогноз, максимальный уровень, мониторинг, половодье, снеговое питание, реки казахстанского типа

Improvement of the methodology for forecasting spring runoff characteristics of rivers in the Zhaiyk-Caspian basin under the conditions of available hydrometeorological information

***S.B. Sairov, T.A. Tillakarim,
N.T. Serikbay, B.B. Aitymova***

*Republican State Enterprise "Kazhydromet", Astana, Republic of Kazakhstan
sairov_s@meteo.kz*

The results of research and approbation of improved methodology of pro-forecasting of maximum water levels in the spring period of the year using regression analysis are presented. The rivers of the Zhaiyk-Caspian basin belonging to the Kazakhstan type with spring flood are chosen as the object of research. The article considers the improvement of the existing methodology for predicting maximum water levels by using additional factors of spring runoff formation. Thus, in addition to the factors of spring runoff formation (temperature regime of spring, winter precipitation, hydrological regime of rivers at the time of forecast release), as additional predictors it is proposed to take into account characteristic parameters of hydrological regime, such as: duration and water discharge at the end of the flood of the previous year, as well as the minimum winter runoff. Taking into account these

factors allowed to increase the accuracy of forecasts of the maximum water level of spring floods – the quality criterion of the methodology increased from 0,02 to 0,25.

Keywords: hydrological forecast, maximum level, monitoring, floor-soil, snow supply, Kazakhstan

Введение

Весеннее половодье на реках Казахстана обусловлено накоплением снега в зимний период и его последующим таянием. Оно проявляется ежегодно в один и тот же сезон, но с различной интенсивностью и продолжительностью, зависящими от объема накопленного снега в пределах одной климатической зоны. Это явление представляет собой основную фазу водного режима рек, в ходе которой проходит основная часть (более 70 %) годового стока. В период высокой водности весной реки могут выходить из русел, затапливая поймы и причиняя ущерб прибрежным населенным территориям. Низкое половодье приводит к отсутствию пополнения талыми водами пойменных озер, что со временем может вызвать их обмеление и исчезновение, а также снижение уровня грунтовых вод и деградацию пойменных экосистем.

Прогнозирование максимальных уровней стока рек имеет особую значимость, поскольку именно пиковые значения уровней представляют наибольшую угрозу для населения, объектов инфраструктуры, экономики, сельскохозяйственных угодий и других социально-экономических компонентов территории.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что в будущем риск наводнений или, наоборот, низкого стока будет сохраняться и усиливаться из-за природно-климатических изменений, антропогенного освоения территорий, приводящего к росту изменчивости основных факторов формирования половодья. Совершенствование заблаговременного прогноза характеристик весеннего половодья представляют собой одну из приоритетных задач как для теоретической науки, так и для практического применения [10–12, 18, 19].

Применение проходящих апробацию в Казахстане современных гидрологических моделей, таких как гидродинамическая модель MIKE 11 и гидравлическая модель HEC-RAS, сопряжены с рядом трудностей, обусловленных высокими требованиями моделей к входной морфометрической информации, прежде всего к детальному заданию рельефа, геологического строения, морфометрических характеристик русел и донной поверхности рек. Это, в свою очередь, требует значительных трудовых и финансовых затрат, что делает широкомасштабное использование подобных моделей в условиях рек Казахстана и условий обеспеченности исходной информацией на текущем этапе затруднительным [2].

Модели формирования стока HBV-light и SWIM показывают хорошее качество моделирования при применении на горных реках Казахстана

[6, 17, 19]. Для горных рек типично продолжительное половодье, обусловленное постепенным таянием снегов и ледников, а также дополнительным дождевым питанием.

Использование моделей формирования стока HBV-light и SWIM на равнинных территориях сталкиваются с определенными ограничениями – они не всегда корректно отражают кратковременное, но интенсивное половодье, происходящее за счет быстрого снеготаяния весной. Гидрологические процессы на равнинах протекают быстрее и резче, что усиливает влияние таких факторов, как испарение, инфильтрация и мелиоративные воздействия. Все это снижает точность гидрологических прогнозов.

Именно поэтому модели HBV-light и SWIM, показывающие высокое качество при моделировании горных рек, сталкиваются с ограничениями на равнинных территориях – они не всегда корректно отражают быстрое развитие и короткую продолжительность половодья.

Для создания методики долгосрочных гидрологических прогнозов с использованием моделей HBV-light и SWIM требуется ежедневное обеспечение численными прогнозами погоды на сроки от двух недель и более. На текущем этапе такие метеорологические прогнозы обладают ограниченной точностью и пространственной детализацией, особенно в условиях высокой климатической неоднородности Казахстана. Все это затрудняет применение этих моделей в вопросах долгосрочного прогнозирования максимальных уровней и объемов половодья [6, 17, 19].

В связи с этим произведено усовершенствование существующих методик гидрологических прогнозов путем внесения дополнительных факторов, характеризующих формирование весеннего стока. В качестве таких факторов рассмотрены продолжительность половодья, уровень воды на конец половодья предыдущего года и минимальный уровень зимнего стока, а также разность между ними [15], которая может служить индикатором процессов, происходящих в почвенно-грунтовой среде, таких как истощение или восстановление влагоемкости. Использование этих факторов в качестве предикторов при построении гидрологических прогнозов позволяет повысить точность и достоверность временных и количественных характеристик половодья для различных природно-климатических зон Казахстана [16].

В данной работе рассмотрены вопросы повышения точности прогноза максимальных уровней стока рек Жайык-Каспийского бассейна. Целью данной работы являлась разработка усовершенствованной регрессионной методики (модели) прогноза максимального уровня воды в период весеннего половодья рек Жайык-Каспийского бассейна.

Для достижения поставленной цели сформированы базы данных и определены расчетные характеристики за период 1980–2024 гг.:

– сформированы базы данных количества осадков за холодный период;

- температуры воздуха за период половодья по метеостанциям в пределах бассейнов;
- сформированы базы среднесуточных расходов воды рек;
- расходы воды на конец половодья;
- минимальный расход воды зимой;
- продолжительность половодья (дата начала, окончания периода половодья);
- максимальные уровни воды;
- рассчитаны разности между уровнями/расходами воды на конец половодья и минимальными уровнями/расходами зимнего стока, которые косвенно характеризуют наполнение или истощение влаги в почвогрунтах;
- получены регрессионные уравнения прогноза максимального уровня воды весеннего половодья для каждого гидрологического поста.

1. Материалы и методы исследования

1.1. Описание области исследования

Особенности распределения речной сети Жайык-Каспийского района обусловлены наличием на юго-западе Каспийского моря, а на северо-востоке – горных образований Южного Урала, поэтому реки здесь имеют общее направление течения с северо-востока на юго-запад. Основной рекой района является Жайык (Урал) общей длиной 2534 км и площадью 232 тыс. км². Река формируется на территории Российской Федерации, берет начало на Южном Урале, впадает в Каспийское море у г. Атырау. Длина реки в пределах Республики Казахстан составляет 1084 км, здесь она приобретает характер равнинной реки [7].

Реки Шаган и Деркул, берущие начало на Общем Сырте являются правобережными притоками Жайыка. Реки Сары и Кара Озени, Шыжын 1, Шыжын 2 и другие впадают в бессточные понижения Прикаспийской низменности. Реки Оленты, Булдырты, Калдыгайты, Ойыл, Сагыз, берущие начало у меловых гряд Предуралья, текут между водосборами Утвы, Б. Хобды (приток Елека) и р. Жем и теряются в бессточных озерах Прикаспийской низменности [4].

В рассматриваемом районе на территории Актюбинской области расположены три крупных водохранилища: Каргалинское, Актюбинское и Саздинское.

На Казахстанской части Жайык-Каспийского бассейна действуют 49 метеорологических и 54 гидрологических пункта наблюдений, представленных на рис. 1.

1.2. Исходные данные

Для данной работы использованы материалы многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений. Наблюденные данные гидрологических характеристик взяты из справочников «Ежегодные данные стока»

(ЕДС) и «Многолетние данные о стоке» для определения объемов половодья каждого года [8, 9, 13, 14, https://meteo.kazhydromet.kz/database_hydro/]. Данные метеорологических характеристик взяты из климатических справочников и базы данных РГП «Казгидромет» [https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/].

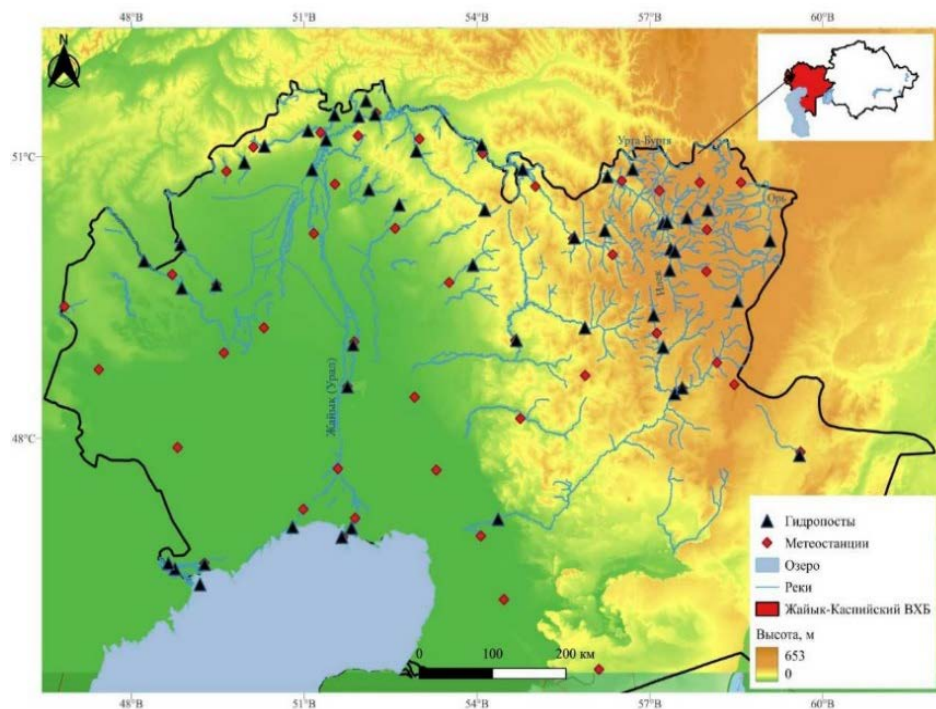


Рис. 1. Расположение наблюдательных пунктов на казахстанской части Жайык-Каспийского бассейна.

Fig. 1. Location of observation points on the Kazakh part of the Zhaiyk-Caspian basin.

1.3. Методика исследования

Для анализа зависимости максимальных уровней воды равнинных рек Жайык-Каспийского бассейна от ряда гидрометеорологических факторов применялся метод множественной регрессии [5].

Эффективность методики долгосрочного прогноза оценивалась с помощью критерия S/σ , где S – средняя квадратическая ошибка проверочных прогнозов; σ – среднее квадратичное отклонение прогнозируемой величины, то есть максимального уровня воды весеннего половодья [3].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Анализ зависимостей максимальных уровней стока от стокоформирующих факторов

Построенные парные коэффициенты корреляции максимальных уровней воды ($H_{\text{макс}}$) с осадками ($R_{\text{ХП}}$) за холодный период года (ноябрь–март) по 23 гидропостам рассматриваемых рек Жайык-Каспийского бассейна, где имеются ряды длительностью от 12 до 46 лет, показали неудовлетворительный результат (табл. 1).

Коэффициенты корреляции, оцениваемые как «удовлетворительные» и «неудовлетворительные», варьируются в пределах от 0,18 (река Чижа 1) до 0,58 (река Шаган) (табл. 1).

Включение в состав анализируемых факторов температурного режима весны, в частности максимальной температуры воздуха за апрель (T_{IV}), несколько улучшили корреляционные связи: коэффициенты множественной регрессии приняли значения от 0,20 (Чижа 1) до 0,73 (Утва). Вместе с тем для большинства рек данный показатель не достиг значения 0,70.

Известно, что одним из основных факторов, определяющих потери талого стока в период формирования половодья, является предзимнее увлажнение почв. Степень увлажнения почвогрунтов к началу зимнего периода оказывает существенное влияние на процессы инфильтрации и поверхностного стока во время весеннего снеготаяния. В связи с этим возникает необходимость качественной оценки влияния состояния почв на формирование стока, особенно при отсутствии прямых наблюдений за влажностью.

Для этой цели целесообразно использовать анализ гидрографа стока (рис. 2) по характерным точкам, что позволяет преобразовать качественные особенности стока в количественные показатели, отражающие влияние почвенно-грунтовых условий. Применение таких показателей в качестве предикторов в моделях прогноза половодья способствует улучшению корреляционных зависимостей и, как следствие, повышает достоверность и устойчивость гидрологических прогнозов.

В качестве индекса свободной емкости почвогрунтов был предложен следующий показатель: **разность между уровнем воды на конец половодья предыдущего года ($H_{\text{к.п.}}$) и минимальным уровнем воды ($H_{\text{мин}}$) перед началом половодья** $\Delta H = H_{\text{к.п.}}^{i-1} - H_{\text{мин}}^i$ которая являются косвенным показателем свободной емкости почвогрунтов перед половодьем [13].

В результате расчетов разниц $H_{\text{к.п.}}^{i-1} - H_{\text{мин}}^i$ были сформированы многолетние временные ряды данных ΔH , которые послужили одним из предикторов прогнозирования половодья. Включение рядов этого параметра в расчетную схему позволило существенно улучшить тесноту корреляционных связей характеристик моделей (от 0,60 до 0,70).

Учитывая, что оттаиванию снега все части региона подвергаются в среднем с начала апреля и активизация начинается в этот же период, температурный фактор анализа был дополнен максимальным значением

температуры воздуха за апрель месяц (T_{IVmax}). В результате показатели коэффициента корреляции и регрессионные статистики еще улучшились.

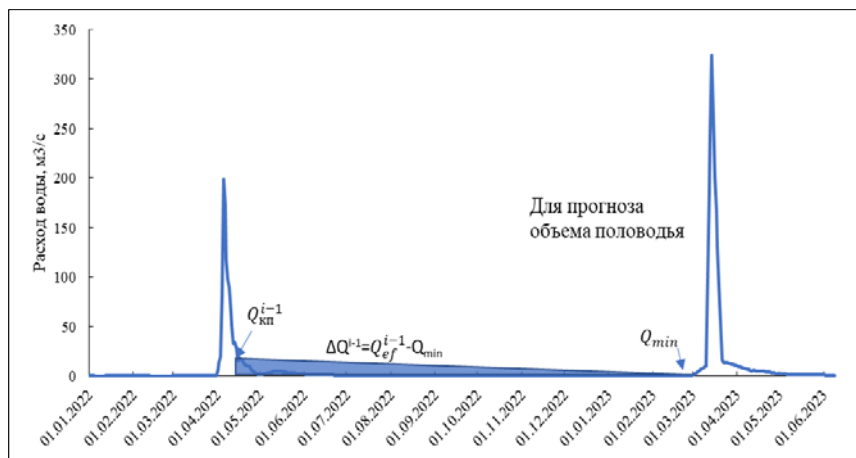


Рис. 2. Характерные точки гидрографа стока, применяемые в качестве предиктора в уравнениях множественной регрессии.

Fig. 2. Characteristic points of the runoff hydrograph used as predictors in multiple regression equations.

Как будет показано ниже, включение вышеуказанной характеристики в качестве одного из предикторов в структуру множественной регрессионной зависимости для оценки максимальных уровней воды позволило повысить коэффициент множественной регрессии до 0,25 для рек на территории Западно-Казахстанской области и до 0,35 для рек в Актюбинской области, доводя их значения до 0,85.

2.2. Проверка эффективности прогнозов на основе используемых зависимостей

При разработке методики гидрологического прогнозирования важно учитывать не только тесноту корреляционной связи между прогнозируемым параметром и предикторами, но и практическую применимость полученной зависимости. Даже при высокой корреляции метод может оказаться недостаточно надежным для оперативного прогнозирования, если не обеспечивается устойчивость результатов.

Для оценки эффективности предложенной методики при прогнозировании максимального уровня воды был рассчитан показатель эффективности S/σ [3], который позволяет объективно оценить эффективность предложенной методики относительно эффективности прогноза «по норме».

