

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»

**№ 1 (395)**

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

---

---

**HYDROMETEOROLOGICAL  
RESEARCH and FORECASTING**

**No. 1 (395)**

Москва  
2025

**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.

На основе атмосферной модели ICON разработана иерархическая ансамблевая система краткосрочного прогноза погоды. Описывается вычислительная система RANGES, предназначенная для расчета климатической области распространения природного явления на основе гидрометеорологических величин и индексов. По данным 36 глобальных численных моделей из международного проекта CMIP6 рассматривается качество воспроизведения сезонного цикла и среднегодовых величин атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем. Исследуется реакция растительности Крыма на изменения климатических характеристик на примере вегетационного индекса NDVI за период 2000–2023 гг. Дается сравнительный анализ синоптических условий и численных прогнозов двух случаев опасных конвективных явлений в Московском регионе 5–6 и 20 июня 2024 г. Представлен анализ измерений уровня моря и ветрового волнения в заливе Анива Охотского моря в июне–августе 2023 г. Предложена система методик прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище на реке Урал. Описываются особенности температуры воздуха в Прикаспийском регионе Азербайджана за период 1961–2023 гг. Исследуется влияние приливных сил Луны и Солнца на половодья на реках Урал, Тобол, Ишим, Вагай и Ока в 1970 и 2024 годах.

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

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*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 Hydrometcenter of Russia» established in 1947.

A hierarchical ensemble system for short-range weather forecasting was developed based on the ICON atmospheric model. The RANGES computing system is described, which is designed to compute the climatic range of a natural phenomenon based on hydrometeorological variables and indices. Based on the data 36 global numerical models from the international CMIP6 project, the quality of reproduction of the seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea is analyzed. The response of the Crimean vegetation to changes in climatic characteristics is studied using the NDVI vegetation index for the period of 2000–2023. A comparative analysis of synoptic conditions and numerical forecasts of two cases of severe convective events in the Moscow region on June 5–6 and 20, 2024 is given. An analysis of measurements of sea level and wind waves in the Aniva Bay (the Sea of Okhotsk) in June–August 2023 is presented. A system of methods for predicting the water inflow into the Iriklikskoe Reservoir on the Ural River is proposed. The peculiarities of air temperature in the Caspian region of Azerbaijan for the period of 1961–2023 are described. The influence of tidal forces of the Moon and the Sun on floods on the Ural, Tobol, Ishim, Vagai, and Oka rivers in 1970 and 2024 is investigated.

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

**EDITORIAL BOARD:**

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

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

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

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

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

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

**Zaimskikh G.A.**, PhD in Engineering Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Simonov Yu.A.**, Doctor of Geographical Sciences, Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ***Метеорологические прогнозы, математическое моделирование***

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| О применении ансамблевых методов в краткосрочных региональных прогнозах погоды .....                                         | 6  |
| <i>Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Алферов Д.Ю.,<br/>Розинкина И.А., Ривин Г.С.</i>                                             |    |
| Система RANGES: структура, порядок расчета и пример применения .....                                                         | 37 |
| <i>Богданович А.Ю.</i>                                                                                                       |    |
| О воспроизведении сезонного хода и среднегодовых осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6 .....              | 51 |
| <i>Полонский А.Б., Сухонос П.А.</i>                                                                                          |    |
| Влияние крупномасштабных климатических индексов на растительный покров на территории Крымского полуострова .....             | 70 |
| <i>Красовская В.С., Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н., Лубков А.С.</i>                                                        |    |
| Условия возникновения и прогноз сильных ливней и шквалов в Московском регионе на примере двух случаев в июне 2024 года ..... | 95 |
| <i>Дмитриева Т.Г., Алексеева А.А.</i>                                                                                        |    |

### ***Расчеты и прогнозы элементов режима морей и океанов***

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море) .....       | 118 |
| <i>Мысленков С.А., Пицальник В.М., Кондрашов А.А.,<br/>Купцова О.В., Архипкин В.С., Латковская Е.М.</i> |     |

### ***Гидрологические прогнозы***

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Прогнозирование притока воды в Ириклинское водохранилище .....                      | 131 |
| <i>Арефьева О.Н., Голоднюк Н.Е., Симонов Ю.А.,<br/>Христофоров А.В., Юмина Н.М.</i> |     |

### ***Климатические исследования, обзоры***

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Современные особенности температурного режима воздуха в Прикаспийском регионе Азербайджана ..... | 149 |
| <i>Гусейнов Дж.С., Исмаилова Н.Н.</i>                                                            |     |

### ***Дискуссионный раздел***

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Исследование цикличности опасных гидрометеорологических явлений ..... | 165 |
| <i>Сидоренков Н.С., Сильницкая М.И.</i>                               |     |

## CONTENTS

### ***Meteorological forecasts, mathematical modeling***

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| On the application of ensemble methods in short-range regional forecasting .....                                               | 6  |
| <i>Astakhova E.D., Bundel A.Yu., Alferov D.Yu.,<br/>Rozinkina I.A., Rivin G.S.</i>                                             |    |
| The RANGES system: structure, calculation procedure<br>and application example .....                                           | 37 |
| <i>Bogdanovich A.Yu.</i>                                                                                                       |    |
| Reproducibility of seasonal cycle and annual amount of precipitation<br>over the Black Sea from CMIP6 models .....             | 51 |
| <i>Polonsky A.B., Sukhonos P.A.</i>                                                                                            |    |
| The impact of large-scale climate oscillations on the vegetation cover<br>on the Crimean Peninsula .....                       | 70 |
| <i>Krasovskaya V.S., Voskresenskaya E.N., Maslova V.N., Lubkov A.S.</i>                                                        |    |
| Conditions for occurrence and forecasting of heavy rains and squalls<br>in the Moscow region: Case Studies for June 2024 ..... | 95 |
| <i>Dmitrieva T.G., Alekseeva A.A.</i>                                                                                          |    |

### ***Computing and forecasting of the marine environment parameters***

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Analysis of sea level measurements and wind wave<br>parameters in Aniva Bay (Sea of Okhotsk) .....            | 118 |
| <i>Myslenkov S.A., Pishchalnik V.M., Kondrashov A.A.,<br/>Kuptsova O.V., Arkhipkin V.S., Latkovskaya E.M.</i> |     |

### ***Hydrological forecasts***

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A Forecasting water inflow into the Iriklienskoe Reservoir .....                         | 131 |
| <i>Arefyeva O.N., Golodnyuk N.E., Simonov Yu.A.,<br/>Khristoforov A.V., Yumina. N.M.</i> |     |

### ***Climate research, reviews***

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Modern features of air temperature in the Caspian region of Azerbaijan ..... | 149 |
| <i>Huseynov J.S., Ismailova N.N.</i>                                         |     |

### ***Discussion section***

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Investigation of the cyclic nature of severe hydrometeorological events ..... | 165 |
| <i>Sidorenkov N.S., Silnitskaya M.I.</i>                                      |     |

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-6-36>

УДК 551.509.313

## **О применении ансамблевых методов в краткосрочных региональных прогнозах**

***Е.Д. Астахова<sup>1</sup>, А.Ю. Бундель<sup>1</sup>, Д.Ю. Алферов<sup>1</sup>,  
И.А. Розинкина<sup>1,2</sup>, Г.С. Ривин<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

*Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>Московский государственный университет*

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

*elena\_ast\_hmc@mail.ru*

Разработана иерархическая ансамблевая система краткосрочного прогноза погоды, основанная на негидростатической модели ICON. Глобальная система ICON-Ru-EPS с шагом горизонтальной сетки модели 40 км по глобусу и 20 км по Европейской территории России является источником начальных и граничных условий для региональной системы ICON-Ru2-EPS по территории Центрального федерального округа (ЦФО) с шагом сетки около 2,2 км и явным разрешением глубокой конвекции. Верификация прогнозов по региональной ансамблевой системе ICON-Ru2-EPS с помощью пакета METplus показала высокое качество вероятностных прогнозов и необходимость сочетания разнообразных метрик при анализе результатов. Исследована эффективность метода случайного возмущения параметров схем подсчетных процессов для учета несовершенства модели в ансамблевом прогнозе высокого разрешения по территории ЦФО. Подготовлены рекомендации по выбору возмущаемых параметров и размеру регионального ансамбля.