Уравнения для прогноза максимальных уровней воды рек Жайык-Каспийского бассейна представлены в табл. 1. Значения предикторов и результаты расчета показателя эффективности методики S/σ для всех рассматриваемых речных бассейнов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1. Уравнения для прогноза максимальных уровней воды рек Жайык-Каспийского бассейна

Table 1. Equations for forecasting maximum water levels of rivers in the Zhaiyk-Caspian basin

Створ	Прогностическое уравнение
Западно-Казахстанская область	
р. Шаган – с. Чувашинское	$H_{\max} = 25,8 \cdot T_{IV} + 3,61 \cdot R_{IX-X} + 3,48 \cdot R_{XI-III} - 347$
р. Утва – с. Кентубек	$H_{\max} = 9,60 \cdot T_{IV} + 1,21 \cdot R_{IX-X} + 1,77 \cdot R_{XI-III} + 3,51 \cdot \Delta H - 111$
р. Утва – с. Лубенка	$H_{\max} = 0,63 \cdot R_{IX-X} + 1,08 \cdot R_{XI-III} + 22,8 \cdot T_{IV} + 0,44 \cdot H_{\min} - 485$
р. Чижа 2 – с. Чижа 2	$H_{\max} = 0,96 \cdot R_{XI-III} + 2,21 \cdot R_{IX-X} + 2,97 \cdot T_{IV} + 0,32 \cdot H_{\min} + 201$
р. Чижа 1 – с. Чижа 1	$H_{\max} = 1,56 \cdot R_{XI-III} + 1,94 \cdot R_{IX-X} - 9,00 \cdot T_{IV} - 3,25 \cdot L + 511$
р. Шидерты – с. Аралтобе	$H_{\max} = 1,66 \cdot R_{IX-X} + 1,14 \cdot R_{XI-III} + 14,3 \cdot T_{IV} - 222$
р. Оленты – с. Жымпиты	$H_{\max} = 1,20 \cdot R_{XI-III} + 1,24 \cdot R_{IX-X} + 19,6 \cdot T_{IV} - 392$
р. Куперанкаты – с. Алгабас	$H_{\max} = 1,76 \cdot R_{XI-III} + 20,1 \cdot T_{IV} + 1,49 \cdot R_{IX-X} - 0,63 \cdot H_{\min} + 0,78 \cdot Q_{\max} - 268$
Актюбинская область	
р. Б. Кобда – с. Кобда	$H_{\max} = 1,24 \cdot R_{IX-X} + 0,30 \cdot R_{XI-III} + 0,66 \cdot T_{IV} + 1,19 \cdot \Delta W - 1,81 \cdot L + 373$
р. Б. Кобда – с. Когалы	$H_{\max} = 2,36 \cdot R_{IX-X} + 3,59 \cdot R_{XI-III} + 16,7 \cdot T_{IV} + 37,2 \cdot \Delta W - 496$
р. Карахобда – с. Альпасай	$H_{\max} = 1,33 \cdot R_{IX-X} + 0,21 \cdot R_{XI-III} + 8,64 \cdot T_{IV} + 1,39 \cdot Q_{КП} - 2,95 \cdot L + 397$
р. Косистек – с. Косистек	$H_{\max} = 1,81 \cdot R_{IX-X} + 3,99 \cdot T_{IV} + 0,31 \cdot R_{XI-III} - 2,06 \cdot L + 92,76 \cdot \Delta W + 177$
р. Орь – с. Бугетсай	$H_{\max} = 2,84 \cdot R_{XI-III} + R_{XI-III} + 2,38 \cdot R_{IX-X} + 5,61 \cdot T_{IV} - 451 \cdot Q_{\min} + 108$
р. Урта-Буртя – с. Дмитриевка	$H_{\max} = -1,97 \cdot L + 7,95 \cdot T_{IV} + 0,75 \cdot R_{XI-III} + 0,12 \cdot R_{IX-X} - 280 \cdot Q_{\min} + 205$
р. Карагала – с. Каргалинское	$H_{\max} = 2,77 \cdot R_{IX-X} + 1,34 \cdot R_{XI-III} + 2,73 \cdot T_{IV} + 1,12 \cdot H_{\min} - 118$
р. Илек – с. Целинное	$H_{\max} = 7,11 \cdot T_{IV} + 1,41 \cdot R_{XI-III} + 1,86 \cdot R_{IX-X} + 1,33 \cdot H_{КП} - 3,24 \cdot L - 173$
р. Илек – г. Актобе	$H_{\max} = 0,51 \cdot R_{XI-III} + 1,26 \cdot R_{IX-X} - 6,61 \cdot T_{IV} + 1,67 \cdot H_{\min} + 61,73$
р. Уил – с. Уил	$H_{\max} = 1,74 \cdot R_{XI-III} + 8,37 \cdot T_{IV} + 1,06 \cdot R_{IX-X} + 271$
р. Темир – с. Сагашили	$H_{\max} = 0,63 \cdot R_{XI-III} + 9,89 \cdot T_{IV} + 1,92 \cdot R_{IX-X} + 24,3 \cdot Q_{\min} + 0,81 \cdot H_{КП} - 2,38 \cdot L - 50$
р. Темир – с. Ленинское	$H_{\max} = 1,01 \cdot R_{XI-III} + 10,6 \cdot T_{IV} - 0,13 \cdot R_{IX-X} - 5,04 \cdot L + 251$
р. Эмба – с. Жагабулак	$H_{\max} = 2,95 \cdot Q_{КП} + 1,32 \cdot R_{XI-III} - 1,35 \cdot T_{IV} + 0,93 \cdot R_{IX-X} - 1,89 \cdot L + 332$

Примечание к табл. 1–3: R – количество атмосферных осадков; T_{IV} – максимальная температура воздуха за апрель; $H_{КП}$ – уровень воды в конце половодья предыдущего года; H_{\min} – минимальный уровень воды за зиму; ΔH – разница между уровнями; L – продолжительность половодья; Q_{\min} – минимальный расход воды в период зимней межени; $Q_{КП}$ – расход воды на дату конца половодья; Q_{\max} – максимальный расход воды в период предыдущего половодья. Знак «/» в шапке таблицы означает «или-или».

Таблица 2. Оценка эффективности уравнений для прогноза максимальных уровней воды рек Западно-Казахстанской области**Table 2.** Equations for forecasting maximum water levels of rivers in the West Kazakhstan Region

R_{IX-III}	Предикторы						r	S/σ
	$T + R_{IX-III}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H + L$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min} + L$	$T + R_{IX-III} + L / Q_{min} / H_{min} / Q_{кр} / Q_{max}$		
р. Шаган – с. Чувашинское, период 2008–2024 гг. (16 лет)								
0,58	0,77	0,69	0,69	0,7	0,7		0,77	0,68
р. Утва – с. Кентубек, период 2012–2024 гг. (12)								
0,34	0,7	0,75	0,78	0,85	0,83		0,75	0,73
р. Утва – с. Лубенка, период 2010–2024 гг. (14)								
0,51	0,75	0,74	0,8	0,76	0,83	0,76	0,76	0,74
р. Чижа 2 – с. Чижа 2, период 2005–2024 гг. (19)								
0,46	0,59	0,49	0,76	0,56	0,61		0,76	0,71
р. Чижа 1 – с. Чижа 1, период 2010–2024 гг. (14)								
0,18	0,61	-	-	-	-	0,85	0,85	0,59
р. Шидерты – с. Аралтобе, период 2006–2024 гг. (18)								
0,36	0,75	-	-	-	-		0,75	0,7
р. Оленты – с. Жымпиты, период 2010–2024 гг. (14)								
0,45	0,75	-	-	-	-		0,75	0,72
р. Куперанкаты – с. Алгабас, период 2000–2024 гг. (24)								
0,45	0,46	0,61	0,6	0,61	0,6	0,71	0,71	0,69

Также необходимо подчеркнуть, что в данной работе ввиду ограниченности ряда наблюдений проверка построенной модели уравнения множественной регрессии осуществлена методом верификации в котором при определенных условиях позволяющий ограничиться проверкой методики на зависимом материале, образованном теми же данными многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений [1].

Проведенная оценка критерия эффективности S/σ показала, что для рек Западно-Казахстанской области для всех рассматриваемых гидрологических постов, за исключением бассейна р. Утва, эффективность полученных прогностических уравнений хорошая и удовлетворительная в соответствии с Наставлением [3]. Полученный результат указывает на ограниченную надежность уравнений в бассейнах р. Утва и необходимость последующего совершенствования методики – пересмотра состава предикторов.

Таблица 3. Оценка эффективности уравнений для прогноза максимальных уровней воды рек Актюбинской области

Table 3. Equations for forecasting maximum water levels of rivers in the Aktobe region

R_{IX-III}	Предикторы						r	S/σ
	$T + R_{IX-III}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H + L$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min} + L$	$T + R_{IX-III} + L / Q_{min} / H_{min} / Q_{кр} / Q_{max}$		
р. Б. Кобда – с. Кобда, период 1978-2024 гг. (46 лет)								
0,31	0,47	0,3	0,47	0,69	0,61		0,69	0,76
р. Б. Кобда – с. Когалы, период 2008-2024 гг. (16 лет)								
0,4	0,67	0,74	0,48	0,7	0,64		0,74	0,73
р. Карахобда – с. Альпасай, период 1987–2024 гг. (37)								
0,29	0,46	0,38	0,38	0,79	0,81		0,81	0,61
р. Косистек – с. Косистек, период 2000–2024 гг. (24)								
0,23	0,65	0,4	0,41	0,8	0,6		0,8	0,66
р. Орь – с. Бугетсай, период 1980–2024 гг. (44)								
0,58	0,69	-	-	-	-	0,72	0,72	0,74
р. Урта-Буртя – с. Дмитриевка, период 2007–2024 гг. (17)								
0,25	0,44	0,44	0,45	0,7	0,81		0,8	0,66
р. Карагала – с. Каргалинское, период 1980–2024 гг. (44)								
0,39	0,64	-	0,7	-	-		0,7	0,73
р. Илек-с. Целинное, период 2003–2024 гг. (21)								
0,33	0,61	0,35	0,52	0,5	0,75		0,75	0,75
р. Илек – г. Актобе, период 1942–1974 гг. (32)								
0,2	0,61				-	0,77	0,77	0,66
р. Уил – с. Уил, период 2000–2024 гг. (24)								
0,64	0,72	-	-	-	-		0,74	0,72
р. Темир – с. Сагашили, период 1998–2024 гг. (26)								
0,35	0,61	-	-	-	-	0,75	0,75	0,76
р. Темир – с. Ленинское, период 2006–2024 гг. (18)								
0,54	0,57					0,73	0,73	0,75
р. Эмба – с. Жагабулак, период 2006–2024 гг. (18)								
0,6	0,65	0,65	0,57	0,71	0,72		0,72	0,76

Для речных бассейнов Актюбинской области (табл. 2) значения критерия S/σ свидетельствует о приемлемой прогностической ценности методики. Исключение составляет бассейн реки Эмба, где превышение порогового значения 0,75 указывает на недостаточную надежность методики и необходимость дальнейшего повышения качества используемых зависимостей.

Для оценки правильности отражения реальности прогнозируемых и наблюдаемых значений были сопоставлены результаты модели (прогнозов) с наблюдаемыми фактическими данными максимальных уровней воды рек Жайык-Каспийского бассейна которые представлены на рис. 3 и рис. 4.

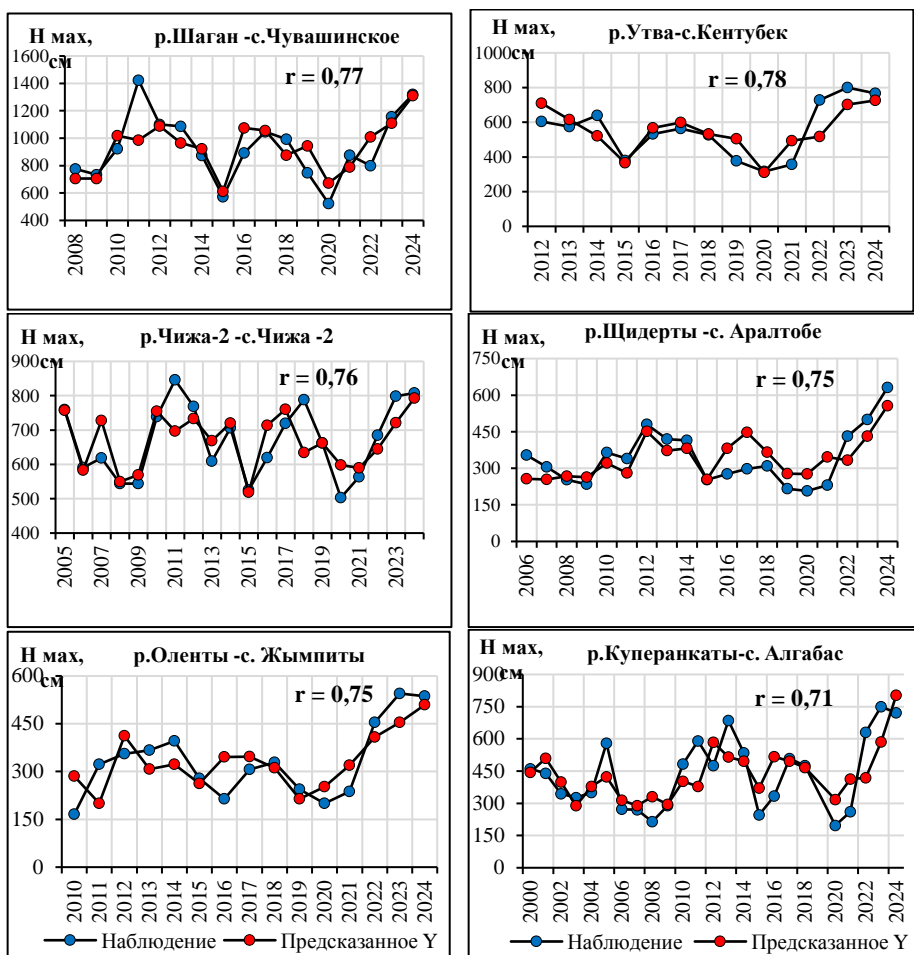


Рис. 3. Наблюдаемые и прогнозные максимальные уровни воды рек Западно-Казакстанской области.

Fig. 3. Observed and forecast maximum water levels of rivers in West Kazakhstan Region.

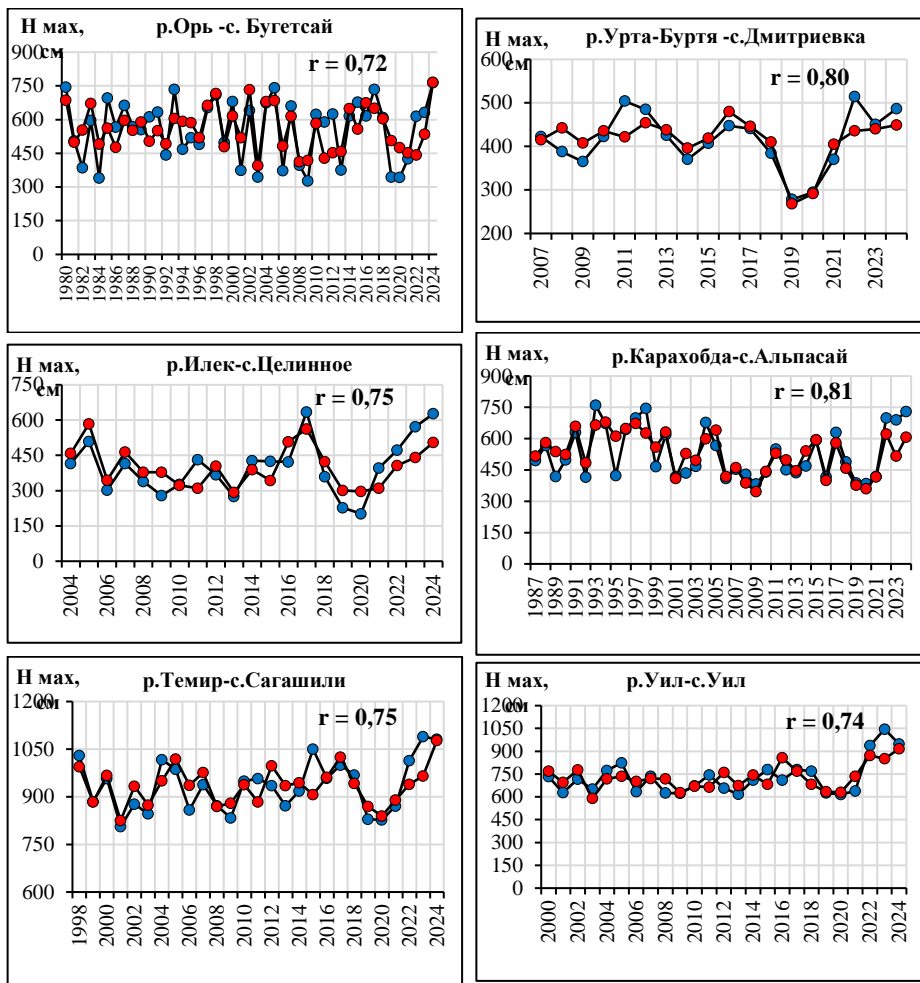


Рис. 4. Наблюдаемые и прогнозные максимальные уровни воды рек Актыубинской области.

Fig. 4. Observed and forecast maximum water levels of rivers in the Aktyubinsk region.

Полученные уравнения, представленные в табл. 1, уточненные с использованием множественного корреляционного анализа данных, имеют коэффициенты множественной корреляции r в диапазоне от 0,69 до 0,85.

Таким образом, в целом результаты оценки корреляционных связей и S/σ подтверждают, что разработанная методика обладает достаточной степенью применимости для большинства исследованных речных бассейнов и, следовательно, может быть применена в прогностической практике, в нашем случае при прогнозировании максимальных уровней воды в период весеннего половодья.

Заключение

В настоящем исследовании произведено усовершенствование существующих методик гидрологических прогнозов путем внесения дополнительных факторов, характеризующих формирование весеннего стока. В качестве таких факторов рассмотрены продолжительность половодья, а также предложено учитывать разность между расходом воды на конец половодья предыдущего года и минимальным расходом воды за зиму текущего года. Данная величина косвенно характеризует насыщение влагой почвогрунтов во время половодья и, соответственно, определяет потенциальные потери талого стока на впитывание в почву. Учет данного фактора позволил существенно уточнить используемые зависимости – значения коэффициентов множественной регрессии выросли до значений 0,8 и более.

Верификация на независимой выборке с расчетом критерия эффективности показала хорошее и удовлетворительное качество прогноза максимального уровня воды. Это позволяет рекомендовать полученные методики к использованию в практике оперативных гидрологических прогнозов характеристик весеннего половодья рек казахстанской части Жайык-Каспийского бассейна.

Список литературы

1. *Богущая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушникова М.Г.* Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 37-51. DOI: DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3
2. *Болатова А. А., Тіллэкәрім Т. А., Раимжанова М. Н.* Применение гидрологической модели HBV для прогнозирования стока рек на примере бокового притока воды в Шульбинское водохранилище // Гидрометеорология и экология. 2019. №. 3 (94). С. 26-43.
3. *Наставление* по службе прогнозов. Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
4. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Том. VII. Ресурсы речного стока Казахстана. Кн. 1. Возобновляемые ресурсы поверхностных вод Западного, Северного, Центрального и Восточного Казахстана: монография / Под науч. ред. Р.И. Гальперина. Алматы, 2012. 684 с.
5. *Соколовский Д. Л.* Речной сток. (Методы исследований и расчетов): Учебное пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 539 с.
6. *Тиллакарим, Т., Серикбай, Н., Сатмурзаев, А., & Сауров, С.* Моделирование стока горных рек Илейского Алатау с применением модели HBV-light // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. 2024. Том 10, № 1. Р. 1-20.
7. *Шульц В.Л.* Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 691 с.
8. Annual Data on the Regime and Resources of Land Surface Waters. Vol. 6. Kara Sea Basin (Western Part). Is. 4–9, 1950–1979. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. Available online: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-tek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhneetechenie-mds-1938-2020>.
9. Annual Data on the Regime and Resources of Surface Water of Land. Is. 1. UST-Kamenogorsk, Kazakhstan, 2002–2021. Available online: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyn-reki-ertis-2002-2021>
10. *Chen H., & Li X.* Impact of Climate Change on the Frequency and Intensity of Hydrological Extremes in Central Asia // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 598. P. 126310. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126310

11. Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M. et al. Importance and vulnerability of the world's water towers // *Nature*. 2020. Vol. 577. P. 364-369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
12. Kauzov A., Tillakarim T., Salnikov V., Polyakova S. Assessment of changes in the area of snow cover in Kazakhstan from 2000 to 2022 // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2023. Vol. 20, no. 1. C. 298-305.
13. Long-Term Data About the Regime and Resources of Surface Water on Land. Book 1, Issue 1. Almaty, Kazakhstan, 2002. Available online: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-rek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhnee-techenie---mds-1938-2020>
14. Resources of Surface Waters of Areas for the Development of Virgin and Fallow Lands, Issue 1. Akmola region of the Kazakh SSR. Leningrad: State Hydrological Institute, 1958.
15. Sairov, S.B.; Serikbay, N.T.; Rodrigo-Illarri, J.; Abdрахимов, R.G.; Rodrigo-Clavero, M.E. Climate-Driven Changes in Annual Flow Patterns: A Comprehensive Analysis of the Buktyrma River (Kazakhstan) // *Water*. 2024. Vol. 16. P. 1114. Doi: 10.3390/w16081114
16. Sairov, S., Tillakarim, T., & Serikbay, N. Some points of improvement of flood volume forecasting under limited hydrometeorological data // *Hydrometeorology and Ecology*. 2024. Vol. 3. P. 7-19. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-114-3-7-19>
17. Serikbay, N.T.; Tillakarim, T.A.; Rodrigo-Illarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.E., Duskeyev, K.K. Evaluation of Reservoir Inflows Using Semi-Distributed Hydrological Modeling Techniques: Application to the Esil and Moildy Rivers' Catchments in Kazakhstan // *Water*. 2023. Vol. 15. P. 2967. <https://doi.org/10.3390/w15162967>
18. Tillakarim T., Kauzov A., Gafurov A., Sairov S. Spatial and temporal variation of water reserves in snow cover in the Nura-Sarysu water basin // *Izdenister Natigeler*. 2023. Vol. 3, no. 99. P. 292-307. <https://doi.org/10.37884/3-2023/30>
19. Tillakarim T., Serikbay N., Rakishev D., Sairov S. Modeling river runoff of literal tributaries of the Buktyrma reservoir with using HBV model // *Journal of Geography & Environmental Management*. 2023. Vol. 70, no. 3. doi.org/10.26577/JGEM.2023.v70.i3.08

References

1. Bogutskaya E.M., Kositskiy A.G., Aybulatov D.N., Grechushnikova M.G. Mean Annual Runoff of the Rivers of the Crimean Peninsula Southwest. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]. 2020, no. 2, pp. 37-51. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3. [in Russ.].
2. Bolatova A. A., Tillakarim T. A., Raimzhanova M. N. Primenenie gidrologicheskoy modeli HBV dlya prognozirovaniya stoka rek na primere bokovogo pritoka vody v Shul'binskoe vodohranilishche. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2019, vol. 94, no. 3, pp. 26-43 [in Russ.].
3. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962. [in Russ.].
4. Vodnye resursy Kazahstana: ocenka, prognoz, upravlenie. Tom. VII. Resursy rechnogo stoka Kazahstana. Kn. 1. Vozobnovlyaemye resursy poverhnostnykh vod Zapadnogo, Severnogo, Central'nogo i Vostochnogo Kazahstana: monografiya. Almaty, 2012, 684 p. [in Russ.].
5. Sokolovskiy D.L. Rechnoy stok. (Metody issledovaniy i raschetov): Uchebnoe posobie. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1968, 539 p. [in Russ.].
6. Tillakarim T., Serikbay N., Satmurzaev A., Sairov S. Modelirovanie stoka gornyh rek Ilejskogo Alatau s primeneniem modeli HBV-light [HBV-modeling of the Ile Alatau mountain river flow]. *Central Asian Journal of Water Research*. 2024, vol. 10, no. 1, pp. 1-20. DOI: 10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/1-20.rus [in Russ.].
7. Spul'c V.L. Reki Sredney Azii [Rivers of Central Asia]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1965, 691 p. [in Russ.].
8. Annual Data on the Regime and Resources of Land Surface Waters. Vol. 6. Kara Sea Basin (Western Part). Is. 4-9, 1950-1979. Leningrad, Gidrometeoizdat publ, 1968. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-rek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhnee-techenie-mds-1938-2020>.

9. Annual Data on the Regime and Resources of Surface Water of Land. Is. 1. UST-Kamenogorsk, Kazakhstan, 2002–2021. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyn-reki-ertis-2002-2021>

10. Chen H., & Li X. Impact of Climate Change on the Frequency and Intensity of Hydrological Extremes in Central Asia. *Journal of Hydrology*. 2021, vol. 598, pp. 126310. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126310.

11. Immerzeel. W.W., Lutz, A.F., Andrade. M. et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 2020, vol. 577, pp. 364-369. DOI: 10.1038/s41586-019-1822-y

12. Kauazov A., Tillakarim T., Salnikov V., Polyakova S. Assessment of changes in the area of snow cover in Kazakhstan from 2000 to 2022. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2023, vol. 20, no. 1, pp. 298-305.

13. Long-Term Data About the Regime and Resources of Surface Water on Land. Book 1, Issue 1. Almaty, Kazakhstan, 2002. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-rek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhnee-techenie---mds-1938-2020>.

14. Resources of Surface Waters of Areas for the Development of Virgin and Fallow Lands, Issue 1. Akmola region of the Kazakh SSR. Leningrad, State Hydrological Institute, 1958

15. Sairov. S.B.; Serikbay, N.T.; Rodrigo-Illarri, J.; Abdrakhimov, R.G.; Rodrigo-Clavero, M.E. Climate-Driven Changes in Annual Flow Patterns: A Comprehensive Analysis of the Buktyrma River (Kazakhstan). *Water*. 2024, vol. 16, pp. 1114. DOI: 10.3390/w16081114

16. Sairov. S., Tillakarim, T., & Serikbay. N. Some points of improvement of flood volume forecasting under limited hydrometeorological data. *Hydrometeorology and Ecology*. 2024, vol. 3, pp. 7-19. DOI: 10.54668/2789-6323-2024-114-3-7-19

17. Serikbay. N.T.; Tillakarim. T.A.; Rodrigo-Illarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.E., Duskayev, K.K. Evaluation of Reservoir Inflows Using Semi-Distributed Hydrological Modeling Techniques: Application to the Esil and Moildy Rivers' Catchments in Kazakhstan. *Water*. 2023, vol. 15, pp. 2967. DOI: 10.3390/w15162967

18. Tillakarim T., Kauazov A., Gafurov A., Sairov S. Spatial and temporal variation of water reserves in snow cover in the Nura-Sarysu water basin. *Izdenister Natigeler*. 2023, vol. 3, no. 99, pp. 292-307. DOI: 10.37884/3-2023/30

19. Tillakarim T., Serikbay N., Rakishev D., Sairov S. Modeling river runoff of literal tributaries of the Buktyrma reservoir with using HBV model. *Journal of Geography & Environmental Management*. 2023, vol. 70, no. 3. DOI: 10.26577/JGEM.2023.v70.i3.08

Поступила 18.09.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 18.09.2025; accepted for publication 26.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-144-152>

УДК 551.58

Сравнительный анализ показателей засушливости для оценки засух в сельскохозяйственных районах Северной Евразии

С.В. Емелина^{1,2}, В.М. Хан^{1,2}

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

²*Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука
Российской академии наук, г. Москва, Россия
tkachukzn@gmail.com*

Анализируются два подхода к оценке засушливых условий: широко используемый в отечественной агрометеорологической практике гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) и стандартизированный индекс осадков и испаряемости (SPEI). Дается оценка повторяемости экстремальных засух в сельскохозяйственных районах Европейской территории России и Средней Азии в 1991–2020 гг. Приводятся результаты сопоставления временных рядов индексов с влагозапасами в почве. Статистика засух по ГТК и по индексу SPEI за исследуемый период демонстрирует похожие результаты, но индекс SPEI в среднем имеет незначительно более высокие коэффициенты корреляции с данными наблюдений, чем ГТК. Даны рекомендации по использованию индексов ГТК и SPEI в оперативной прогностической и исследовательской практике в работе Северо-Евразийского климатического центра.

Ключевые слова: показатели засушливости, стандартизированный индекс осадков и испаряемости, SPEI, гидротермический коэффициент, ГТК.

Comparative analysis of drought indices to assess drought conditions in agricultural regions of Northern Eurasia

S. V. Emelina^{1,2}, V. M. Khan^{1,2}

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

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
tkachukzn@gmail.com*

The paper analyzes two approaches to assessing drought conditions: the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) widely used in Russian agrometeorological practice and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The study evaluates the frequency of extreme droughts in agricultural regions of the European part of Russia and Central Asia from 1991 to 2020. The results of a comparison of the time series of these indices with observed soil moisture data are presented. Statistical analysis of droughts based on HTC and SPEI over the study period demonstrates similar results. However, SPEI generally exhibits slightly higher correlation coefficients with observational data than HTC. Recommendations are provided for the operational and research use of HTC and SPEI indices by the North Eurasian Climate Centre.

Keywords: drought indices, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), hydrothermal coefficient (HTC)

Введение

В связи с изменением климата и последствиями его изменений все больше внимания уделяется вопросам развития специализированного прогнозирования для различных секторов экономики. Именно засухи являются наиболее сложными распространенными гидроклиматическими опасностями, которые приводят к экономическим проблемам и финансовым рискам. Засухи в совокупности затрагивают большее количество людей, чем любые другие последствия, связанные с изменениями климата [1].

Для количественной оценки ключевых характеристик засух, включая их частоту, продолжительность, интенсивность и пространственную выраженность, широко применяются индексы засушливости [9, 11, 12]. Однако в настоящее время в исследовательской и оперативной практике не существует единого количественного показателя засухи. Каждый используемый показатель рассматривает ситуацию с засушливыми условиями с определенной точки зрения [7].

Цель данной работы заключается в сопоставлении методик определения интенсивности засух по двум одобренным Всемирной метеорологической организацией показателям засушливости – стандартизированному индексу осадков и испаряемости (SPEI) и гидротермическому коэффициенту Г.К. Селянинова (ГТК) для территории Северной Евразии.

Материалы и методы

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для оперативного мониторинга атмосферных засух используются два подхода: количество осадков в % нормы [4] и гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [12].

Гидротермический коэффициент увлажнения Г.К. Селянинова представляет собой соотношение суммы осадков за период со среднесуточными температурами выше 10 °С к сумме осадков за этот же период:

$$\text{ГТК} = \frac{\Sigma R_{>10}}{0,1 \Sigma T_{>10}}, \quad (1)$$

где $\Sigma R_{>10}$ – сумма осадков за период со среднесуточными температурами выше 10 °С; $\Sigma T_{>10}$ – сумма среднесуточных температур за период со среднесуточными температурами выше 10 °С.

ГТК выражается в долях единицы, при этом чем ниже его значение, тем ниже влагообеспеченность территории, ГТК, равный 1, соответствует балансу выпадающих осадков и испаряемости.

Целесообразность использования ГТК обусловлена не только удобством применения в автоматизированных расчетах на основе регулярно

поступающих декадных агрометтелеграмм и возможностью классифицировать засухи по интенсивности (сильная, средняя и слабая), но и достаточно тесной связью с урожайностью основных сельскохозяйственных культур во многих районах, что позволяет использовать его в прогностических целях [3, 6]. При этом в [7] упоминается, что методика определения интенсивности засухи по ГТК позволяет сравнивать соотношение тепла и влаги в различных географических точках между собой, но при определении засухи ее градации меняются в зависимости от зональности увлажнения и месяцев вегетационного сезона.

Однако подходы к оценке засушливых условий постоянно модернизируются, и в настоящее время большую популярность приобрел стандартизированный индекс осадков и испаряемости SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) [8]. Этот показатель учитывает влияние потенциального суммарного испарения на интенсивность засухи, при этом многомерный характер индекса позволяет выделять типы засухи и их влияние на различные системы. Для расчета SPEI используются данные по водному балансу (разность между осадками и потенциальной эвапотранспирацией), что обеспечивает более надежную оценку интенсивности засухи, чем при использовании только осадков. Баланс рассчитывается в различных временных масштабах, а полученные разности суммарных осадков и эвапотранспирации (наиболее близко соответствующей их распределению) приводятся к лог-логистическому распределению вероятностей:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}, \quad (2)$$

где D – разность между осадками и потенциальной эвапотранспирацией; α , β , γ – параметры масштаба, формы и расположения, которые оцениваются по выборке D .

При расчете SPEI важна оценка логарифмических параметров, поскольку это позволяет проводить мониторинг засухи по значениям индекса в пространстве и времени. Для этого необходимо, чтобы пространственные ряды SPEI в разных точках имели одинаковое среднее значение и стандартное отклонение; то же самое применимо к временным рядам SPEI, рассчитанным для одной точки. Значения индекса SPEI ниже нуля характеризуют условия увлажнения как засушливые. В данной работе проведено сопоставление индексов ГТК и SPEI.

В табл. 1 представлены критерии для оценки интенсивности засух, для индекса ГТК приведены показатели из [5], для индекса SPEI – из [7].

Для расчетов исторических рядов показателей засушливости использовались данные реанализа ERA5 [10] по температуре воздуха на 2 м, максимальной и минимальной температуре воздуха и осадков с пространственным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и временным разрешением 6 часов, которые были сформированы в среднесуточные архивы за период с 1991 по 2020 год. Исследование проводилось для сельскохозяйственных районов Северной Евразии ($35\text{--}75^\circ$ с. ш., $20\text{--}180^\circ$ в. д.), включая ЕТР.

Таблица 1. Критерии интенсивности засух по индексам SPEI и ГТК
Table 1. Drought intensity criteria based on SPEI and HTC indices

Классификация засух по интенсивности	SPEI	ГТК
Очень сильная (экстремальная) засуха	$SPEI \leq -2$	$ГТК \leq 0,3$
Сильная засуха	$-2 < SPEI \leq -1,5$	$0,3 < ГТК \leq 0,6$
Слабая засуха	$-1,5 < SPEI \leq -1$	$0,6 < ГТК \leq 0,8$
Умеренное или достаточное увлажнение	$-1 < SPEI \leq 0$	$ГТК \geq 0,81$

В большинстве исследований показана информативность показателей засушливости на основе их сопоставления друг с другом, в [5] был применен более объективный подход: было проведено сопоставление индексов ГТК и SPI с урожайностью зерновых и зернобобовых культур, при этом частные коэффициенты корреляции урожайности с ГТК и SPI весьма близки по значениям. В данной работе в качестве критерия для информативности показателей засушливости предлагается использовать архив данных по почвенным влагозапасам, предоставленный агрометеорологическим отделом Гидрометцентра России. Данный архив – это набор временных рядов по влагосодержанию в почвенном слое глубиной 100 см с апреля по август, измеряемых на агрометеорологических станциях и осредненных по 18 субъектам России: по Орловской, Липецкой, Тамбовской, Курской, Белгородской, Воронежской, Ульяновской, Пензенской, Самарской, Саратовской, Оренбургской, Волгоградской, Ростовской, Астраханской областям, Калмыкии, Башкирии, а также по Краснодарскому и Ставропольскому краям.