*Ключевые слова:* региональный ансамблевый прогноз, случайные возмущения параметров, неопределенность модели, негидростатическая модель ICON, верификация ансамблевых прогнозов, пакет METplus

## **On the application of ensemble methods in short-range regional forecasting**

***E.D. Astakhova<sup>1</sup>, A.Yu. Bundel<sup>1</sup>, D.Yu. Alferov<sup>1</sup>,  
I.A. Rozinkina<sup>1,2</sup>, G.S. Rivin<sup>1,2</sup>***

*<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*elena\_ast\_hmc@mail.ru*

A hierarchical ensemble system for short-term forecasting based on the non-hydrostatic ICON model has been developed. The global ICON-Ru-EPS system with a model horizontal grid step of 40 km over the globe and 20 km over the European part of Russia is a source of initial and boundary conditions for the regional ICON-Ru2-EPS system over the Central Federal District of Russia (CFD) with a grid step of about 2,2 km and explicitly resolved deep convection. A detailed verification of the regional ensemble system ICON-Ru2-EPS was performed using the METplus package. The high quality of probabilistic forecasts was demonstrated as well as the need to combine various metrics when analyzing the results.

The efficiency of the random parameter perturbation method for accounting for model uncertainty in high-resolution ensemble forecasting was investigated for the CFD domain. Recommendations were prepared on the parameters to perturb and on the size of the regional ensemble.

*Keywords:* regional ensemble forecast, random parameter perturbations, model uncertainty, non-hydrostatic ICON model, verification of ensemble forecasts, METplus package

## Введение

Одной из основных проблем в численном прогнозировании погоды является неопределенность, связанная с неточностью начальных и граничных условий для интегрирования атмосферных моделей и несовершенством самих моделей. Ансамблевое прогнозирование позволяет оценить эту неопределенность, используя серию прогнозов с незначительно измененными начальными/граничными условиями и/или моделями, что способствует повышению доверия к прогнозам. Агрегирование результатов множества прогнозов в рамках ансамблевого подхода позволяет частично компенсировать ошибки отдельных прогностических реализаций, тем самым увеличивая точность итогового (среднего по ансамблю) прогноза.

Применение ансамблевых методов в глобальном моделировании началось в конце 20 века [13, 28, 44, 59, 60]. Первоначально методы ансамблевого прогнозирования были использованы для того, чтобы учесть неопределенность прогноза, возникающую за счет неточности начальных данных. Однако дальнейшие исследования показали, что при учете только неопределенности начальных условий разброс ансамбля (корень квадратный из средней дисперсии ансамбля относительно его среднего) оказывается слишком малым (в идеале, разброс ансамбля должен быть статистически согласованным с ошибками ансамблевого среднего и детерминированного прогноза) и необходимо учитывать вклад несовершенства модели [14, 38, 61]. В настоящее время разработан ряд методов учета как неопределенности данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, так и неопределенностей, связанных с моделью [8, 14, 16, 17, 19, 29, 30, 36, 38, 39, 47, 55, 58, 61, 69, 70, 71]. Глобальные ансамблевые системы используются во всех основных мировых прогностических центрах для составления прогнозов на срок от 3 до 14 дней и в основном предназначены для описания неопределенностей, возникающих за счет бароклинной неустойчивости синоптического масштаба. (Применение ансамблей в долгосрочных, сезонных и субсезонных прогнозах в данной статье не рассматривается.)

Однако неопределенности возникают и на меньших пространственно-временных масштабах. Кроме неопределенностей, проявляющихся на региональных масштабах и являющихся следствием явлений более крупного масштаба (например, штормы, связанные с быстрым циклогенезом), имеется значительная неопределенность в локальной погоде. Локальные эффекты и надежность их предсказания интересны пользователям, желающим получать ежедневную оперативную информацию о таких параметрах, как приземная температура, скорость и порывы ветра, продолжительность,

количество и тип осадков, время и место их выпадения, облачность нижнего яруса, видимость. Эти параметры характеризуются большой пространственно-временной изменчивостью.

В последнее время для повышения точности и надежности прогнозов погоды на небольших территориях активно разрабатываются мезомасштабные региональные ансамблевые системы. Прогнозы этих систем особенно ценны для предсказания редких и экстремальных погодных явлений, таких как сильные штормы, ливни и торнадо, которые могут привести к серьезным последствиям.

Для того, чтобы корректно описать неопределенности прогноза на коротких интервалах времени и на мезо-бета (20–200 км) и мезо-гамма (2–20 км) масштабе, ансамблевые системы должны отвечать следующим требованиям [11, 68]:

- модель, используемая в системе ансамблевого прогноза, должна иметь достаточно высокое разрешение;
- масштаб возмущений начальных условий должен соответствовать масштабу изменчивости, описываемой мезомасштабной моделью;
- возмущения, вносимые в начальные условия, должны давать эффект с самого начала прогноза и отражать неопределенность анализа;
- возмущения модели должны быть адекватно учтены, так как в случае мезомасштабного прогнозирования их учет может оказаться даже более важным, чем учет неопределенности начальных условий [15, 66];
- возмущения боковых граничных условий должны быть согласованы с возмущениями начальных условий. Это требование не всегда удовлетворяется, однако ряд авторов показывает, что его выполнение приводит к улучшению качества прогноза [35, 68] и позволяет избежать возможных неустойчивостей. Однако в этом вопросе нет однозначных рекомендаций. Например, по результатам экспериментов с системой AROME-EPS (шаг сетки 2,5 км) Бутье с соавторами [10] сделали вывод, что согласованность начальных и граничных возмущений не существенна с метеорологической точки зрения. Одновременно авторы подчеркнули перспективность использования ансамблевой системы усвоения данных для подготовки начальных условий для ансамбля. Подобной позиции придерживается и Немецкая служба погоды (Deutscher Wetterdienst, DWD). Разработанная немецкими учеными система ICON-D2-EPS использует начальные условия, подготовленные системой усвоения данных KENDA [53], основанной на применении локального ансамблевого фильтра Калмана с трансформацией ансамбля (LETKF, local ensemble transform Kalman filter), тогда как граничные условия являются даунскейлингом результатов глобальной системы [42].

Региональные ансамблевые системы были разработаны и реализованы во многих прогностических центрах. Одной из первых систем была американская мульти-анализная и мульти-модельная система SREF [56], использовавшая несколько моделей с шагом горизонтальной сетки около 80 км,

что в несколько раз больше, чем шаг сетки в современных глобальных ансамблевых системах (9 км в системе IFS [37]). В дальнейшем ансамблевый подход неоднократно применялся для описания региональных процессов, при этом сначала использовались модели с шагом горизонтальной сетки 7–30 км [11, 22, 41, 45, 46, 67]. Развитие региональных ансамблевых систем чрезвычайно важно в связи с быстрой потерей предсказуемости на этих масштабах [31, 64]. Во втором десятилетии 21 века началось активное развитие ансамблевых систем для ограниченной территории, использующих модели с шагом горизонтальной сетки 1–3 км, что дает возможность явным образом (не параметрически) описать (хотя и не полностью) процессы глубокой конвекции [10, 25, 33, 34, 48, 49].

Внедрение и развитие мезомасштабных ансамблевых систем прогнозирования в разных странах и регионах способствует повышению готовности к экстремальным погодным условиям и минимизации их потенциального воздействия на общество и экономику.