Стоит отметить, что результаты по Калмыкии и Астраханской области не вошли в настоящее исследование, так как из-за пропусков временные ряды не позволяли получить статистически значимые результаты. Архив составлен с 1958 года, однако в настоящей работе был рассмотрен временной период с 1991 по 2020 г. для сопоставления необходимой информации с индексами засушливости, рассчитанными по данным реанализа.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была проанализирована и сопоставлена повторяемость экстремальных засух на территории Средней Азии и на юге ЕТР. На рис. 1 приведена повторяемость экстремальной засухи (в %) по данным ГТК (рис. 1а) и SPEI (рис. 1б) за период 1991–2020 гг. Согласно данным табл. 1, засуха по ГТК – это значения индекса ниже 0,3, для SPEI – ниже -2. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что экстремальные засухи по оценке ГТК случаются чаще, чем по оценкам SPEI. За период

1991–2020 гг. по данным ГТК на территории Средней Азии и сельскохозяйственных регионов России повторяемость засух завышена на 5–15 %.

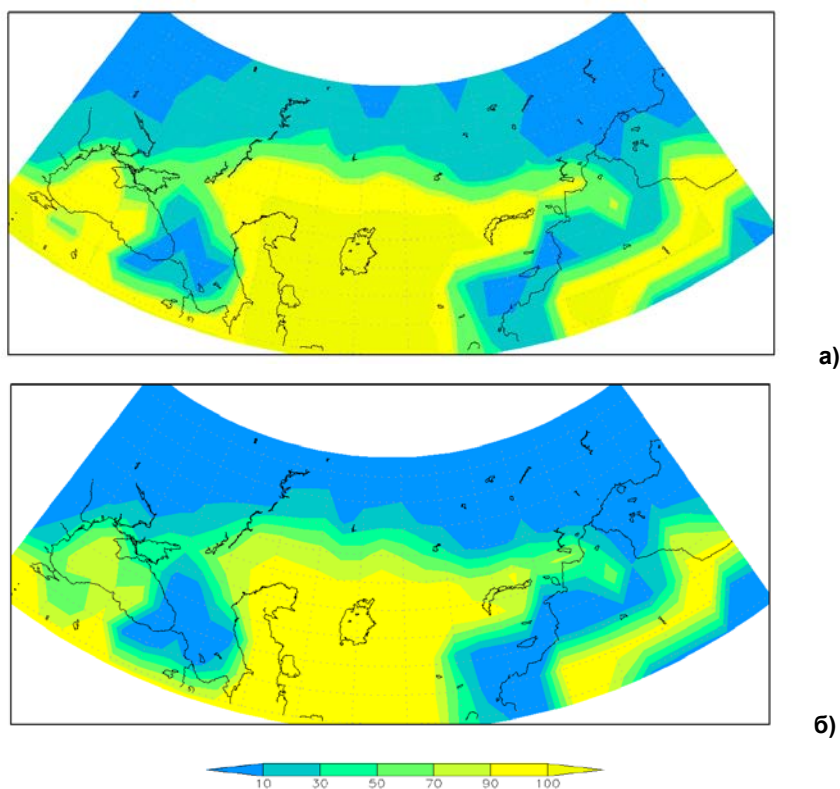


Рис. 1. Повторяемость экстремальной засухи (в %) на юге ЕТР и на территории Средней Азии по данным ГТК (а) и SPEI (б) в период 1991–2020 гг.

Fig. 1. Frequency of extreme drought (in %) in the south of the European part of Russia and in the territory of Central Asia according to the State Customs Committee (a) and the SPEI (б) in the period 1991–2020.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между аномалиями влагозапасов почвы на глубине 100 см и показателями засушливости SPEI и ГТК для летних условий в период 1991–2020 гг. для субъектов России, где на агрометеорологических станциях ведутся измерения запасов влаги на разных уровнях. Почти все полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимы при $p < 0,05$. Исключение – Оренбургская область, для которой значения r составляют 0,29 для индекса SPEI, 0,24 для индекса ГТК (они выделены курсивом в таблице). Наибольшие значения выделены жирным шрифтом: для Ростовской области SPEI = 0,78, ГТК = 0,78. Средние значения по всем регионам практически идентичны (0,60 для SPEI и 0,61 для ГТК).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между аномалиями влагозапасов почвы и показателями засушливости SPEI и ГТК для летних условий в период 1991–2020 гг.

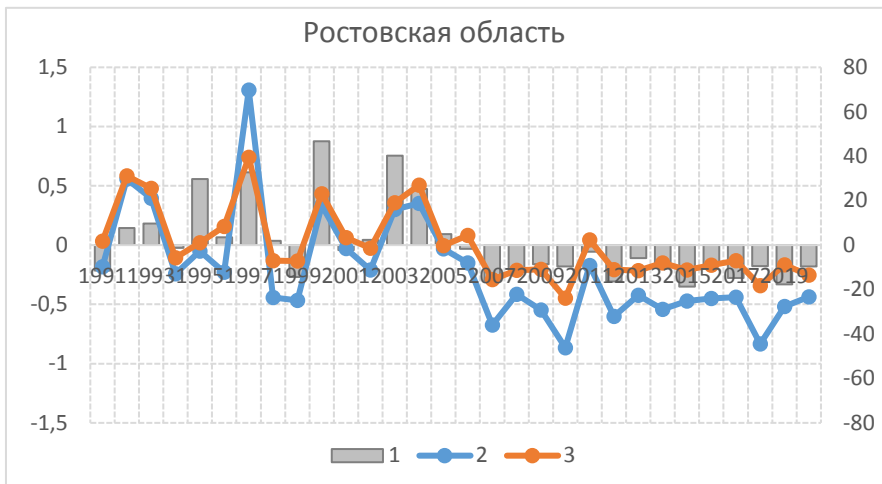
Table 2. Correlation coefficients between soil moisture anomalies and SPEI and ГТК aridity indices for summer conditions in the period 1991–2020

Субъект РФ	r (SPEI и ВЗ)	r (ГТК и ВЗ)	r (SPEI и ГТК)
Орловская	0,59 (0,51-0,66)	0,57 (0,49-0,64)	0,92 (0,90-0,94)
Воронежская	0,67 (0,60-0,73)	0,64 (0,56-0,70)	0,95 (0,93-0,96)
Липецкая	0,56 (0,48-0,63)	0,53 (0,45-0,60)	0,96 (0,95-0,97)
Тамбовская	0,60 (0,52-0,67)	0,61 (0,53-0,68)	0,94 (0,92-0,95)
Курская	0,61 (0,53-0,68)	0,64 (0,56-0,70)	0,68 (0,60-0,75)
Белгородская	0,70 (0,63-0,76)	0,62 (0,54-0,69)	0,92 (0,90-0,94)
Ульяновская	0,67 (0,60-0,73)	0,68 (0,61-0,74)	0,93 (0,91-0,95)
Пензенская	0,62 (0,54-0,69)	0,64 (0,56-0,71)	0,96 (0,95-0,97)
Самарская	0,66 (0,59-0,72)	0,68 (0,61-0,74)	0,95 (0,94-0,96)
Саратовская	0,41 (0,31-0,50)	0,49 (0,39-0,57)	0,92 (0,90-0,94)
Оренбургская	0,29 (0,18-0,39)	0,24 (0,13-0,34)	0,97 (0,96-0,98)
Волгоградская	0,56 (0,47-0,64)	0,47 (0,38-0,55)	0,90 (0,87-0,92)
Ростовская	0,78 (0,72-0,83)	0,78 (0,72-0,83)	0,96 (0,95-0,97)
Краснодарский край	0,45 (0,35-0,54)	0,54 (0,45-0,62)	0,92 (0,90-0,94)
Ставропольский край	0,57 (0,49-0,64)	0,55 (0,47-0,62)	0,93 (0,91-0,95)
Башкирия	0,63 (0,55-0,70)	0,56 (0,48-0,63)	0,95 (0,94-0,96)
Средний	0,59 (0,51-0,66)	0,58 (0,50-0,65)	0,92 (0,90-0,94)

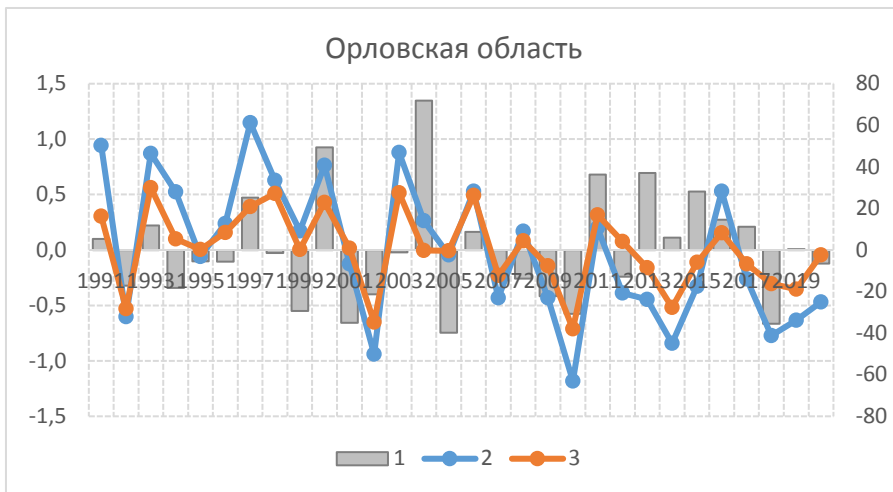
Примечание. курсивом выделены статистические не значимые результаты на p -value < 0,05, жирным выделены максимальные коэффициенты корреляции в скобках указан доверительный интервал.

Также можно отметить высокую корреляционную связь между самими показателями SPEI и ГТК (средний R равен 0,92, максимальный 0,96, минимальный 0,68). Полученные результаты высокой согласованности индексов хорошо согласуются с выводами, опубликованными в [2, 7].

На рис. 2 изображены временной ход аномалий влагозапасов в почве в 100 см слое, аномалий SPEI и ГТК в Ростовской (а) и в Орловской (б) областях летом за период 1991–2020 гг. Следует выделить выраженную синхронность между всеми исследуемыми показателями, особенно заметную в экстремально засушливые годы (например, в 2018 и особенно в 2010 гг. Также наблюдается тенденция к усилению засушливых условий в последнее десятилетие (2011–2020 гг.), причем в Ростовской области она проявляется ярче, чем в Орловской области.



а)



б)

Рис. 2. Временной ход аномалий влагозапасов в почве в 100 см слое (1) аномалий SPEI (2) и GTK (3) в Ростовской (а) и в Орловской областях (б) летом за период 1991–2020 гг.

Fig. 2. Dynamics of soil moisture content anomalies in the 100-cm layer (1), SPEI (2) and GTK (3) anomalies in the Rostov (a) and Oryol (б) regions in summer for the period 1991–2020.

Выводы

В статье проанализированы два подхода к оценке засушливых условий: широко используемый в отечественной агрометеорологической практике гидротермический коэффициент Селянинова (GTK) и стандартизованный индекс осадков и испаряемости (SPEI). Проанализирована оценка повторяемости экстремальных засух в сельскохозяйственных районах ЕТР

и Средней Азии в 1991–2020 гг. Показано, что индекс ГТК завышает повторяемость на 5–15 % относительно индекса SPEI.

Также временные ряды индексов за тот же 30-летний период были сопоставлены с данными наблюдений на агрометеорологических станциях за влагозапасами в почве. При таком подходе статистика засух по ГТК и по индексу SPEI за исследуемый период демонстрирует похожие результаты, но индекс SPEI в среднем имеет незначительно более высокие коэффициенты корреляции с данными наблюдений, чем ГТК. Полученные результаты высокой согласованности индексов хорошо согласуются с выводами, опубликованными в работах других авторов. С учетом простоты расчетов гидротермического коэффициента его целесообразно применять в оперативной практике.

Одним из результатов работы также является архив индекса SPEI, рассчитанный по реанализу ERA5, разрешением $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ на временном масштабе от 1 месяца до сезона, который можно в дальнейшем использовать в исследовательской работе и прогностической практике Северо-Евразийского климатического центра для прогноза засушливых условий на сезонных и межгодовых масштабах времени.

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

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание технологий, 2022. 124 с.
2. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Туткова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Известия РАН. Серия географическая. 2020. № 2. С. 207-217.
3. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизированного индекса осадков по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 147-161.
4. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.
5. Страшная А.И., Тищенко В.А., Береза О.В., Богомолова Н.А. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 357. С. 81-97.
6. Страшная А.И. Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых культур в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. 1993. Вып. 327. С. 15-22.
7. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 2. С. 79-94.
8. Begueria S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Int. J. Climatol. 2014. Vol. 34. P. 3001-3023.
9. Edwards D.C., McKee T.B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales // Climatology Report 97-2. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, 1997. 155 p.
10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. P. 1999-2049.

11. Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23. P. 1696-1718.

12. WMO-No. 1173. Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva: WMO, 2016. 52 p.

References

1. Tretiy ocenochnyy doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federacii. Obshchee rezyume. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2022, 124 s. [in Russ.].

2. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of Drylands in the European Part of Russia: Secular Trends and Links to Droughts. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*. 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207-217 [in Russ.].

3. Kleschenko A. D., Savitskaya O. V. Estimation of space-time distribution yield of grains and Standardized Precipitation Index on satellite and land information. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*. 2014, vol. 571, pp. 147-161 [in Russ.].

4. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk, VNIIGMI-MCD, 2012, 216 p. [in Russ.].

5. Strashnaya A.I., Tishtshenko V.A., Berioza O.V., Bogomolova N.A. On the possibility to use the standardized precipitation index for detecting droughts and in the forecasts of the quantitative estimates of the productivity of cereal crops and pulse crops. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*. 2015, vol. 357, pp. 81-97 [in Russ.].

6. Strashnaya A.I. Ispol'zovanie pokazateley uvlazhneniya dlya ocenki zasushlivosti i prognoza urozhaynosti zernovykh kul'tur v Povolzhskom ekonomicheskom rayone. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*. 1993, vol. 327, pp. 15-22 [in Russ.].

7. Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. On the comparability of some quantitative drought indices. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*. 2016, vol. 2, pp. 79-94 [in Russ.].

8. Beguería S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol*. 2014, vol. 34, pp. 3001-3023.

9. Edwards D.C., McKee T.B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, 1997, 155 p.

10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.

11. Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*. 2010, vol. 23, pp. 1696-1718.

12. WMO-No. 1173. Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva, WMO, 2016, 52 p.

Поступила 13.11.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 13.11.2025; accepted for publication 26.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-153-171>

УДК 551.579.5(470.1/.6)

Особенности пространственно-временной изменчивости влагозапасов в почве на Европейской территории России

П.С. Кланг¹, Л.Л. Тарасова¹, А.В. Черкасова²

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

*²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
agro-hmc@mecon.ru*

На длинных рядах (за период 1958–2024 гг.) проведено исследование статистической структуры поля запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под зерновыми культурами для Европейской территории России, оценено влияние наблюдаемых изменений климата на режим влажности почвы. Показано, что в XXI веке увлажнение почвы выше, чем в период 1958–1999 гг., и наблюдаемые в настоящее время климатические изменения несут в основном положительный характер для сельскохозяйственной отрасли России. Построены кривые сезонного хода запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы по современным данным, что может быть применимо в оперативной агрометеорологической практике. Проанализированы основные причины изменений – увеличение повторяемости теплых зим и цикличность климатической системы.

Ключевые слова: влажность почвы, климат, сезонный ход, вероятностные характеристики, корреляционная функция

Peculiarities of spatiotemporal variability of soil moisture in the European part of Russia

P.S. Klang¹, L.L. Tarasova¹, A.V. Cherkasova²

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

*²Russian State Hydrometeorological University, St.Petersburg, Russia
agro-hmc@mecon.ru*

Based on the long series of data (for 1958–2024), a statistical structure of the field of available moisture content in the meter layer of soil under grain crops for the European part of Russia was estimated, and an impact of observed climate change on the soil moisture regime was assessed. It is shown that in the 21st century, soil moisture content is higher than in 1958–1999, and currently observed climate changes are mainly positive for the agricultural industry in Russia. Seasonal variations in the available moisture content were built according to modern data, which can be applied in operational agrometeorological practice. The main reasons for the changes were analyzed: an increase in the frequency of warm winters and the cyclical nature of the climate system.

Keywords: soil moisture, climate, seasonal variations, probabilistic characteristics, correlation function

Введение

Вопросы, связанные с изучением пространственно-временной структуры поля влажности почвы, чрезвычайно актуальны в наше время. С одной стороны, увлажнение почвы интересно как ресурс возможной продуктивности, а следовательно, и эффективности сельского хозяйства. С другой стороны, изучение структуры поля влагозапасов важно для качественного воспроизведения баланса влаги в численных моделях погоды и климата.

В настоящей работе представлены результаты исследований по изучению статистической структуры поля влагозапасов и их районирования, а также наблюдаемых изменений режима влажности почвы, связанных с изменениями климата. Исследования проводилось для Европейской территории России, так как этот регион довольно хорошо охвачен наблюдениями.

Необходимо отметить, что сложность данной задачи для большинства исследователей связана с доступностью натурных данных, по этой причине работ по данной теме немного. Наиболее подробное исследование по агроклиматологии влажности почвы для различных физико-географических областей с типизацией по водному режиму было проведено Л.С. Кельчевской [5]. Для европейской части Союза ССР оценки пространственно-временной структуры поля запасов продуктивной влаги были выполнены А.В. Мещерской, Н.А. Болдыревой, Н.Д. Шапаевой [8], эта работа базировалась на данных наблюдений сети станций Госкомгидромета за период 1950–1977 гг. В справочнике под редакцией Л.С. Кельчевской [13] приведены основные характеристики поля запасов продуктивной влаги, рассчитанные на основе рядов 1942–1972 гг., а в аналогичном справочнике под редакцией В.А. Жукова [12] – за период 1946–1980 годов.

В настоящее время некоторые исследования, например [15], основываются на наборах данных реанализов, которые, с одной стороны, не имеют недостатков натурных данных (пропуски в рядах, ошибки и т. д.), а с другой – воспроизводят лишь общие закономерности поля и требуют дополнительной обработки с учетом системной ошибки [6]. Другие авторы, например С.А. Лавров, опираются на данные отдельных пунктов [7].

Таким образом, вопросы статистической структуры поля влажности почвы детально и теоретически обоснованно представлены на данных до 1980 г., в период современного климата они пока недостаточно изучены, и агрометеорологи Гидрометцентра России имеют преимущество, так как располагают данными наблюдений в полном объеме.

Материалы и методы исследования

В сельскохозяйственных районах Европейской территории России (ЕТР) корреспондентами Гидрометцентра России являются около 500 станций, на которых в том числе ведутся и наблюдения за влажностью почвы в верхнем (0–10 см), пахотном (0–20 см), полуметровом и метровом слоях почвы под различными сельскохозяйственными культурами [11]. На каждой

станции запасы продуктивной влаги определяются не менее, чем по трем ведущим в данном районе сельскохозяйственным культурам, таким образом ежедекадно в период активной вегетации в Гидрометцентр России поступают данные почти с 4000 участков. Такой объем информации позволяет оценивать макромасштабные аномалии водного режима почвы и степень благоприятности условий влагообеспеченности посевов как в пространственном, так и во временном аспекте.

Основой для работы были архивы средних по областям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под ранними яровыми и озимыми зерновыми культурами за период 1958–2024 гг. В ходе дальнейшего изложения указание на метровый слой почвы для краткости будет опущено.

Исторический архив данных отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России был сформирован в виде осредненных по области значений с 1 декады апреля по 3 декаду сентября за период с 1958 по 1999 год. В декады, когда наблюдения не проводились (до начала сева и после достижения восковой спелости зерновых культур), в архиве были пропуски. За период с 2000 по 2024 г. архив средних по области запасов продуктивной влаги рассчитывался авторами на основе декадных телеграмм в коде КН-21.

В [8] было статистически обосновано осреднение влагозапасов для оценки крупномасштабных особенностей поля на основе параметров корреляционной функции.

Построение пространственно-корреляционной функции [2, 4] влагозапасов в метровом слое почвы велось на основе данных наблюдательной сети Росгидромета. Нами были отобраны станции, имеющие наиболее продолжительные ряды агрометеорологических наблюдений в черноземной зоне Российской Федерации. В работе отбирались данные за июнь и июль, производилась их «очистка» методом 3σ , ошибки в наблюдениях были отбракованы и в дальнейших расчетах не использовались. Всего в отобранном массиве были данные с 266 станций (рис. 1а), количество наблюдений на которых за весь рассматриваемый период превышало 60 (максимальное количество наблюдений 126). Стоит отметить, что подобный расчет функции для столь обширной территории и на столь качественных материалах для исследования в новейшее время делается впервые.

По результатам расчетов (рис. 1б), параметр $r(0)$ – значение корреляционной функции при нулевом расстоянии, определяемое путем экстраполяции в нуль значений эмпирической корреляционной функции, – составляет 0,5, что согласуется с более ранними исследованиями. Невысокие значения $r(0)$, т. е. высокая пространственная неоднородность поля влагозапасов, связаны с существенными на близких расстояниях различиями механического состава почв, т. е. с их влагоудерживающей способностью, зависимостью увлажнения от рельефа и агротехнических мероприятий (различные типы орудий для обработки почвы в разной мере изменяют порозность почвы и, следовательно, ее полевую влагоемкость) [5, 12, 13].

В [8] расчеты проводились по 54 станциям юга европейской части СССР, включая Украину и Белоруссию, за период 1950–1970-х гг., $r(0)$ для метрового слоя почвы получился 0,4–0,6. В [14] на основе расчетов за период 1995–2006 гг. по 70 станциям, расположенным в центрально-черноземных областях и в Среднем Поволжье, $r(0) = 0,69$. Иными словами, связность поля в различные периоды остается практически неизменной, т. е. на относительно коротких временных периодах (меньших, чем время формирования типического почвенного профиля) в основе лежит не столько режим увлажнения (количество осадков, снежный покров, испарение), сколько физические свойства самой почвы.

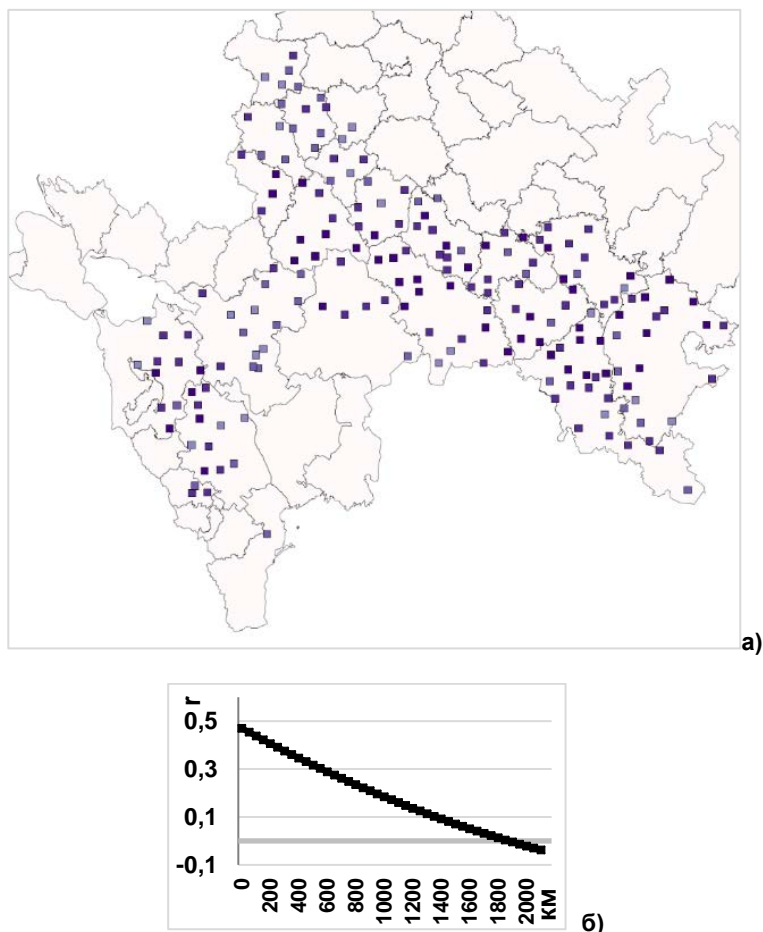


Рис. 1. Наблюдательная сеть станций Росгидромета в черноземной зоне (а) и пространственно-корреляционная функция (б) запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см.

Fig. 1. Observation network of Roshydromet stations in the Chernozem area (а) and spatial correlation function (б) of available soil moisture content in the layer 0–100 cm.

Анализ временных рядов влагозапасов в метровом слое почвы

Для изучения временной изменчивости рядов полученный архив длиной 67 лет был поделен на 3 подпериода: 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 гг. (табл. 1). Границы периодов были выделены условно по двадцатилетиям. Основой для такой разбивки массива была попытка показать динамику изменений влагозапасов со временем. Деление массива на до и после какого-то граничного, например 1990 г., в целом показывает аналогичное распределение параметров. Разбиение на более мелкие отрезки, например по 15 лет, увеличит долю пропусков в данных, что снизит качество анализа.

Таблица 1. Описательная статистика средних по области запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы по периодам 1958–1980 (I), 1981–1999 (II), 2000–2024 гг. (III)

Table 1. Descriptive statistics of average regional content of available moisture in the meter-thick soil layer for the periods 1958–1980 (I), 1981–1999 (II), 2000–2024 (III)

Территория	Период	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Экцесс	Асимметрия	Минимум	Максимум
Белгородская обл.	I	115	120	43	-0,7	-0,1	24	206
	II	132	138	43	-1,1	-0,2	51	211
	III	161	163	43	0,2	-0,2	48	267
Воронежская обл.	I	93	96	42	-1,0	-0,1	18	169
	II	118	125	38	-0,8	-0,2	33	202
	III	133	137	37	-0,3	-0,4	27	198
Курская обл.	I	122	129	47	-0,8	-0,4	17	216
	II	156	161	41	-1,1	-0,1	74	237
	III	179	183	39	-0,2	-0,5	66	258
Липецкая обл.	I	119	125	44	-0,5	-0,1	25	222
	II	131	131	40	-0,3	0,4	63	247
	III	138	139	38	0,0	0,3	55	246
Орловская обл.	I	160	163	45	-0,2	-0,3	35	252
	II	172	175	39	-0,5	-0,3	69	244
	III	178	179	42	0,0	-0,1	60	282
Тамбовская обл.	I	121	127	46	-0,8	-0,2	30	214
	II	137	135	52	-0,2	0,3	41	296
	III	155	155	41	-0,7	0,0	58	245
Пензенская обл.	I	119	122	47	-0,8	-0,1	17	215
	II	128	124	40	-0,5	0,2	50	232
	III	151	153	36	1,4	0,1	48	275
Ульяновская обл.	I	100	96	43	-0,1	0,2	17	238
	II	128	135	41	-0,8	-0,2	39	211
	III	130	129	46	0,6	0,2	6	286

Территория	Период	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Экссесс	Асимметрия	Минимум	Максимум
Самарская обл.	I	94	88	39	-0,3	0,3	20	218
	II	105	104	41	-0,7	0,2	25	213
	III	121	125	35	-0,7	-0,4	35	185
Саратовская обл.	I	78	69	41	-1,1	0,3	9	160
	II	97	107	43	-0,8	0,1	21	197
	III	111	112	34	0,1	-0,2	2	192
Оренбургская обл.	I	87	88	38	-0,9	0,1	18	172
	II	93	93	36	-1,1	0,0	24	166
	III	117	114	32	-0,6	0,2	60	199
Республика Башкортостан	I	121	122	43	0,0	0,2	24	258
	II	113	112	34	-0,4	0,2	48	205
	III	135	135	36	1,1	0,3	41	275
Ростовская обл.	I	75	76	39	-1,0	0,0	7	152
	II	89	86	37	-1,1	-0,1	20	161
	III	86	80	36	-1,0	0,1	13	156
Волгоградская обл.	I	79	79	42	-1,1	0,2	4	159
	II	81	80	35	-0,8	0,0	6	156
	III	84	87	31	-0,9	-0,1	19	143
Астраханская обл.	I	55	42	48	6,8	2,4	2	247
	II	69	60	43	-0,3	0,7	3	169
	III	108	108	67	1,9	1,3	25	289
Республика Калмыкия	I	80	77	41	0,1	0,5	3	190
	II	87	90	49	0,3	0,5	26	164
	III	59	57	43	0,5	0,7	0	169
Краснодарский край	I	109	116	48	-1,0	-0,2	13	193
	II	131	132	36	0,3	0,3	70	216
	III	114	117	39	-0,3	-0,4	13	180
Ставропольский край	I	66	68	37	0,2	0,6	9	169
	II	91	90	31	-0,2	0,0	17	161
	III	78	82	34	-0,9	-0,2	5	145

Вероятностные характеристики

Осреднение влагозапасов по области и месяцу существенно их сглаживает, однако позволяет выявить значимые особенности поля, в первую очередь по времени, т. е. позволяет судить о наблюдаемых климатических изменениях.

Из табл. 1 видно, что в большинстве регионов средние и медианные значения влагозапасов увеличились, причем этот рост значителен и составляет от 10 до 35 % от среднего за весь период. Изменчивость внутри периодов также изменилась в большую сторону, но не столь значительно.

Асимметрия и эксцесс, рассчитанные по периодам, как видно из табл. 1, довольно изменчивы. Вероятно, это связано с относительно короткими двадцатилетними периодами. Если рассматривать весь период 1958–2024 гг., то в большинстве областей эксцесс близок к нулю (распределение близко к нормальному), в Самарской, Саратовской, Ростовской и Волгоградской областях он отрицательный (распределение имеет гладкий пик), а в Астраханской области – положительный (острый пик). Асимметрия также практически повсеместно близка к нулю, лишь в Астраханской области она равна 1,7, т. е. «длинный хвост» распределения находится в области повышенных значений влагозапасов, большая часть данных сконцентрирована слева от средних (вероятно, этот факт объясняется орошением, а авторы рядов влагозапасов за 1958–1999 гг. не имели возможности учитывать агрофон).

Изменения экстремальных значений пояснить довольно сложно, между подпериодами они в ряде областей растут, а в ряде – понижаются. Возможно, это связано с числом станций-корреспондентов в разные периоды. За XXI век у нас имеется информация по большему числу станций, чем в XX веке, так как технологический прогресс в области телекоммуникаций позволил передавать большие объемы информации, и число станций-корреспондентов Гидрометцентра России увеличилось.

С точки зрения агрометеорологической оценки ресурсов почвенной влаги существенно значимо не столько само количество продуктивной влаги, сколько его соответствие доступности влаги для растений, т. е. условиям влагопотребления в различные периоды онтогенеза.

Нами были рассчитаны частоты по 7 градациям: суровая засуха (0–50 мм продуктивной влаги в метровом слое почвы), недостаточно (51–90 мм), удовлетворительно (91–120 мм), оптимум и ниже (121–140 мм), оптимум (141–160 мм), оптимум и выше (161–200 мм), переувлажнено (более 200 мм) за разные месяцы вегетационного периода по трем временным периодам 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 годов.

Данное исследование было проведено для каждой из областей, в настоящей статье для краткости приведем рисунки для четырех физико-географических областей (центрально-черноземные области, Среднее Поволжье, юг Урала, и южный регион (Южный федеральный округ и Ставропольский край)) (табл. 2). Деление на физико-агроклиматические регионы было выполнено в рамках НИР № НИОКР АААА-А20-120021490067-0.

На рис. 2 представлено распределение влагозапасов по градациям в апреле. В большинстве районов Черноземья весной увлажнение почвы во втором временном периоде повысилось по отношению к первому и в третьем по отношению ко второму, частота попадания в градации ниже 100 мм («суровая засуха» и «недостаточно», что не обеспечивает получение урожая зерновых колосовых культур) понизилась.

Несколько хуже ситуация на юге страны – в Южном федеральном округе и Ставропольском крае. Как видно из рис. 2, частота весенних засух

возросла с 3 % в периоды 1958–1980 и 1981–1999 гг., до 7 % в XXI веке. Однако по сумме двух неблагоприятных градаций («суровая засуха» и «недостаточно») ситуация улучшилась. Так, в период 1958–1980 гг. наиболее часто увлажнение почвы весной было недостаточным и пониженным (54 %), в период 1981–1999 и 2000–2024 гг. оно было удовлетворительным и несколько ниже оптимума (около 60 %), причем в последнем подпериоде оно было оптимальным и несколько ниже уже в 34 % лет.

Таблица 2. Регионы черноземной зоны ЕТР, объединенные по режиму влажности почвы

Table 2. Regions of the Chernozem Zone of the European part of Russia, grouped by soil moisture regime

Регион	Территория
Центрально-черноземные области	Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская, Тамбовская области
Средняя Волга	Пензенская, Самарская, Саратовская, Ульяновская области
Юг Урала	Оренбургская область, Республика Башкортостан
Юг ЕТР	Астраханская, Волгоградская, Ростовская области, Республика Калмыкия, Краснодарский край, Ставропольский край

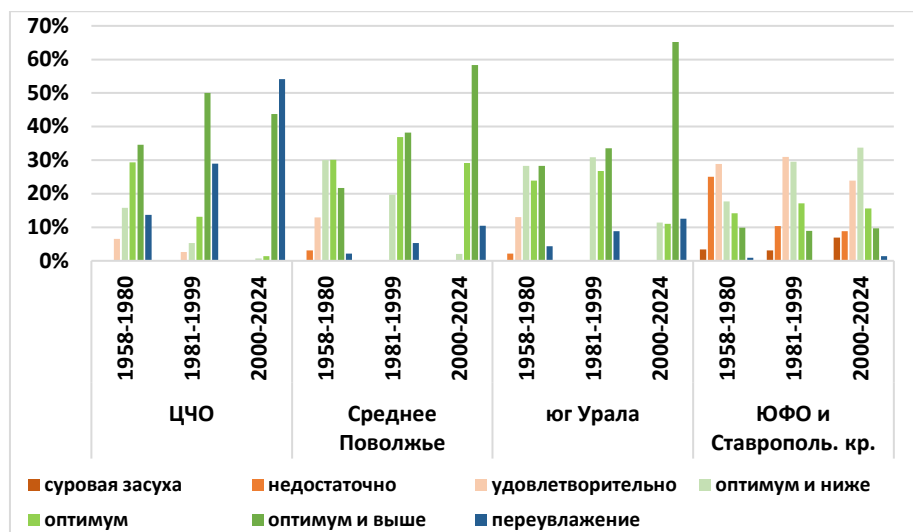


Рис. 2. Распределение по градациям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в апреле.

Fig. 2. Distribution by gradations of the available soil moisture content in the layer 0-100 cm in April.

Аналогичная ситуация в южном регионе наблюдается и в мае: число лет с недостаточным увлажнением падает (60, 34 и 35 % соответственно), а число лет с оптимальным увлажнением увеличивается (12, 20 и 25 %).

С началом календарного лета влагозапасы везде понижаются: посевы активно растут, затраты влаги на транспирацию и рост тканей начинают превышать поступление влаги с осадками. Вместе с тем тенденция к увеличению влагообеспеченности растений выражена довольно четко (рис. 3). В центрально-черноземных областях, Среднем Поволжье и на Южном Урале число лет с оптимальным увлажнением почвы возросло на 45–50 %, в южном регионе ситуация несколько хуже, здесь рост составил всего 10 %.