В данной статье приводится описание разработанной в Гидрометцентре России иерархической ансамблевой системы, использующей негидростатическую модель ICON [62] и состоящую из глобального (с шагом горизонтальной сетки 40 км по глобусу и 20 км по Европейской территории России) и регионального компонентов (с шагом сетки около 2,2 км, позволяющим явно описать глубокую конвекцию). Система предназначена для краткосрочного прогноза. В первом разделе работы приводится краткое описание модели ICON, во втором разделе обсуждается организация ансамблевой системы и применяемые возмущения модели. Третий раздел посвящен описанию численных экспериментов с региональной ансамблевой системой и результатов их верификации. В четвертом разделе анализируется качество воспроизведения региональной ансамблевой системой случая резкого изменения погоды. В заключении приводятся основные выводы о качестве разработанной ансамблевой системы и обсуждаются пути дальнейшего ее развития.

## 1. Краткое описание модели ICON

Базовой моделью для ансамблевой системы является модель ICON [62]. Основными преимуществами ICON являются точное локальное сохранение массы, согласованный по массе перенос трассеров, возможность использования вложенных сеток [63] и применение негидростатических уравнений в глобальных доменах. Применение метода вложений (nesting) позволяет при интегрировании глобальной модели с фиксированным шагом сетки одновременно дополнительно проводить вычисления в некоторой области (вложенном домене) с более высоким горизонтальным разрешением, учитывая при этом взаимодействие процессов в глобальном и вложенном доменах. Особенностью модели также является возможность так называемого вертикального вложения, позволяющего уменьшить число вертикальных уровней во вложенном домене с целью экономии

компьютерных ресурсов. Динамическое ядро ICON сформулировано на икосаэдральной треугольной сетке Аракавы С. В модели учтены основные физические процессы в атмосфере и на подстилающей поверхности. Модель содержит обширный пакет параметризаций, выбор применяемых физических схем и их параметров зависит от конфигурации модели. Модель была разработана сотрудниками Немецкой службы погоды и Институтом метеорологии Макса Планка и хорошо зарекомендовала себя при решении задач прогноза погоды и климата на разных пространственно-временных масштабах [23, 27, 32, 40]. Модель ICON применяется для оперативных детерминированных и вероятностных прогнозов в Немецкой службе погоды как для глобуса, так и для регионов (оперативная конфигурация системы приведена в [51]). На момент написания настоящей статьи детерминированные прогнозы в Немецкой службе погоды выпускались с помощью глобальной модели ICON с шагом горизонтальной сетки 13 км по всему глобусу и 6,5 км по территории Европы, при этом число уровней по вертикали было 120 и 74 соответственно. Ансамблевые прогнозы выполнялись на более грубой горизонтальной сетке – 26 км по всему глобусу и 13 км по Европе. Заметим, однако, что в своей работе мы опирались на более старую конфигурацию ансамблевой системы DWD, использовавшую шаг сетки 40 км по глобусу и 20 км по Европе. Версии модели ICON с шагами сетки 1 км и больше используются для прогнозов по ограниченной территории как в Немецкой службе погоды, так и в других странах-участниках консорциума COSMO [42, 50].

## 2. Организация системы ансамблевого прогноза

Конечной целью работы было создание мезомасштабной региональной ансамблевой системы прогноза с шагом сетки 2,2 км, однако для достижения этой цели пришлось разработать ряд компонентов, которые в совокупности формируют иерархическую систему ансамблевого прогноза. Она объединяет несколько ансамблевых систем для описания процессов разных масштабов, все системы основаны на использовании одной и той же модели ICON. Система с более грубым разрешением является источником данных для системы с более подробным разрешением. Схематически основные компоненты иерархической системы ансамблевого прогноза и потоки информации представлены на рис. 1.

Необходимость такой организации ансамблевой системы была обусловлена тем, что на момент выполнения работы глобальные ансамблевые системы, использованные для среднесрочного прогноза в Гидрометцентре России, имели шаг сетки около 70 км [2, 6, 43], что не давало возможности применить их результаты в качестве начальных и граничных условий для региональной модели с шагом сетки 2,2 км (для этого отношение шагов по пространству в глобальной и региональной моделях не должно превышать 5–10). Поэтому для генерации начальных и граничных условий для мезомасштабной ансамблевой системы была реализована глобальная

система краткосрочного ансамблевого прогноза ICON-Ru-EPS на основе модели ICON с шагом сетки 20 км по Европейской территории России. Ниже (см. раздел 2.1) приводится описание ее особенностей и характеристик.



**Рис. 1.** Иерархическая ансамблевая система прогноза. Слева – схематическое изображение организации иерархической ансамблевой системы, справа – домены ее компонентов. Область вложенного домена RU ограничена красной линией, а область интегрирования системы ICON-Ru2-EPS (ЦФО) – голубой.

**Fig. 1.** The hierarchical ensemble prediction system: a schematic representation (left panel) and integration domains (right panel). The nested domain RU is indicated by the red line, while the ICON-Ru2-EPS domain (the Central Federal District) is bounded by the light blue line.

Для работы модели ICON в каждой из рассматриваемых областей (глобус, вложенный домен RU, область ЦФО) для каждого разрешения (шаг сетки 40; 20; 2,2 км) потребовалось создать специальные файлы, характеризующие сетку модели, а также подготовить необходимые климатологические параметры и морфометрические характеристики земной поверхности, используемые в дальнейших расчетах. Эта задача была решена с помощью специального веб-интерфейса, предоставляемого Немецкой службой погоды на сайте <https://webservice.dwd.de/cgi-bin/spp1167/webservice.cgi>.

## 2.1. Глобальная система краткосрочного ансамблевого прогноза ICON-Ru-EPS

Начальные возмущенные данные для глобальной системы ансамблевого прогноза подготавливались в DWD с помощью ансамблево-вариационного усвоения данных и передавались в Росгидромет в оперативном режиме в рамках двустороннего сотрудничества между метеорологическими службами России и Германии. Применялся метод инкрементного

обновления анализа [9], позволяющий уменьшить спин-ап (spin-up) модели в начале прогноза. Необходимые для реализации этого метода поля прогнозов и инкрементов анализа поступали из DWD. Модель начинала счет с поля первого приближения за 1,5 часа до срока анализа  $t$ , а в течение последующих трех часов модельного времени к прогностическим полям постепенно добавлялись инкременты анализа. Вычисления во вложенном домене RU начинались в момент времени  $t$ .

В Гидрометцентре России выполнялся глобальный ансамблевый прогноз на 54 часа с помощью модели ICON с шагом сетки 40 км по всему глобусу и 20 км по Европейской территории России (вложенный домен RU, рис. 1). В модели использовалось 90 уровней по вертикали, высота верхнего уровня – 75 км. С целью экономии компьютерных ресурсов во вложенном домене RU использовалось 60 уровней, верхний уровень располагался на высоте около 22 км. Размер ансамбля – 21 реализация. Несовершенство модели атмосферы учитывалось с помощью возмущения параметров физических схем (подробнее в разделе 3). Набор физических параметризаций и настройки возмущений модели были аналогичны применяемым в оперативных глобальных ансамблевых прогнозах DWD на момент проведения численных экспериментов.

В ходе работы глобального ансамбля генерировались возмущенные начальные и граничные условия для мезомасштабного ансамбля, предназначенного для прогноза с высоким пространственным разрешением по области Центрального федерального округа. Чтобы по возможности избежать слишком сильных различий в горизонтальных разрешениях глобальной и региональной версии модели, мы опирались на данные, полученные для вложенного домена RU с шагом сетки 20 км. Так как известно, что качество описания как крупномасштабных, так и возникающих на их фоне мелкомасштабных процессов в региональных ансамблевых системах зависит от частоты обновления граничных условий для мезомасштабной модели [57], то было решено подготавливать граничные условия ежечасно.

## **2.2. Система ансамблевого прогноза по ограниченной территории ICON-Ru2-EPS**

Начальные и граничные условия для мезомасштабного прогноза подготавливались на основе динамического даунскейлинга результатов глобальной системы ICON-Ru-EPS с шагом сетки 20 км.

Динамический даунскейлинг, при котором используются результаты прогнозов по ансамблевой системе более грубого разрешения, глобальной или региональной, является одним из наиболее простых и популярных подходов к генерации возмущенных начальных и граничных условий для мезомасштабных ансамблей [22, 33, 46]. Преимуществом этого подхода является согласованность начальных и граничных возмущений, а недостатком – отсутствие в возмущениях мелкомасштабных структур. В работе [65]

показано, что мелкомасштабные возмущения начальных условий оказывают влияние при малых заблаговременностях прогнозов (до 12 час), при этом эффект сильно зависит от процессов синоптического масштаба в районе, окружающем область интегрирования мезомасштабной модели. При использовании динамического даунскейлинга проходит около 5–12 часов (период спин-апа), прежде чем в возмущениях прогнозов появляются мелкомасштабные структуры, что негативно влияет на качество вероятностных прогнозов в начале интегрирования модели. В настоящее время активно разрабатываются методы генерации возмущений для мезомасштабных ансамблей, основанные на сочетании крупномасштабных возмущений из системы грубого разрешения и мелкомасштабных возмущений, полученных из мезомасштабной системы усвоения данных [25, 42, 68]. Использование таких подходов не входило в задачу данного исследования, возможность их применения в Гидрометцентре России будет рассмотрена в ходе дальнейших работ.

В разработанной региональной ансамблевой системе шаг сетки по горизонтали был равен 2,2 км. Использовались 65 уровней по вертикали до высоты около 22 км и шаг по времени 24 сек. Область интегрирования покрывала практически всю территорию ЦФО (см. рис. 1). В дальнейшем для системы используется обозначение ICON-Ru2-EPS.

В экспериментах с региональным ансамблем его размер менялся от 21 до 15. Как и в глобальном ансамбле, несовершенство модели атмосферы учитывалось с помощью возмущения параметров физических схем, однако набор возмущаемых параметров, способ и диапазон возмущения отличались (подробнее в разделе 3).

### **3. Численные эксперименты и верификация их результатов**

#### **3.1. Организация численных экспериментов**

С помощью разработанной иерархической системы ансамблевого прогноза были выполнены численные эксперименты для периода 17–28 февраля 2022 года с целью оценки качества регионального вероятностного прогноза, влияния размера ансамбля и роли возмущений модели. Дополнительно ставилась задача продолжить работы, представленные в [5], и более подробно оценить возможности системы METplus [12] для верификации ансамблевых прогнозов высокого разрешения.

Как в глобальной, так и в региональной ансамблевой системе неопределенность прогнозов за счет несовершенства модели атмосферы учитывалась с помощью случайных возмущений настроечных параметров схем, описывающих физические процессы подсеточного масштаба [51]. Выбор возмущаемых параметров и диапазона их возмущений был основан на рекомендациях разработчиков модели ICON и специалистов, занимающихся созданием и тестированием схем физических параметризации [54], и зависел от конфигурации системы. Возмущения вносились в настроечные

параметры схем, описывающих влияние орографии подсеточного масштаба, торможения гравитационных волн, микрофизических процессов, радиации и облачности, турбулентности, конвекции и поверхностных процессов. Большинство параметров возмущалось аддитивно с помощью формулы

$$\theta_{pert} = \theta_{ref} + 2(v - 0.5) \cdot \theta_{range} ; v \in [0, 1], \quad (1)$$

где  $\theta_{ref}$  – невозмущенное значение параметра;  $\theta_{pert}$  – его возмущенное значение;  $\theta_{range}$  – величина, определяющая диапазон возможных изменений (возмущений) параметра;  $v$  – псевдослучайное число, генерация которого выполнялась с учетом номера ансамблевой реализации. Для небольшого количества параметров применялось мультипликативное возмущение. Чтобы избежать физически нереальных ситуаций, возмущения некоторых параметров были коррелированы, что достигалось путем использования для них одинаковых псевдослучайных чисел.

В глобальной системе ICON-Ru-EPS варьировалось 36 параметров. Возмущения рассчитывались по формуле (1) на каждом шаге модели. Для определения величины  $v$  из равномерного распределения выбиралось псевдослучайное число, на которое дополнительно накладывались синусоидальные вариации со случайной фазой, зависящей от модельного времени. Настройки возмущений модели совпадали с применяемыми в глобальной ансамблевой системе DWD на момент проведения экспериментов.

Для региональной системы были выполнены четыре численных эксперимента: без возмущений модели (NOPERT) и с различными наборами возмущаемых параметров и разными распределениями возмущений (ASGLOB, ASLAM, MIX). Во всех экспериментах использовались возмущенные начальные и граничные условия. В эксперименте ASGLOB использовались настройки возмущений модели, аналогичные примененным в глобальной системе. Возмущения в эксперименте ASLAM были близки к применяемым в региональной версии ансамблевой системы DWD. Рассматривалось 19 параметров и предполагалось дискретное распределение их возмущений – с вероятностью 50 % выбиралось значение параметра по умолчанию, с вероятностью 25 % – верхняя или нижняя граница заранее заданного диапазона изменения соответствующего параметра. Значения  $v$  в формуле (1) зависели от параметра, номера прогностической реализации и времени старта прогноза. Возмущения параметров рассчитывались в начале прогноза и оставались в дальнейшем неизменными. Для ряда параметров размер возмущений отличался от использованного в эксперименте ASGLOB. В эксперименте MIX варьировалось 25 параметров, выбранных авторами из возмущаемых в глобальной версии. Возмущения генерировались так же, как и в эксперименте ASLAM.

Региональные ансамблевые прогнозы выпускались по срокам 00 и 12 ч BCB на 48 часов. Результаты прогнозов обрабатывались с помощью системы постпроцессинга FieldExtra [20]. Визуализация результатов

прогнозов на регулярной широтно-долготной сетке осуществлялась с помощью пакета «Изограф» [1]. Для верификации использовался пакет METplus [12].

По результатам численных экспериментов было оценено качество прогноза и проанализировано влияние на прогноз возмущений модели и размера ансамбля.

### 3.2. Особенности верификации

Система верификации является неотъемлемой частью системы ансамблевого прогноза. Для ансамблевого прогноза задача верификации оказывается сложнее, чем для детерминированного прогноза, так как имеет большую размерность [72]. Для верификации вероятностных прогностических систем разработан ряд скалярных метрик, однако каждая из них сама по себе не в состоянии полностью описать качество прогноза. Поэтому приходится использовать совокупность метрик, чтобы оценить такие характеристики системы (атрибуты прогноза), как точность, разрешение, дискриминирующая способность, надежность, смещение.

Оценки **точности** системы показывают соответствие прогноза наблюдению в каждой паре прогноз-наблюдение, с осреднением по достаточно большому количеству случаев. Примерами оценок точности являются *среднеквадратическая ошибка RMSE* и *абсолютная ошибка MAE*. В случае ансамблевого прогноза их, как правило, рассчитывают для среднего по ансамблю. Известно, что оценки качества среднего по ансамблю обычно оказываются лучше, чем для детерминированного прогноза с тем же разрешением – в основном за счет осреднения случайного шума в прогнозе [18, 20]. Однако в результате осреднения могут пропадать локальные специфические особенности прогнозируемых полей. Поэтому обычно оценки качества среднего по ансамблю используются как показатель адекватности построения ансамблевой системы и, в частности, применяемых в системе возмущений. Важной метрикой, показывающей, сколь хорошо построен ансамбль, является *разброс прогнозов в ансамбле* (далее – разброс), определяемый как среднеквадратическое отклонение всех прогнозов от среднего. Разброс должен соответствовать ошибке прогноза, подробное обсуждение причин этого соответствия можно найти в [61, 52]. При рассмотрении качества ансамблевых систем обычно анализируют агрегированные по пространству среднеквадратические ошибки среднего и разброс ансамбля для большого интервала времени в зависимости от заблаговременности прогноза. В идеале как значения, так и временной ход этих двух характеристик должны быть близки. Для вероятностных прогнозов аналогом *среднего квадрата ошибки, MSE* (квадрата RMSE), является *оценка Брайера BS* [72], характеризующая ошибку прогноза вероятности. BS определяется для отдельных явлений (например, превышение какого-то порогового значения). Качество прогноза по отношению к эталонному

прогнозу (часто в качестве эталона используют выборочную климатологию – т. е. среднюю частоту явления в выборке по данным наблюдений) оценивают с помощью *меры мастерства Брайера BSS*.