Особенно важно, что на юге страны в XXI веке сократилась частота суровых почвенных засух с 72 до 20 %. Однако нельзя утверждать, что эта тенденция сохранится, суровая засуха 2024 г., перешедшая в засуху 2025 г., существенно повлияла на продуктивность посевов в этом регионе [1].

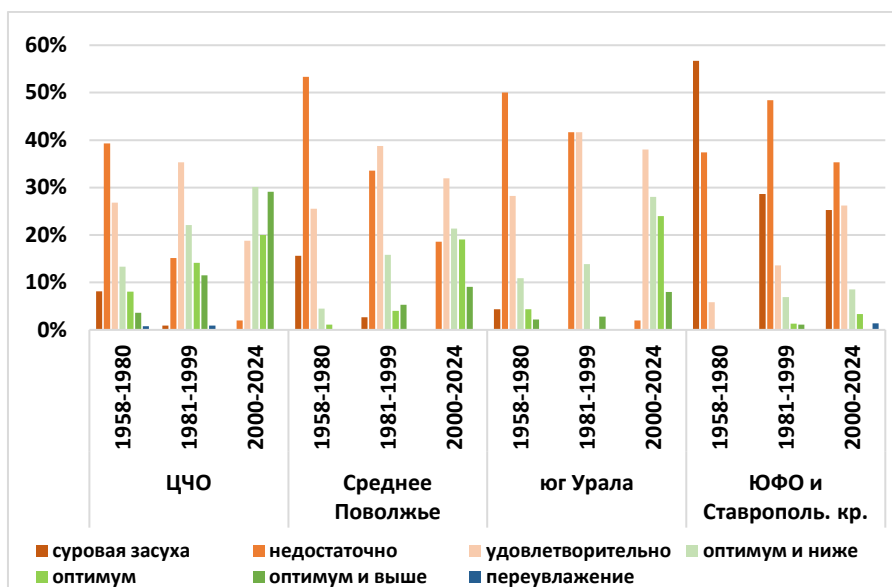


Рис. 3. Распределение по градациям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в июне.

Fig. 3. Distribution by gradations of the available soil moisture content in the layer 0-100 cm in June.

В июле и августе влагозапасы заметно понижаются и практически на всей территории варьируют от «удовлетворительно» до «суровой засухи» (за исключением центрально-черноземных областей). Однако число лет с плохими и недостаточными влагозапасами снизилось на 25–30 %, лишь на юге страны оно осталось неизменным. Вместе с тем в этот период озимые зерновые и зернобобовые культуры уже созревают и ведется их уборка, поэтому дефицит влаги не сказывается на их продуктивности.

В сентябре влажность почвы увеличивается за счет осадков. В этот период отбор проб для определения запасов продуктивной влаги проводят на полях с озимыми культурами или предназначенных под их посев. Озимые выращивают в основном по паровым предшественникам, т. е. по технологии, увеличивающей количество влаги в почве. Сев озимых в большинстве регионов приходится на конец августа-сентябрь, поэтому увлажнение почвы в этот период важно для качественного производства посевных работ и появления дружных всходов.

В центрально-черноземных областях в сентябре в отдельные годы возможно переувлажнение почвы, частота таких событий невелика, но если за период с 1958 по 1999 г. было всего два таких года, то в 2000–2024 гг. их было уже три, что малоблагоприятно, так как высокая влажность почвы существенно сдерживает ход полевых работ.

Заметно понизилось число лет с суровой засухой в сентябре в южном регионе. Если в период 1958–1980 гг. почвенная засуха наблюдалась в 65 % лет, то в период 2000–2024 гг. в большинстве лет (63 %) увлажнение почвы было недостаточным, а в каждом пятом году даже удовлетворительным. В сентябре в южном регионе сев озимых, как правило, еще только начинается, массовый сев производят в октябре, однако тенденция к уменьшению засушливости территории в сентябре в целом положительно влияет на условия для проведения полевых работ.

Сезонный ход влагозапасов

В ходе работы был оценен сезонный ход влагозапасов за период апрель – сентябрь для каждого физико-агроклиматического региона (табл. 2). Средние за декаду значения влажности почвы рассчитывались методом квадратичных сплайнов средних за месяц значений. Такой метод позволяет получить сглаженный сезонный ход влагозапасов, нивелируя отдельные выбросы значений, связанные с экстремальными событиями.

Сезонный ход влагозапасов уточняет ранее приведенные расчетные данные по средним значениям и повторяемости по грациям. На рис. 4 видно, что в настоящее время влагообеспеченность посевов растет во все декады вегетационного периода. Изменения неодинаковы по времени, в одних регионах наиболее значителен «скачок» влагозапасов от 60–80-х годов прошлого столетия к его последнему двадцатилетию, в других наибольшие изменения происходят уже в нынешнем столетии. Однако, учитывая, что годы начала и конца подпериодов были выбраны довольно условно и не имеют под собой значимых оснований, важна именно тенденция на увеличение.

По всем регионам сезонный ход влагозапасов за период 1958–1980 гг. хорошо согласуется с данными [5, 8, 13]. Косвенным образом это подтверждает качество наших данных.

Закономерно предположить, что повышение влагообеспеченности посевов приведет к росту урожайности. Для проверки этого утверждения

нами были рассчитаны коэффициенты корреляции средних за период апрель–июль аномалий влагозапасов в метровом слое почвы и отклонений урожайности зерновых и зернобобовых культур. В большинстве регионов коэффициент корреляции составил 0,5–0,6, что свидетельствует о значительном, но не решающем вкладе влагозапасов в рост сельскохозяйственного производства. На юге России корреляция слабее (0,4), то есть значительный рост урожайности в этом регионе (с 10–15 ц/га в 60–70-е годы прошлого века до 35–40 ц/га в последнее десятилетие) обусловлен прежде всего агротехнологическими и экономическими причинами.

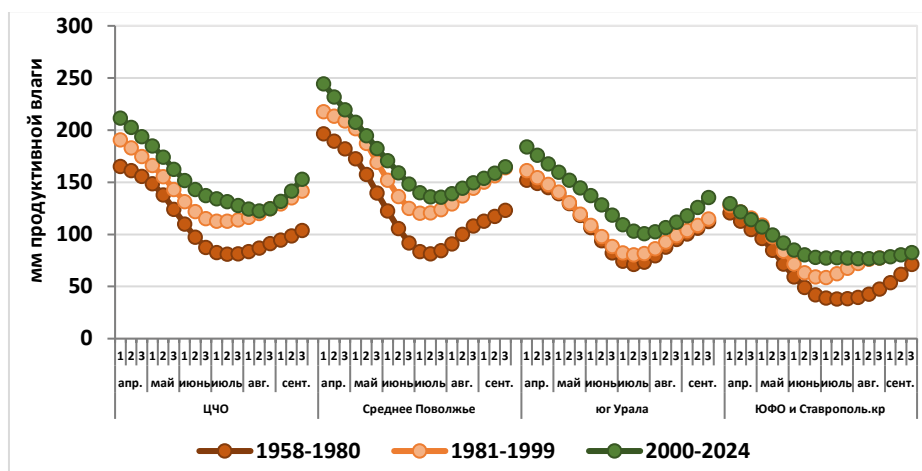


Рис. 4. Сезонный ход запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы.
Fig. 4. The seasonal variation of the available soil moisture content in the layer 0-100 cm.

Функции распределения

Повышение увлажнения почвы демонстрируют и кривые распределения Пуассона (весовые), построенные для разных областей/краев и месяцев.

На рис. 5 для примера представлены кривые распределения влагозапасов в метровом слое почвы в Ставропольском крае за апрель и июнь. На рис. 5а видно, что весной со временем форма кривых практически не меняется, а происходит плавное смещение в область больших значений.

Иная ситуация летом (рис. 5б). В первом подпериоде высота и острота кривой выше, чем во втором и третьем, причем кривые этих подпериодов практически идентичны.

Аналогичные результаты представлены в Национальном докладе [9]. По данным А.Г. Георгиади [9], многолетние изменения осредненных по административным районам запасов почвенной влаги под яровыми зерновыми культурами на значительной части Русской равнины характеризовались двумя долговременными периодами увлажнения: с 1958 по 1980 г.

наблюдалась фаза пониженных значений влагозапасов, которая сменилась фазой повышенных влагозапасов с 1980-х гг. Авторы отмечают, что продолжительность контрастных фаз варьировала в регионах в основном в пределах 20–30 лет.

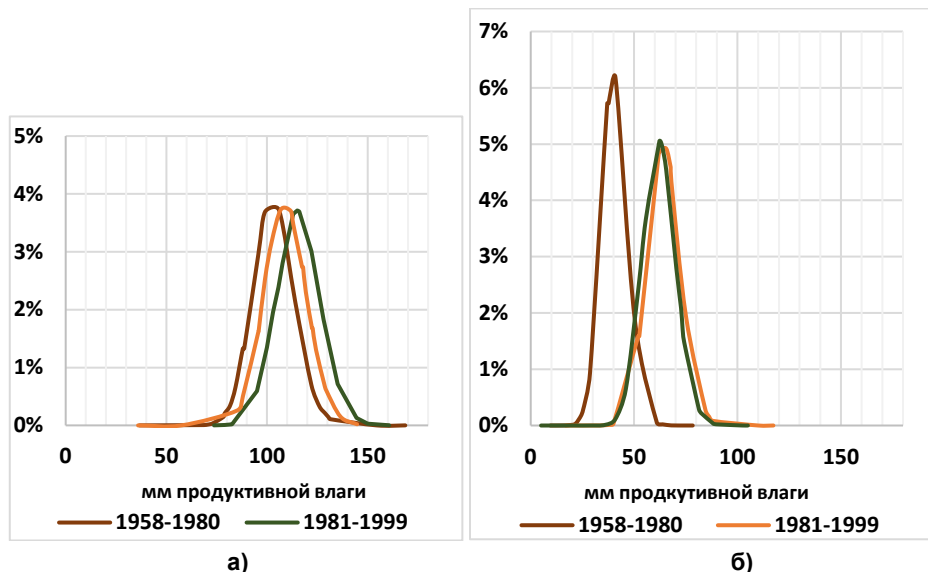


Рис. 5. Распределение Пуассона запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в Ставропольском крае в апреле (а) и июне (б).

Fig. 5. Poisson distribution of available moisture content in a meter-thick soil layer in Stavropol Krai in April (a) and June (б).

Параметры распределения подбираются исходя из отношения коэффициентов вариации и асимметрии. Если эта величина равна или превышает 2, то обычно используется распределение Пирсона III типа (четырёхпараметрическое γ -распределение) и другие распределения, а если она меньше 2, то распределение Крицкого – Менкеля (трехпараметрическое γ -распределение).

Нами были рассчитаны эмпирические кривые обеспеченности за весь период с 1958 по 2024 г. и проведено их сравнение с указанными выше аналитическими кривыми. Результаты исследования получились неустойчивыми: по одной области/краю в некоторые месяцы эмпирическое распределение хорошо аппроксимируется теоретическим, а в другие месяцы совершенно не совпадает.

Объясняется этот факт неоднородностью рядов, а именно тем, что влагозапасы являются резко отклоняющейся величиной со значительной погрешностью измерений, которая связана как с редкостью сети станций, ведущих данные наблюдения, так и со сложностью выполнения отбора проб и их инструментальной и расчетной обработки.

Анализ возможных причин межсезонной изменчивости влагозапасов

Наблюдаемый тренд на повышение влажности почвы, по-видимому, объясняется повышением количества осадков в период вегетации, а также увеличением количества влаги, накопленной в снежном покрове зимой.

По данным [16] за период 1976–2020 гг. изменения годовых сумм осадков незначительно, в Приволжском, Южном и Северо-Кавказском федеральных округах тренд статистически незначим. В зимне-весенний период тренд статистически значим на 5%-ном уровне и составляет 1,1–1,8 мм/месяц/10лет. Причем по сравнению с трендом за период 1976–2012 гг. тенденция увеличения количества годовых и весенних осадков усилилась и сохранилась тенденция к уменьшению количества летних осадков в центре и на юге ЕТР.

Таким образом, наиболее вероятно, что увеличение влажности почвы, в том числе и в летние месяцы, происходит именно за счет снеготаяния, а не из-за осадков летнего периода.

Нами были рассчитаны индексы суровости зимы W_i [10] для каждой области за период 1962–2024 гг.:

$$W_i = \frac{\Delta T}{\sigma_T} + \frac{\Delta R}{\sigma_R},$$

где T – температура воздуха; R – количество осадков; Δ – отклонения от средней величины; σ – среднее квадратическое отклонение. Для расчета используются значения этих параметров, осредненные за три зимних месяца (с декабря по февраль). При разделении зим приняты следующие градации параметра W_i : суровая (менее -2,0), малоснежная и холодная (от -1,9 до -0,6), нормальная (-0,6...0,6), многоснежная и теплая (более 0,6). На рис. 6 для краткости приведены осредненные по физико-агроклиматическим районам значения W_i .

Вероятно, что в теплые и многоснежные зимы промерзание почвы будет невелико (снег изолирует волны холода), весной мерзлый слой быстро оттаит и влага сможет свободно просачиваться в почву. Эта гипотеза не является исчерпывающей, так как на формирование влагозапасов влияет множество факторов, в том числе и сельскохозяйственная деятельность. Однако повторяемость теплых зим существенно возросла. В центрально-черноземных областях в период до 1980 г. повторяемость теплых зим колебалась по территории от 16 до 32 % (самая большая повторяемость теплых зим была в Краснодарском крае и Воронежской области), а в XXI веке она увеличилась до 50–70 %; в Среднем Поволжье и на Южном Урале повторяемость составила 5–16 и 33–58 % соответственно (значительно увеличилась повторяемость теплых зим в Республике Калмыкия, Ростовской, Курской, Липецкой, Орловской, Тамбовской и Пензенской областях). Холодных зим, напротив, стало меньше. Если в 1960–1970-е годы повторяемость холодных и малоснежных зим в разных областях колебалась от 50 до 70 % (наиболее часто в Курской, Липецкой, Орловской, Самарской

и Оренбургской областях), а каждая третья-пятая зима была суровой, то в настоящее время их повторяемость составляет 10–29 % (наиболее часто в Волгоградской, Оренбургской областях и Республике Башкортостан). На всей ЕТР суровая зима наблюдалась только в 2002–2003 гг. (на Южном Урале также и в 2011–2012 гг.).

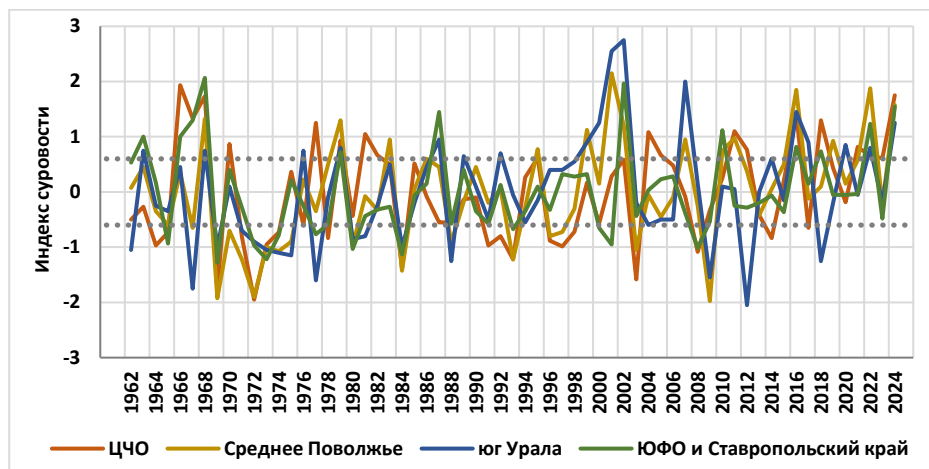


Рис. 6. Индекс суровости зимы (пунктирными линиями выделены границы нормальной зимы).

Fig. 6. Winter severity index (the dotted lines indicate the boundaries of a normal winter).

На повышение общего уровня влагозапасов влияет и изменение общего агротехнологического потенциала, в частности, изменения в технологии обработки почвы. Показать этот феномен по нашим данным возможно лишь косвенно. Гипотеза такова: если изменения (наклон линейного тренда) осадков и влагозапасов будут одинаковы, то внедрение новых приемов агротехники мало меняет уровень влагообеспеченности посевов; если же рост осадков выше, чем влагозапасов, то влияние отрицательное, и наоборот. Нами были рассчитаны тренды зимних осадков за период октябрь–март, т. е. период осеннего накопления влаги в почве и ее запаса в снежном покрове, и средних за вегетационный сезон (апрель–август) запасов продуктивной влаги. Например, в центрально-черноземных областях – агротехнологически высоко развитом регионе – тренд осадков составляет примерно 6 мм/сезон/10лет, а влагозапасов 10 мм/сезон/10лет, т. е. влажность почвы растет несколько быстрее осадков, ее формирующих.

Таким образом, можно утверждать, что увлажнение почвы растет в первую очередь за счет зимних осадков, причем можно предполагать, что за счет внедрения влагосберегающих технологий обработки почвы этот рост выше, чем он мог бы быть без них.

Также можно предположить, что изменение влагозапасов связано с колебаниями климатической системы, т. е. существуют циклы с низкой и высокой влажностью почвы.

При сравнении полученных нами значений средних по области влагозапасов за период 1958–1980 гг. и представленных в справочнике [12] значений за период 1946–1980 гг. заметна существенная разница (около 20–30 мм), в период 1946–1957 гг. влажность почвы была выше, чем в последующие годы до 1980 года. Это также косвенно указывает на цикличность влагозапасов.

Для исследования волн межсезонной изменчивости нами был применен Фурье-анализ, который позволяет провести спектральный анализ временного ряда и получить его амплитудно-частотную характеристику, которая показывает, с каким весом (вкладом) в исследуемом временном ряду присутствуют те или иные периодичности (гармоники).

По ряду сезонных аномалий, рассчитанных для каждой физико-агроклиматической области путем вычитания сезонного хода (табл. 2, рис. 4), был рассчитан тренд, затем он был вычтен из значений аномалий, после чего с помощью пакета анализа данных в Excel рассчитаны гармонические коэффициенты.

Опция «Анализ Фурье» Excel реализует алгоритм, получивший название быстрого преобразования Фурье. Он существенно упрощает расчеты, но накладывает требование на длину временного ряда. Число значений анализируемого ряда должно быть 2^n , где n – натуральное число. В нашем случае длина ряда составляет 67 лет, $2^6=64$, поэтому в качестве периода исследования возьмем 1961–2024 годы.

На рис. 7 для примера приведено два региона. Получено, что основной вклад в дисперсию дают гармоники с периодом от 2 до 4 лет и 20–30 лет.

По графикам среднегодовых аномалий влагозапасов в метровом слое почвы можно проследить примерные годы начала современного периода. На рис. 8 представлен пример такого графика для одного из рассматриваемых регионов. Современный период начался примерно в 2010 г., его можно охарактеризовать как «отрицательные аномалии на фоне общего роста влагозапасов». Если принять, что длительность цикла составляет 25 лет, то примерно к 2035 г. он закончится и, вероятно, начнется период с большей повторяемостью засух. Конечно, данная гипотеза не является прогнозом и носит всего лишь характер предположения.

В настоящее время в агроклиматических исследованиях преобладает метод трендов (например, [3, 16]), но основе которого строятся прогнозы на ближайшие годы и десятилетия. На наш взгляд, такой подход существенно недоучитывает изменчивость агроклимата, хотя он, конечно, имеет неоспоримое преимущество в виде легкости выполнения расчетов. Как можно видеть на рис. 8, в аномалиях влагозапасов четко прослеживается периодичность, поэтому коэффициенты тренда явно зависимы от периода расчета.

По знаку выделенных аномалий влагозапасов в метровом слое почвы можно указать примерные годы периодов отрицательной и положительной фазы.

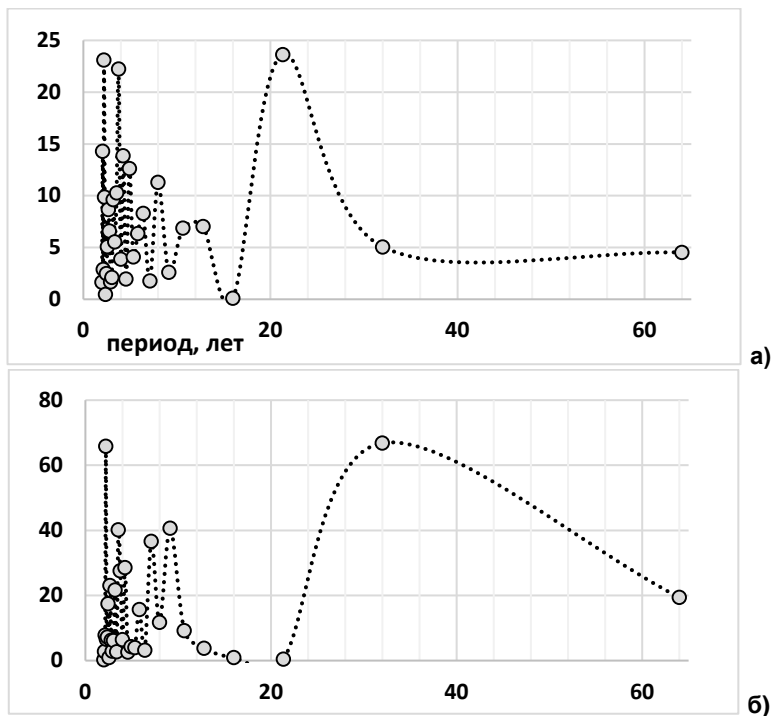


Рис. 7. Дисперсия гармоник Фурье для Верхневолжского региона (а) и центральных нечерноземных областей (б).

Fig. 7. Dispersion of Fourier harmonics for the Upper Volga region (а) and central non-chernozem regions (б).

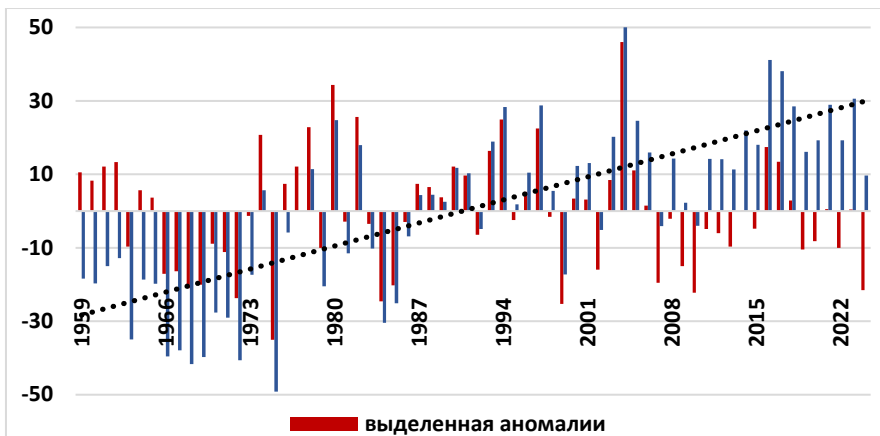


Рис. 8. Аномалии влагозапасов в метровом слое почвы и выделенные аномалии (с вычтенным трендом) для центрально-черноземных областей.

Fig. 8. Anomalies of available moisture content in a meter-thick soil layer and highlighted anomalies (with subtracted trend) for the central chernozem regions.

Отрицательная фаза в большинстве физико-агроклиматических регионов продолжалась до 1975–1988 гг., что близко к границе условно выделенных нами первого и второго подпериодов (1980 г). Положительная фаза началась примерно в 2005–2010 гг., что также близко к границе третьего подпериода (2000 г.). Таким образом, границы рассматриваемых периодов, выделенные на основе длительного опыта оперативной агрометеорологической работы одного из авторов, близки к естественным периодам циклов влагозапасов и полученные результаты обладают достаточной репрезентативностью.

Выводы

Изучение пространственно-временной структуры поля влажности почвы чрезвычайно актуально как для оценки продуктивности и эффективности сельского хозяйства, так и для качественного воспроизведения баланса влаги в численных моделях погоды и климата.

В настоящее время исследование изменений в структуре поля почвенной влаги особенно важно для оценки последствий климатических изменений. Аналогичные оценки были выполнены одним из авторов статьи в конце нулевых годов XXI века, тогда был сделан вывод о том, что влагозапасы в целом растут, но значения остаются внутри обычных для рассматриваемых территорий категорий (градаций) увлажнения. За прошедшие полтора десятка лет накопленные изменения влагозапасов столь значительны, что в большинстве регионов они изменились на градацию в сторону улучшения влагообеспеченности посевов.

На основе литературных источников и выполненных расчетов показано, что связность поля в различные периоды остается практически неизменной, т. е. в основе лежит не столько вариативность компонент баланса почвенной влаги (количество осадков, снежный покров, испарение), сколько физические свойства самой почвы.

Осреднение влагозапасов по области и месяцу существенно сглаживает их, но позволяет выявить основные особенности наблюдаемых климатических изменений. Произведены оценки основных статистических характеристик для областей/краёв/республик Европейской территории России за периоды 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 гг. и рассчитаны кривые сезонного хода для четырех физико-агроклиматических регионов. Показано, что в настоящее время влагообеспеченность посевов растет во все декады вегетационного периода, наблюдаемые в настоящее время климатические изменения имеют положительное влияние на сельскохозяйственную отрасль России. Изменения не одинаковы по времени, в одних регионах наиболее значителен «скачок» влагозапасов от 60–80-х годов прошлого столетия к его последнему двадцатилетию, в других наибольшие изменения происходят уже в нынешнем столетии.

Основными причинами наблюдаемых изменений являются потепление зим и циклы климатической системы. На Европейской территории России до 1980-х годов наблюдалась отрицательная фаза, а в XXI веке – положительная фаза циклов увлажнения почвы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-17-00314, <https://rscf.ru/project/25-17-00314>.

Список литературы

1. Валовые сборы сельскохозяйственных культур по Российской Федерации (по категориям хозяйств). Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 17.09.2025)
2. Гандин Л.С., Коган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 360 с.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 135 с.
4. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
5. Кельчевская Л.С. Влажность почв Европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 183 с.
6. Кланг П. С., Хан В. М., Тарасова Л. Л. Оценка объемной влажности почвы реанализа ERA5 по данным станционных наблюдений влагозапасов в регионах Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 4 (394). С. 146-162. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-146-162
7. Лавров С.А. Влияние климатических изменений на влажность почвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 19-39. DOI: 10.35567/19994508-2025-2-19-39
8. Мецнерская А. В., Болдырева Н. А., Шанаева Н. Д. Средние областные запасы продуктивной влаги в почве и высота снежного покрова: Статистический анализ и примеры использования. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 243 с.
9. Национальный доклад "Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)" / Под редакцией Р.С.-Х. Эдельгериева. Том 3. М.: ООО "Издательство МБА", 2021. 700 с.
10. Попов А.В. О возможности прогноза теплых многоснежных и холодных зим малоснежных зим. // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 156. С. 77-84.
11. РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11 Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Ч. 1. Основные агрометеорологические наблюдения. М.: Росгидромет, 2000. 374 с.
12. Средние многолетние запасы продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми зерновыми культурами по областям, краям, республикам и экономическим районам. Т. 1. Европейская часть СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 123 с.
13. Средние многолетние и вероятные характеристики запасов продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми культурами. Т. 1 / под ред. Л.С. Кельчевской. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 292 с.
14. Тарасова Л.Л. Пространственно-временная структура поля запасов продуктивной влаги в почвах черноземной зоны европейской части России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2008. № 2. С. 57-61.
15. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Современные климатические тенденции изменений испарения и влажности почвы на юге европейской России // Аридные экосистемы. 2023. № 3 (96). С. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-4-14
16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.

References

1. Valovyye sbory selskokhozyaystvennykh kultur po Rossiyskoy Federatsii (po kategoriyam khozyaystv). Federal State Statistics Service. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (date of request: 17.09.2025) [in Russ].
2. Gandin L.S., Kogan R.L. Statisticheskiye metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh. Leningrad: Gidrometeizdat publ., 1976. 360 p. [in Russ].

3. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2024 god. Moscow, Rosgidromet publ., 2025. 135 p. [in Russ].
4. Isayev A.A. Statistika v meteorologii i klimatologii. Moscow, Publishing house MGU publ., 1988 [in Russ].
5. Kelchevskaya L.S. Vlazhnost pochv Evropeyskoy chasti USSR. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983. 183 p. [in Russ].
6. Klang P.S., Khan V.M., Tarasova L.L. Otsenka obyemnoy vlazhnosti pochvy reanaliza ERA5 po dannym stantsionnykh nablyudeniyy vlagozapasov v regionakh Rossiyskoy Federatsii [Estimation of volumetric soil moisture from ERA5 reanalysis according to the station observations of moisture reserves in the regions of the Russian Federation]. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2024. vol. 394, no. 4, pp. 146-162. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-146-162 [in Russ].
7. Lavrov S.A. Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na vlazhnost pochvy [The effect of climate change on soil moisture]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problem, tekhnologii, upravleniye [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*. 2025, no. 2, pp. 19-39. DOI: 10.35567/19994508-2025-2-19-39 [in Russ].
8. Meshcherskaya A.V., Boldyreva N.A., Shapayeva N.D. Sredniye oblastnyye zapasy produktivnoy vlagi v pochve i vysota snezhnogo pokrova: Statisticheskii analiz i primery ispolzovaniya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1982, 243 p. [in Russ].
9. Natsionalnyy doklad "Globalnyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi. mery preduprezhdeniya. borby. likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnyye meropriyatiya (selskoye i lesnoye khozyaystvo)". Tom 3. Moscow: Publishing house MBA Publ., 2021, 700 p. [in Russ].
10. Popov A.V. O vozmozhnosti prognoza teplykh mnogosnezhnykh i kholodnykh zim malosnezhnykh zim. *Trudy Gidromettsentra USSR*. 1975, vyp. 156, pp. 77-84.
11. ПД 52.33.217-99 Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp. 11 Agrometeorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh i postakh. Ch.1. Osnovnyye agrometeorologicheskie nablyudeniya. Moscow, Rosgidromet publ., 2000. 374p. [in Russ].
12. Sredniye mnogoletniye zapasy produktivnoy vlagi pod ozimymi i rannimi yarovymi zernovymi kulturami po oblastyam. krayam. respublikam i ekonomicheskim rayonam. T. 1. Evropeyskaya chast USSR. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 123 p. [in Russ].
13. Sredniye mnogoletniye i veroyatnyye kharakteristiki zapasov produktivnoy vlagi pod ozimymi i rannimi yarovymi kulturami. T. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 292 p. [in Russ].
14. Tarasova L.L. Prostranstvenno-vremennaya struktura polya zapasov produktivnoy vlagi v pochvakh chernozemnoy zony evropeyskoy chasti Rossii [Spatial-temporal analysis of productive moisture reserves in soils of the chernozem zone of the european part of Russia]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]*. 2008, no. 2, pp. 57-61 [in Russ].
15. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Sovremennyye klimaticheskiye tendentsii izmeneniy ispareniya i vlazhnosti pochvy na yuge evropeyskoy Rossii [Current climatic trends in evaporation and soil moisture changes in the south of European Russia]. *Aridnyye ekosistemy [Arid Ecosystems]*. 2023, vol. 13, no. 3, pp. 239-247. DOI: 10.1134/s2079096123030150
16. Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Sankt-Peterburg, Naukoyemkiye tekhnologii Publ., 2022, 676 p. [in Russ].

Поступила 30.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 30.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-172-178>

УДК 551.58

Тенденции промерзания почвы на территории Архангельской области в условиях изменения климата

И.В. Грищенко

*Архангельское региональное отделение
Русского географического общества, г. Архангельск, Россия
ovenir2011@yandex.ru*

Проведен анализ изменения параметров промерзания почвы (глубины промерзания почвы и сроков промерзания) на территории Архангельской области за период 1961–2020 гг., а также за 30-летия в рамках этого периода (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг.). Установлено уменьшение глубины промерзания в течение всех периодов, за исключением 1961–1990 гг. Рассчитаны коэффициенты линейного тренда для глубины промерзания почвы. Установлена тенденция смещения дат наступления первого и устойчивого промерзания на более поздние сроки.

Ключевые слова: глубина промерзания, даты первого и устойчивого промерзания, температура приземного слоя воздуха, линейный тренд

Soil freezing trends in the Arkhangelsk region in a changing climate

I.V. Grishchenko

*Arkhangelsk regional branch of the Russian Geographical Society,
Arkhangelsk, Russia
ovenir2011@yandex.ru*

An analysis of changes in soil freezing parameters (freezing depth and freezing time) in the Arkhangelsk region for a period of 1961–2020, as well as for 30-years intervals within this period (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020), was conducted. A decrease in the freezing depth was revealed during all periods, except for 1961–1990. The linear trend coefficients for the freezing depth were calculated. A trend towards a shift to later dates was found in the dates of the onset of the first and stable freezing.

Keywords: freezing depth, dates of first and stable freezing, surface air temperature, linear trend

Введение

Одной из важнейших климатических характеристик является глубина промерзания почвы. Глубина промерзания определяет условия перезимовки зимующих культур. В весенний период она влияет на формирование стока талых вод, а также на увлажнение почвы после схода снежного покрова. Глубокое промерзание препятствует проникновению талой воды в нижние слои почвы.

Глубина промерзания почвы, на основе которой производят расчеты промерзания грунтов, имеет важное прикладное значение. Она учитывается при прокладке магистральных газо- и нефтепроводов, при строительстве фундаментов различных сооружений. В условиях изменения климата расчеты промерзания грунтов приобретают особое значение [4].

Промерзание почвы характеризуется глубиной промерзания и датами начала промерзания – первого и устойчивого, а также датами оттаивания – первого и полного.

Глубина промерзания почвы зависит от многих факторов, прежде всего, от температуры воздуха и толщины снежного покрова, а также от типа почвы, теплоемкости, теплопроводности и влажности почвы, от обработки почвы и наличия растительности.

Основным фактором, содействующим промерзанию почвы, является температура приземного слоя воздуха. Так, в [6] указывается на зависимость глубины промерзания почвы от суммы отрицательных температур воздуха за холодный период года.

Позднее было установлено, что многолетние изменения среднегодовой температуры грунтов на Восточно-Европейской равнине определяются в большей мере изменениями температуры воздуха, чем изменениями высоты снежного покрова. Отопляющее действие снежного покрова здесь ослаблено. В Сибири, напротив, изменения среднегодовой температуры грунтов определяются в большей мере изменениями высоты снежного покрова, чем изменениями температуры воздуха [5].