Также для оценки **точности** прогноза вероятностей часто применяют *непрерывную ранговую вероятностную оценку CRPS*, являющуюся обобщением MAE на случай вероятностных прогнозов и характеризующую соответствие кумулятивных функций распределения прогноза и наблюдений. Интеграл от BS по всем пороговым значениям дает CRPS.

Атрибут **смещение** показывает соответствие среднего по прогнозу среднему по наблюдениям. *Средняя ошибка ME* является мерой смещения для прогнозов непрерывных величин

Важными атрибутами прогностической системы являются **надежность** и **разрешение**. **Надежность** характеризует распределение наблюдений при условии конкретных значений прогноза. В случае ансамблевых прогнозов надёжность показывает, насколько предсказанная вероятность события соответствует его наблюдаемой частоте при осреднении по всем случаям, для которых был выдан этот прогноз. При высокой надежности, если прогнозируется вероятность события 40 %, то оно и должно наблюдаться в 40 % случаев, для которых был выполнен этот прогноз. **Разрешение** также связано со значениями наблюдений при условии конкретных значений прогноза, однако, в отличие от надежности, оно показывает, насколько сильно различаются средние значения наблюдений при разных значениях прогнозов. Прогноз с хорошим разрешением может отделить один тип явления от другого. Если при прогнозе температуры, равной 10 и 20 градусам, средние наблюдаемые температуры существенно отличаются друг от друга, то система обладает высоким разрешением. Даже если прогноз неверный, но при этом может отделить один тип явления от другого, то считается, что система обладает разрешающей способностью. Надежность и разрешение ансамблевого прогноза обычно характеризуют с помощью различных компонент оценки Брайера BS. Оценку CRPS, аналогично BS, также можно разделить на компоненты *разрешение, надежность и неопределенность* [26].

**Дискриминирующая способность** обратна разрешению в том смысле, что показывает различие распределений прогнозов при условии разных конкретных значений наблюдений. Она характеризует возможности системы различать два возможных альтернативных варианта, например, будет дождь или снег, превысит ли аномалия температуры климатические значения более, чем на 1 стандартное отклонение или нет, и т. п. Дискриминирующую способность ансамблевой системы описывает, например, *сравнительная оперативная характеристика ROC*. Ее удобно представлять в виде графика и анализировать площадь под полученной кривой (ROCA).

Подробное описание перечисленных выше метрик и способы их вычисления представлены в [4, 72].

Удобным инструментом для решения задачи верификации ансамблевого прогноза является пакет METplus [12], примененный в настоящей работе и позволяющий рассчитать метрики, определяющие различные атрибуты прогностических систем.

### 3.3. Результаты верификации ансамблевых прогнозов по системе ICON-Ru2-EPS

Представленные ниже результаты верификации получены с помощью агрегации упомянутых в разделе 3.2 оценок за каждый день и заблаговременность за период 17–28 февраля 2022 г. для четырех экспериментов, описанных в разделе 3.1. Область агрегации – модельный домен ICON-Ru2-EPS, соответствующий ЦФО (рис. 1). Верификация проводилась относительно данных наблюдений на синоптических станциях. Результаты ансамблевых прогнозов были представлены на регулярной широтно-долготной сетке с шагом 0,02 градуса. Сеточные данные прогноза температуры, давления на уровне моря, приземной скорости и порывов ветра, а также осадков приводились в точки наблюдения с помощью метода “ближайшего соседа”. В работе представлены результаты верификации прогнозов по сроку 00 ч ВСВ.

#### 3.3.1. Точность среднего по ансамблю и разброс

Рис. 2 демонстрирует качество средних по ансамблю прогнозов температуры на уровне 2 м и скорости ветра на уровне 10 м. Сплошными линиями показаны среднеквадратические (слева) и средние (справа) ошибки для всех экспериментов. В целом, качество прогнозов средних по ансамблю величин достаточно высоко, например, RMSE для температуры на уровне 2 м меняется от 1,4 до 2,2 К, что меньше соответствующей ошибки в зимний период для модели COSMO [5]. В среднем по ансамблю приземная температура моделируется лучше в дневные часы, чем в ночные, что согласуется с результатами верификации модели ICON в странах консорциума COSMO [24]. Температуры на уровне 2 м оказались заниженными, о чем свидетельствуют отрицательные значения ME. Возможно, это связано с достаточно теплой погодой на большей части ЦФО в рассматриваемый период и несовершенством схем параметризации поверхностных процессов при таянии снега [3].

Важной характеристикой ансамбля является разброс прогнозов относительно среднего по ансамблю, который представлен пунктиром на левой панели рис. 2. Разброс должен статистически соответствовать ошибке прогнозов, однако в эксперименте NOPERT (с возмущениями только начальных и граничных данных) система ICON-Ru2-EPS демонстрирует заниженные значения разброса по сравнению с RMSE для всех рассмотренных метеорологических величин, за исключением давления, приведенного к уровню моря, PMSL (так как возмущения модели практически не влияют

на прогноз этой характеристики, то на нижней панели рис. 2 показаны результаты только для эксперимента NOPERT). Возможно, это связано с тем, что давление на уровне моря в большей степени определяется процессами синоптического масштаба в атмосфере, нежели процессами у поверхности.

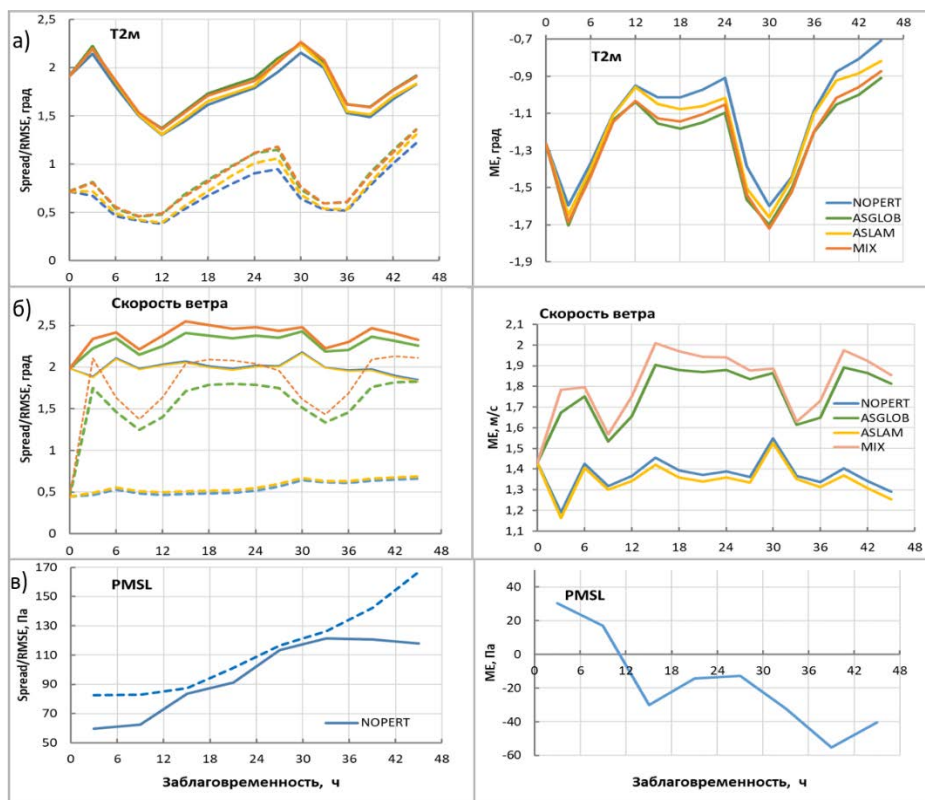


**Рис. 2.** Качество среднего по ансамблю прогноза (сплошная линия, левая панель – RMSE, правая – ME) и разброс (левая панель, пунктир) для температуры на уровне 2 м (а), скорости ветра на уровне 10 м (б) для различных вариантов возмущения модели (здесь и далее: синий – NOPERT, зелёный – ASGLOB, жёлтый – ASLAM, оранжевый – MIX), а также для давления на уровне моря (в) в эксперименте NOPERT.

**Fig. 2.** Verification scores for ensemble mean 2-m temperature (a) and 10-m wind speed (б) in experiments with various model perturbations (here and further blue for NOPERT, green for ASGLOB, yellow for ASLAM, and orange for MIX) complemented by the scores for mean sea level pressure in NOPERT (в). Solid lines stand for RMSE (left panel) and ME (right panel). The spread is shown in dashed lines.

Известно, что глобальные ансамблевые системы показывают хорошее соответствие разброса и ошибки в свободной атмосфере, но для приземных характеристик оно оказывается хуже. Для региональных ансамблевых

систем, сфокусированных на прогнозе приземных характеристик, недостаточность разброса температуры и скорости ветра у поверхности является общей и крайне нежелательной чертой.

Одним из способов увеличить разброс ансамбля и улучшить его соответствие ошибке среднего является учет несовершенства модели [14, 38]. Вносимые для этого в модель возмущения (которые были применены в экспериментах ASLAM, ASGLOB, MIX) не должны ухудшать качество среднего по ансамблю прогноза. Однако это требование в полной мере удовлетворяется только в ASLAM (этот вариант в дальнейшем рассматривался как основной). Результаты экспериментов ASGLOB и MIX показывают увеличение RMSE и ME, незначительное для температуры и существенное для ветра. При этом для приземного ветра нежелательное ухудшение качества прогноза среднего по ансамблю в экспериментах ASGLOB и MIX сочетается с такой востребованной тенденцией, как рост разброса.

С целью понять причины такого поведения ошибки и разброса в прогнозируемой скорости ветра на уровне 10 м были проанализированы различия в наборах параметров, возмущаемых в ASLAM, ASGLOB и MIX, и выполнены дополнительные численные эксперименты по варьированию отдельных параметров. Оказалось, что наблюдаемые эффекты в основном связаны с аддитивными возмущениями параметра *gkwake*, влияющего на торможение горизонтального потока за счет подсеточной орографии. Расширение диапазона возможных значений этого параметра при его возмущении в экспериментах ASGLOB и MIX привело к систематическому росту скорости ветра в приземных слоях. Изменение типа возмущений этого параметра с аддитивного на мультипликативный позволило устранить систематические ошибки, наблюдаемые в этих экспериментах, однако сопровождалось сильным уменьшением разброса. Замена аддитивных возмущений на мультипликативные в ASLAM привела к незначительному дополнительному разбросу (не представлено). Полученные результаты свидетельствуют о большой чувствительности модели к параметрам схемы описания эффектов подсеточной орографии и целесообразности дальнейшей настройки как самого параметра *gkwake*, так и диапазона, и типа его возмущений. Высокая чувствительность прогнозируемой скорости ветра к вариациям этого параметра была также отмечена в [7].

Слабые различия между разбросом только за счет возмущения начальных и граничных условий (эксперимент NOPERT) и за счет дополнительного возмущения модели (ASLAM) показывают недостаточную эффективность схемы случайных возмущений параметров, реализованной в модели ICON, для такой небольшой области, как ЦФО. Заметим, что в данной схеме возмущения параметров одинаковы для всех точек горизонтальной сетки и на всех высотах. В дальнейшем предполагается рассмотреть возможность применения не констант, а меняющихся в пространстве и времени случайных полей возмущений, или метода стохастических возмущений физических тенденций [14].

### 3.3.2. Вероятностные оценки

Непрерывная ранговая вероятностная оценка CRPS проста для интерпретации и часто применяется для общей характеристики ансамблевых систем. Эта оценка отрицательно ориентирована (т. е. чем меньше, тем лучше) и равна нулю для идеального прогноза. CRPS измеряется в тех же единицах, что и оцениваемая переменная, и не ограничена сверху. На рис. 3 представлены кривые CRPS для приземной температуры и скорости ветра. Видно, что влияние возмущений модели на CRPS мало для температуры, но заметно для скорости ветра. Несмотря на увеличение разброса ветра в экспериментах ASGLOB и MIX, оценка CRPS для них оказывается хуже за счет ухудшения точности прогноза (как и на рис. 2). Возмущения ASLAM, слабо влияющие на разброс и практически не меняющие ошибку прогноза скорости ветра, приводят к небольшому улучшению CRPS. Интересно, что для температуры временной ход CRPS и RMSE проявляет общие закономерности и демонстрирует выраженный суточный цикл, тогда как для ветра ход CRPS более похож на ход средней ошибки.

Дополнительное рассмотрение категорийных оценок для непрерывных величин подтверждает необходимость использования совокупности различных метрик для оценки качества ансамблевых прогнозов. Так, например, хотя ASGLOB и MIX показывают для порывов и скорости ветра худшие оценки CRPS (рис. 3), но дискриминирующая способность прогнозов в этих экспериментах оказывается лучшей, что проявляется в более высоких значениях ROCA (рис. 4). Прогноз вероятностей для ветра в этих экспериментах также остается лучшим (меньшие оценка Брайера BS и ее компонента надежность).

Для температуры, как и в случае CRPS, слабое преимущество как в дискриминирующей способности, так и в прогнозируемых вероятностях остается за NOPERT и ASLAM (не представлено).

Заметим, что категорийные оценки рассчитываются для явлений, попадающих в заданные категории. Обычно выбирают некоторые пороговые значения и анализируются события (явления), когда рассматриваемая величина оказывается выше или ниже порога. При верификации ансамблевых прогнозов мы использовали различные пороги и явления, но в настоящей статье приводим лишь немногие наиболее интересные результаты. Так, например, для порывов ветра мы приводим результаты для превышения порога 12,5 м/с, который является одним из официальных порогов для оценки неблагоприятных погодных явлений, а для температуры рассматриваем переход значений через ноль, так как анализируемый зимний месяц характеризовался частыми оттепелями.

Влияние возмущений модели на прогноз осадков мало. При этом качество вероятностных прогнозов осадков достаточно высоко: для явлений “осадки более 1 мм/12 ч” значения ROCA достигают 0,95, а оценка Брайера оказывается менее 0,1. Анализ категорийных оценок (ROCA, оценки Брайера и ее компонент) показывает, что лучше прогнозируются осадки более 1 мм/12ч, чем факт выпадения осадков (подробнее см. [5]).

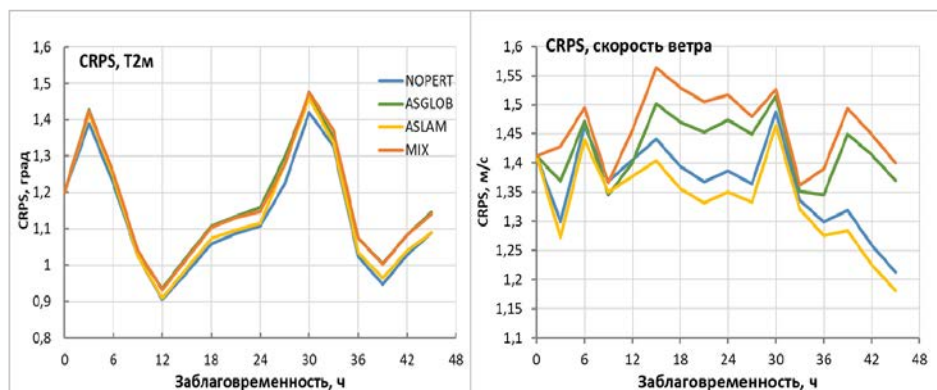


**Рис. 3.** CRPS для прогнозов температуры на уровне 2 м (слева) и скорости ветра на уровне 10 м (справа) при различных возмущениях модели.

**Fig. 3.** CRPS for 2-m temperature (on the left) and 10-m wind speed (on the right) forecasts with different model perturbations.