Для анализа промерзания почвы на территории Архангельской области была создана база данных за период максимального увеличения промерзания (февраль-март) по средней температуре воздуха и глубине промерзания почвы (см), за период октябрь-январь по датам первого и устойчивого промерзания за 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010 и 1991–2020 гг. по 22 метеорологическим станциям (рисунок).

Для каждого наблюдательного пункта были построены линейные тренды с использованием уравнения регрессии: $y(t) = b_1 t + b_0$, где $y(t)$ – среднее значение величины параметра; b_0 – оценка среднего значения величины; b_1 – оценка коэффициента линейного тренда; t – время в годах.

Тенденции изменения параметров промерзания почвы

Архангельская область занимает на Европейском Севере значительную территорию – 556 тыс. км². Поэтому разнообразие температурного режима, форм рельефа, растительности, почвы приводит к существенным различиям в глубине промерзания почвы.

Промерзание почвы на территории Архангельской области в среднем начинается в третьей декаде октября – первой декаде ноября и достигает своего максимума в конце марта. Наиболее существенное увеличение глубины промерзания происходит в феврале-марте. В весенний период оттаивание почвы идет как снизу, так и сверху мерзлого слоя. В случае возврата

холодов верхний талый слой может вновь замерзнуть, и тогда на некоторой глубине образуется прослойка незамерзшей почвы.



Рис. Метеорологические станции на территории Архангельской области с наблюдениями за промерзанием почвы.

Fig. Meteorological stations in the Arkhangelsk region with observations of soil freezing.

За период 1961–2020 гг. глубина промерзания почвы на большей части территории области к концу марта в среднем составляла от 50 до 70 см, на юго-востоке области 75–87 см, на северо-востоке (Мезенский и Лешуконский районы) – от 100 до 115 см, менее всего – на побережье Онежского залива (30–33 см) и в Коношском районе (15–17 см).

Расчет значений максимальной глубины промерзания за 30-летние периоды, которые можно условно принять за климатическую норму этой характеристики, показывает, что величина глубины промерзания меняется существенным образом, а именно происходит уменьшение ее значений.

Так, за период 1991–2020 гг. средняя глубина промерзания оказалась значительно меньше по сравнению с предыдущими 30-летними периодами, а также с периодом 1961–2020 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Средняя глубина (см) промерзания почвы за 30-летние периоды по данным метеорологических станций Архангельской области
Table 1. The average depth (cm) of soil freezing over 30-year periods according to the meteorological stations in the Arkhangelsk region

30-летний период	Метеорологические станции Архангельской области						
	Мезень	Онега	Каргополь	Шангалы	Вилегодск	В. Тойма	Холмогоры
1961–2020	113	32	62	35	74	52	42
1961–1990	134	43	81	51	88	73	66
1971–2000	122	39	70	35	74	56	45
1981–2010	106	29	52	22	66	41	27
1991–2020	91	21	43	18	61	32	20

Вместе с тем в период 1961–1990 гг. промерзание оказалось наибольшим.

Средняя за февраль–март (период максимального увеличения глубины промерзания) температура воздуха по 30-летиям имела тенденцию к повышению. Наиболее холодным оказался период 1961–1990 гг., а наиболее теплым – период 1991–2020 гг. (табл. 2).

Таблица 2. Средняя за февраль–март температура воздуха (°C) по 30-летним периодам по данным метеорологических станций Архангельской области
Table 2. Average air temperature for February–March (°C) for 30-year periods according to the meteorological stations in the Arkhangelsk region

30-летний период	Метеорологические станции Архангельской области						
	Мезень	Онега	Каргополь	Шангалы	Вилегодск	В. Тойма	Холмогоры
1961–2020	-12,5	-10,1	-10,4	-11,1	-12,8	-12,1	-11,6
1961–1990	-13,5	-11,2	-11,6	-12,1	-13,9	-13,3	-12,8
1971–2000	-12,8	-10,4	-10,7	-11,3	-13,1	-12,5	-11,9
1981–2010	-12,6	-10,1	-10,3	-10,9	-12,7	-12,1	-11,6
1991–2020	-11,5	-9,0	-9,2	-10	-11,8	-10,9	-10,4

Соответственно, в период 1961–1990 гг. промерзание в среднем оказалось наибольшим, а в период 1991–2020 гг. – наименьшим.

В разрезе наблюдений по годам наибольшее промерзание наблюдалось в зимние сезоны с 1966 по 1980 г., когда на большей части территории области глубина промерзания почвы достигала 100–150 см. С конца 80-х годов XX века промерзание на глубину более 100 см отмечалось лишь в отдельные годы и в отдельных районах, в основном на северо-востоке области [1].

Абсолютный максимум глубины промерзания почвы в период 1961–2020 гг. был отмечен в зимний сезон 1969–1970 гг. также на северо-востоке Архангельской области (метеорологическая станция Койнас) и составил 209 см.

Вместе с тем в 2018 г. промерзание почвы в Коношском, Красноборском, Верхнетоемском районах составило всего 1–3 см [1].

Расчет линейного тренда глубины промерзания почвы за период 1961–2020 гг. показывает, что наблюдается тенденция уменьшения глубины промерзания почвы на всей территории Архангельской области, коэффициент тренда (b_1) колеблется в пределах от -0,6 до -1,4 см/год. В последнее тридцатилетие (1991–2020 гг.) тенденция уменьшения глубины промерзания почвы сохраняется, но по данным некоторых метеорологических станций скорость этого процесса становится меньше (табл. 3).

Таблица 3. Параметры линейных трендов глубины промерзания почвы за февраль–март 1961–2020 и 1991–2020 гг. по данным метеорологических станций Архангельской области

Table 3. The parameters of the linear trends in soil freezing depth for February–March in 1961–2020 and 1991–2020 based on data from meteorological stations in the Arkhangelsk region

Метеостанция	Коэффициент тренда b_1 , см/10 лет		Коэффициент детерминации, %	
	1961–2020	1991–2020	1961–2020	1991–2020
Мезень	-1,3	-1,2	41,2	12,2
Онега	-0,6	-0,6	22,7	15,3
Каргополь	-1,2	-1,0	44,5	2,7
Шангалы	-0,9	-0,1	27,6	0,2
Вилегодск	-1,4	-0,1	37,3	0,2
В. Тойма	-1,2	-0,1	32,4	0,1
Холмогоры	-1,4	-0,4	45,9	5,1

О тенденции изменения глубины промерзания можно судить также и по историческим данным. Так, газета «Архангельск» за 21 августа 1909 г. писала, что «...при рытье канавы на ул. Серафимовича (центр Архангельска) на глубине 1 аршина (около 70 см) была встречена мерзлая земля...»,

а в этой же газете за июнь 1913 г. сообщалось, что «...при аналогичных земляных работах, несмотря на теплую погоду и дожди, также была встречена мерзлая земля...» [2], то есть в начале XX века даже летом на глубине более 0,5 м сохранялся мерзлый слой почвы.

В настоящее время в районе Архангельска промерзание почвы наблюдается с ноября по апрель и составляет в среднем 40–42 см.

Температура воздуха существенным образом влияет и на сроки первого и устойчивого промерзания.

Если за период 1961–2020 гг. средние даты первого промерзания почвы на территории области приходились на 22–23 октября, то в XXI веке начало промерзания сместилось на более поздние сроки. За период 1991–2020 гг. оно стало в среднем начинаться 28–29 октября.

Средние даты устойчивого промерзания почвы за период 1961–2020 гг. приходились на 14–16 ноября, за период 1991–2020 гг. эти даты сместились на 20–21 ноября.

Самые ранние даты первого промерзания почвы на территории области были зафиксированы в первой пятидневке октября 1977 г. в связи с установлением уже в начале октября отрицательной температуры воздуха, которая оказалась ниже нормы на 5–7 °С.

Самые поздние даты первого промерзания пришлись на конец ноября 2020 года.

В связи с увеличением частоты оттепелей в этом регионе в ноябре-декабре [3], в XXI веке стали наблюдаться аномально поздние даты устойчивого промерзания, а именно декабрь (2003, 2006, 2008, 2009, 2015 гг.) и январь (2016, 2017 гг.).

Заключение

Изменение климата, наблюдаемое в настоящее время, подтверждается и динамикой такой важной климатической характеристики, как промерзание почвы. Исследование, проведенное по данным метеостанций, расположенных на территории Архангельской области, показывает, что происходит уменьшение глубины промерзания на всей территории области, а даты первого и устойчивого промерзания смещаются на более поздние сроки.

Наибольшие аномалии проявляются в сроках наступления устойчивого промерзания. Зафиксированы случаи наступления устойчивого промерзания почвы в декабре и январе.

Список литературы

1. Грищенко И.В. Климат Архангельской области, Архангельск: КИРА, 2021, 232 с.
2. Грищенко И.В. Опасные природные явления на Европейском Севере. Архангельск: КИРА, 2023. 235 с.
3. Грищенко И. В. Тенденции в возникновении оттепелей на территории Архангельской области // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1 (371). С. 119–126.

4. *Климат России* / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 655 с.
5. *Шерстюков А. Б.* Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2009. 127 с.
6. *Шкадова А.К.* Температурный режим почв на территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 239 с.

References

1. *Grishchenko I.V.* Klimat Arhangel'skoj oblasti, Arhangel'sk, KIRA publ., 2021, 232 p. [in Russ.].
2. *Grishchenko I.V.* Opasnye prirodnye yavleniya na Evropejskom Severe. Arhangel'sk, KIRA publ., 2023, 235 p. [in Russ.].
3. *Grishchenko I.V.* Tendencii v vozniknovenii ottepelej na territorii [Arhangel'skoj oblasti Trends in the occurrence of thaws in the Arkhangelsk region]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting]. 2019, no. 1 (371), pp. 119-126 [in Russ.].
4. *Klimat Rossii: Pod red. N.V. Kobyshevoj.* Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2001, 655 p. [in Russ.].
5. *Sherstyukov A.B.* Izmeneniya klimata i ih posledstviya v zone mnogoletnej merzloty Rossii. Obninsk: GU VNIIGMI-MCD publ., 2009. 127 p. [in Russ.].
6. *Shkadova A.K.* Temperaturnyj rezhim pochv na territorii SSSR. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1979, 239 p. [in Russ.].

*Поступила 17.11.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 17.11.2025; accepted for publication 26.11.2025.*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»**

1. В журнале публикуются статьи по проблемам современных исследований в области теории и практики гидрометеорологического прогнозирования. Статья должна быть оригинальным законченным научным исследованием, в ней рекомендуется особо подчеркнуть научный вклад автора.

Согласно этике научных публикаций, авторы не должны допускать дублирования публикаций, предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

2. В целях обеспечения качества публикуемых материалов и соблюдения авторских прав, все поступающие в редакцию журнала статьи проходят проверку на плагиат (наличие заимствований) через систему «*Antiplagiat*» и только после этого отправляются на рецензирование.

3 Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному одностороннему слепому *рецензированию*. Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии с изложенными ниже требованиями. Не соответствующие требованиям рукописи будут возвращены авторам.

5. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи с заглавием статьи на русском и английском языках;
- индекс УДК, соответствующий теме статьи;
- фамилии и инициалы всех авторов (полностью). Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;
- аффилиация (организация и ее местонахождение) для всех авторов. Автор может указать в аффилиации более одной (2–3) организации с условием, что такая множественная аффилиация при приведении описываемых результатов научных исследований полностью оправдана и достоверна;
 - текст авторского резюме (далее – аннотация) на русском и английском языках;
 - ключевые слова на русском и английском языках;
 - иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
 - названия таблиц и подрисуночные подписи на русском и английском языках;
- акт(ы) экспертизы (1 экз.).

6. *Структура статьи* обычно включает введение с постановкой проблемы и указанием актуальности, цели и задачи, методы, результаты, заключение. В конце статьи могут быть приведены благодарности лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, дана ссылка на номера грантов на выполнение работы. *Благодарности даются на русском, а затем на английском языках.*

Объем статьи – до 20 стр. текста (через 1,5 интервала), включая таблицы, рисунки и список литературы. Объем заказных статей определяется редколлегией.

Текст набирается в формате Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование

абзацного отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

– заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);

– в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;

– в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;

– в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к *аннотации*:

– аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),

– содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);

– в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;

– аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

– расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;

– отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;

– выстраиваться от общего к частному;

– включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список *литературы* должен быть пронумерован и

упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила российского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м², Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел, например, 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подрисуночной подписи (11 кегль):

Рис. 1. Название рисунка.

15. *Формулы* набираются только с использованием редакторов формул Microsoft MathType или Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул.

16. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

17. Авторы должны ознакомиться и следовать этике научных публикаций, размещенной на сайте издания <https://meteoinfo.ru/ethics-scientific-publications>

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ
журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»**

Список литературы оформляют с применением правил, предусмотренных действующими ГОСТ (7.82-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления»; 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»; 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка»). Ссылки на литературные источники в списке располагают в алфавитном порядке по фамилии первого автора, сначала приводятся издания на русском языке, затем – на иностранных. Работы одного автора указываются по возрастанию годов издания. В тексте ссылки на номера источников даются в квадратных скобках.

Примеры:

1) книги:

Зуев А.А. Заглавие (обязательно полное). 5-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 2009. 99 с.

Берг Л.С. Очерки по истории русских географических открытий. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 296 с.

Ferguson-Smith V.A. The indications for screening for fetal chromosomal aberration // Prenatal Diagnosis Inserm / Ed. by Boue A. Paris, 1976. P. 81-94.

2) диссертации и авторефераты:

Натанов Я.М. Название диссертации: Дис. ... канд. (докт.) геогр. наук. М.: Название учреждения, 2008. 108 с.

Натанов Я.М. Название диссертации: Автореф. дис. ... канд. (докт.) геогр. наук. М.: Название учреждения, 2008. 20 с.

3) статьи:

Горюнов Н.Л. Название статьи // Название журнала (сокращенное и без кавычек). 1989. Т. 66, № 9. С. 99-102.

Алексеев Г.В., Нагурный А.П. Роль морского льда в формировании годового цикла двуокиси углерода в Арктике // ДАН. 2007. Т. 417, № 4. С. 541-544.

Nicolaides K.N. Screening for fetal chromosomal abnormalities need to change the rules // Ultrasound Obstet. Gynecol. 1994. Vol. 4, no. 3. P. 353-355.

EPICA Community Members. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica // Nature. 2006. Vol. 444. P. 195-198.

4) электронный ресурс:

Егорин С.В. Район Тепли-Джжмарай-Казбек. 2003.
http://www.mountain.ru/world_mounts/caucasia/kasbek/2003/opisanie/

После формирования блока Списка литературы, его представляют на английском языке под заголовком **References**, повторяя список литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, они полностью повторяются в References. Совершенно недопустимо при этом в References для оформления ссылок использовать российский ГОСТ.

1) ссылки на иностранные публикации в References:

Author A.A., Author B.B., Author C.C. Title of article. Title of journal. 2010, vol. 30, no 2, pp. 496-507.

2) статьи из переводных российских журналов:

Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. Thunderstorm activity forecasting based on the model of cumulonimbus cloud electrification. Russ. Meteorol. Hydrol. 2017, vol. 42, no. 2, pp. 77-87. [in Russ.].

3) статья в электронном журнале:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. J. Computer-Mediated Communication. 1999, vol. 5, no. 2, available at: www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/ [in Russ.].

Общая схема описания источника литературы в References:

- ФИО авторов через запятую (транслитерация) – *курсив*;
- транслитерация заглавия на английский язык;
- перевод заглавия – заключается в квадратные скобки;
- транслитерация название источника – *курсив*;
- название источника на английском языке (если есть) – заключается в квадратные скобки;
- выходные данные (место издания, год, номер выпуска, страницы) с обозначениями на английском языке, название города пишем полностью;
- указание на язык работы.

Kozachun G.U., Lapko N.A. Sovremennaya tipologiya zhilykh zdaniy. Chast' II [Modern typology of residential units. Part 2]. Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction], 2011, no. 2, pp. 14-17 [in Russ.].

4) материалы конференции:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact". Moscow, 2007, pp. 267-272 [in Russ.].

Несколько правил:

•рекомендуем использовать для транслитерации специальные интернет-ресурсы: <http://www.translit.ru>

•в выходных данных публикаций в ссылках (статей, книг) необходимо указывать количество страниц публикации: диапазон страниц в издании указывается "pp." перед страницами; количество страниц в полном издании (книге) – указывается как "p." после указания количества страниц;

•необходимо убирать специальные разделители между полями ("/", "–");

•полное место издания пишется на английском языке. Издательство лучше обозначать добавлением слова Publ. Название издательства оставляем транслитерированным.

•если описываемая публикация имеет doi, его обязательно надо указывать в библиографическом описании в References, так как этот идентификатор является наиболее точным источником информации о статье;

•нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников;

•в описаниях русскоязычных учебников, учебных пособий не следует указывать тип изданий;

•англоязычные названия ВУЗов, журналов и т.д. можно найти на сайте <http://elibrary.ru>.

5) книги (монографии, сборники, труды конференций в целом):

Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii [White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation]. Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology. Moscow, LKI, 2007 [in Russ.].

Nenashv M.F. Poslednee pravitel'stvo SSSR [Last government of the USSR]. Moscow: Krom Publ., 1993, 221 p. [in Russ.].

Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovaniye gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002, 140 p. [in Russ.].

Latyshev V.N. Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting]. Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009 [in Russ.].

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 4 (398)

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

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@metcom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 10.12.2025. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11,5. Тираж 130 экз. Заказ № 1409
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»