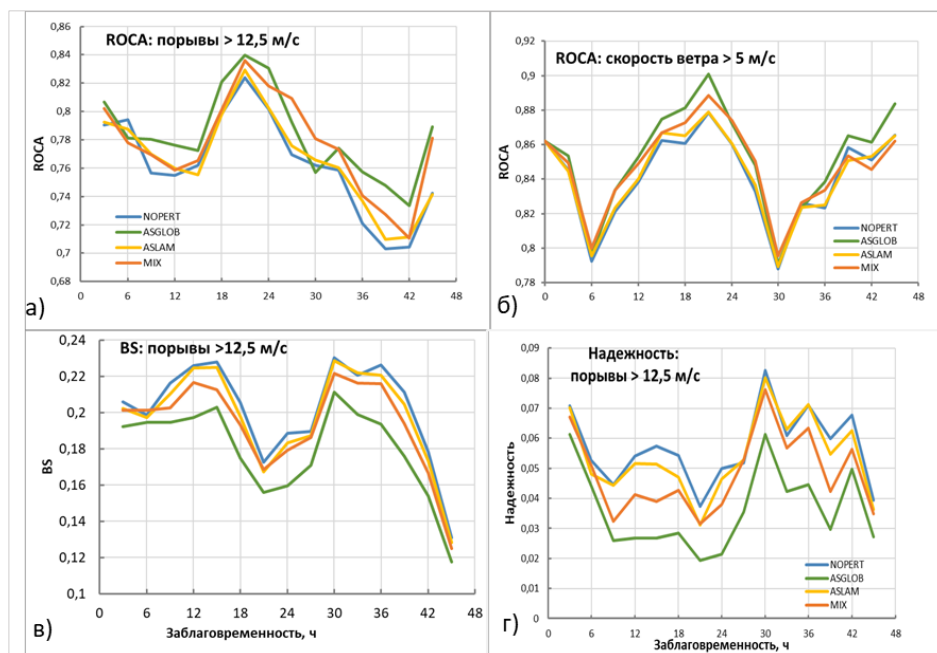


**Рис. 4.** ROCA (а), оценка Брайера (в) и ее компонента надежность (г) для прогнозов порывов приземного ветра более 12,5 м/с и, для сравнения, ROCA для скорости ветра на уровне 10 м более 5 м/с (б) при различных возмущениях модели.

**Fig. 4.** ROCA (a), Brier score (в) and its reliability component (r) for surface wind gusts stronger than 12,5 m/s compared to ROCA for 10-m wind speed above 5 m/s (б) for different model perturbations.

### 3.3.3. Роль размера ансамбля

Ансамблевый прогноз – это задача, требующая большого количества компьютерных ресурсов. Несмотря на то, что гибридное распараллеливание кода модели ICON позволяет сократить астрономическое время расчетов за счет оптимального использования большого числа процессорных ядер, а область интегрирования невелика, применение высокого разрешения и множественное интегрирование модели в ансамбле приводят к существенным затратам машинного времени. На суперкомпьютере CRAY XC40-LC с пиковой производительностью около 1300 терафлопс для расчета по территории ЦФО одной реализации ансамбля ICON-Ru2-EPS на 128 ядрах требуется около часа времени.

Выбор размера ансамбля всегда является компромиссом между желанием получить возможно более подробный и качественный вероятностный прогноз и доступными вычислительными ресурсами. В данной работе были выполнены эксперименты по прогнозу с использованием ансамблей из 15 и 21 реализации и проанализированы их результаты с целью определения размера ансамбля, оптимального для использования в прогностической практике.

Анализ результатов экспериментов показал, что варьирование размера ансамбля с 21 до 15 практически не приводит к изменению среднеквадратических ошибок и разброса непрерывных метеорологических величин. Однако в средней ошибке давления на уровне моря и скорости приземного ветра с ростом заблаговременности прогноза начинает проявляться слабое влияние размера ансамбля. Это видно из рис. 5, на котором представлены результаты для эксперимента NOPERT.

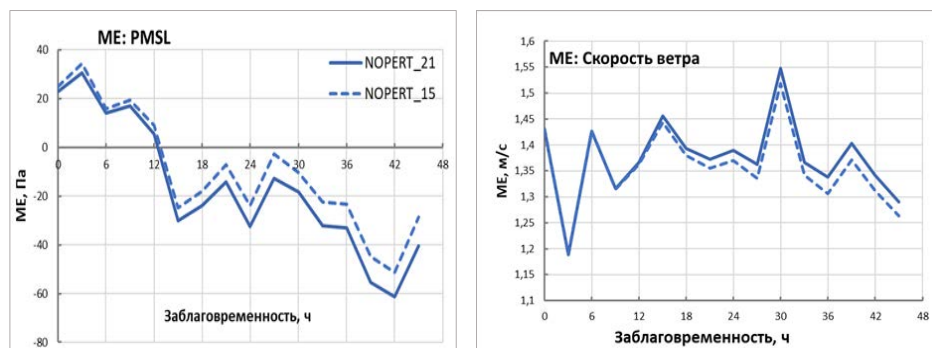


**Рис. 5.** Зависимость качества среднего прогноза давления на уровне моря (слева) и скорости приземного ветра (справа) от размера ансамбля. Сплошной линией показаны средние ошибки для ансамбля из 21 реализации, пунктирной – для ансамбля из 15 реализаций.

**Fig. 5.** The skill of ensemble mean forecast of mean sea level pressure (left) and surface wind speed (right) as a function of ensemble size. The mean errors for 21 and 15 members are shown in solid and dashed lines respectively.

Результаты для остальных экспериментов аналогичны. Интересно, что наименьшее смещение демонстрирует меньший по размеру ансамбль. Не исключено, что это связано с ограниченностью рассмотренной выборки. Усиление влияния размера ансамбля в ходе прогноза коррелирует с современными тенденциями к более частому выпуску региональных ансамблевых прогнозов меньшего размера на меньшие заблаговременности [49].

Влияние размера ансамбля на категорийные оценки качества прогноза (ROCA, BS, BSS) оказалось незначимым. Исходя из вышеизложенного, было решено на настоящий момент в прогностической практике ограничиться размером ансамбля в 15 реализаций и в дальнейшем рассмотреть возможность перехода к коротким, но частым прогнозам.

#### **4. Анализ воспроизведения отдельного случая резкого изменения погоды**

В конце февраля 2022 года наблюдалось прохождение теплого атмосферного фронта через территорию ЦФО (рис. 6). С ним были связаны такие погодные явления, как усиления ветра, гололед, ледяные дожди, которые наблюдались преимущественно в Воронежской и Липецкой областях. Зафиксированы порывы ветра до 16–17 м/с. Качество воспроизведения этого случая системой ICON-Ru2-EPS было проанализировано путем сопоставления прогнозируемых и наблюдаемых метеорологических приземных характеристик, а также анализа прогнозируемых вероятностей отдельных событий.

На рис. 7 показаны средние по ансамблю поля прогнозов 12-часовых сумм осадков (фон) и соответствующие станционные наблюдения (цветные точки) для сроков с интенсивными (рис. 7а) и менее интенсивными (рис. 7б) осадками (для построения карт использована функция `plot-point-obs` пакета `METplus`). В целом, карты демонстрируют неплохое соответствие прогнозируемых и наблюдаемых областей осадков.

Для случая интенсивных осадков (рис. 7а), заметно небольшое смещение области их прогнозируемого выпадения на северо-запад и связанное с этим завышение количества осадков по отношению к наблюдениям на юго-востоке ЦФО. Правильно спрогнозировано отсутствие осадков на большей части ЦФО, где почти нет ложных тревог по явлению. Следует отметить, что для синоптиков особенно ценен факт прогноза интенсивных осадков, а небольшой пространственный сдвиг прогнозируемой области их выпадения не так критичен.

В случае осадков меньшей интенсивности (рис. 7б) прогноз оказался менее успешным. Хотя в целом правильно спрогнозирована область основных осадков на юге ЦФО, но их максимальные значения занижены. Имеется область ложных тревог на северо-западе ЦФО, где модель дает более протяженную область сильных осадков, тогда как наблюдаемые там суммы осадков не превышали 1,5 мм/12ч.

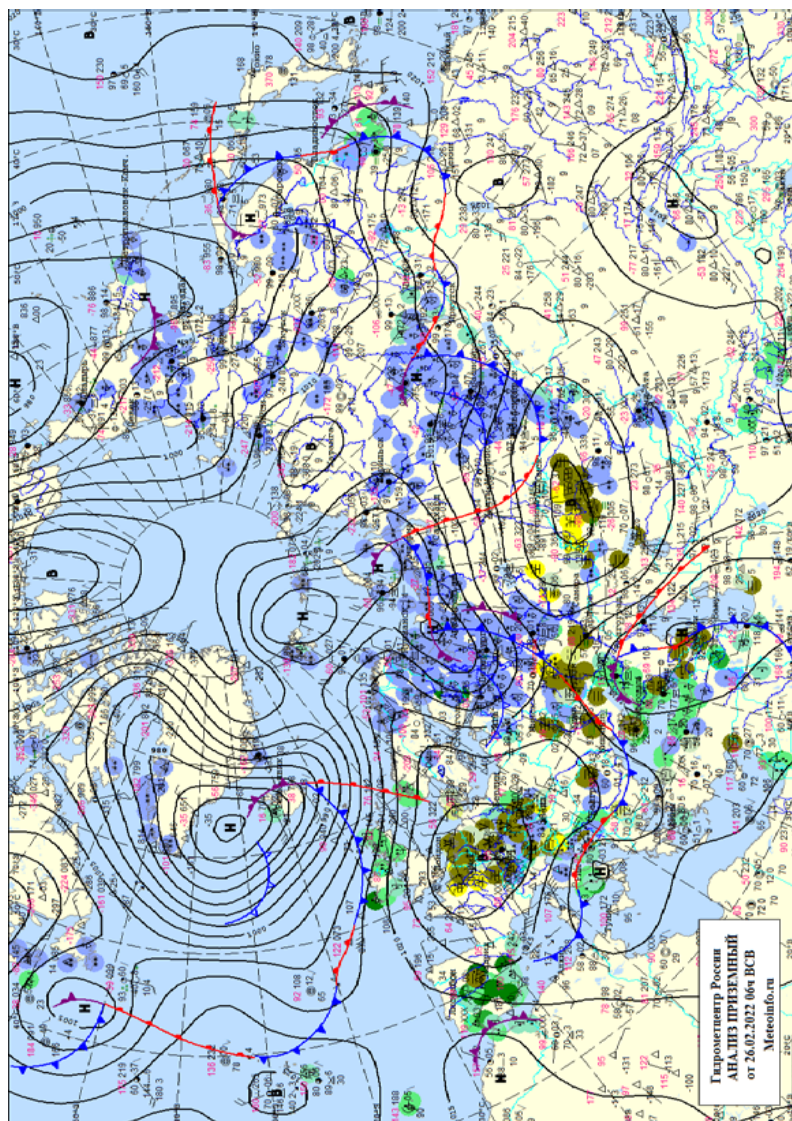


Рис. 6. Карта приземного анализа для 06 ч ВСВ 26 февраля 2022 г.

Fig. 6. The surface analysis chart at 06 UTC February 26, 2022.

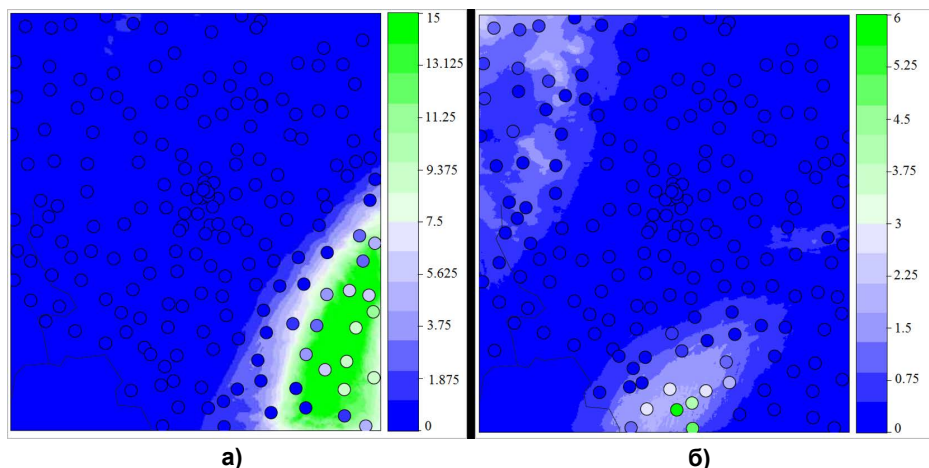


**Рис. 7.** Среднее по ансамблю значение 12-часовых сумм осадков (фон) в сравнении с данными станционных наблюдений (цветные точки) для случаев с осадками разной интенсивности: интенсивные осадки 27.02.2022, 15 ч ВСВ (прогноз на 39 ч от 26.02.2022, 00 ч ВСВ) (а); менее интенсивные осадки 25.02.2022, 15 ч ВСВ (прогноз на 39 часов от 24.02.2022, 00 ч ВСВ) (б). Одинаковые шкалы для прогноза и наблюдений, мм/12 ч. Эксперимент NOPERT.  
**Fig. 7.** Ensemble mean 12-h precipitation (background) compared to station observations (color dots) for cases with different precipitation intensities: heavy precipitation for 15 UTC 27.02.2022 (39-hour forecast starting at 00 UTC 26.02.2022) (a); less intense precipitation for 15 UTC 25.02.2022 (39-hour forecast starting at 00 UTC 24.02.2022) (b). The color scales for forecast and observations are identical, mm/12h. Experiment NOPERT.

Для сравнительной оценки качества прогнозирования осадков различной интенсивности были дополнительно рассмотрены площади под кривой ROC (метрика ROCA; чем больше, тем лучше) для периода с 22 по 28 февраля 2022 г. и отдельно для 27 февраля 2022 г. Именно 27 февраля осадки были особо интенсивны, а в Воронежской и Липецкой областях наблюдался мокрый снег 5–8 мм/12ч, с налипанием и гололедными явлениями. Для этого дня ROCA оказалась существенно выше, чем для всего периода с 22 по 28 февраля 2022 г. (таблица), что подтверждает более высокую эффективность ансамблевой системы высокого разрешения при прогнозировании интенсивных осадков.

Полезность вероятностной продукции регионального ансамбля показал анализ качества воспроизведения таких приземных характеристик, как порывы ветра и температура. На рис. 8 (слева) видно хорошее соответствие прогнозируемых высоких вероятностей порывов ветра более 10 м/с и наблюдаемых значений этого же порядка. Хотя в некоторых точках с сильными порывами в центре ЦФО ансамбль давал их низкие вероятности, но эти точки лежали на границе правильно спрогнозированной области порывов, что позволяло синоптику учесть наличие данного опасного явления в прогнозе.

**Таблица.** Значения ROCA для прогноза наличия осадков (12-часовых сумм) в различные периоды. Эксперимент ASLAM

**Table.** ROCA for forecasts of precipitation occurrence (12h accumulation) in various periods. The experiment ASLAM

| Заблаговременность прогноза, час | Временной период   |                       |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------|
|                                  | 27 февраля 2022 г. | 22–28 февраля 2022 г. |
| 15                               | 0,939              | 0,906                 |
| 27                               | 0,986              | 0,872                 |
| 39                               | 0,970              | 0,916                 |

Справа на рис. 8 показаны ансамблевые вероятности температуры на уровне 2 м более 272 К и наблюдения. Область тепла в целом спрогнозирована верно, четко просматривается язык минусовых температур, который, как и область осадков, слегка сдвинут в пространстве по линии с северо-запада на юго-восток.

В целом, анализ воспроизведения случая резкого изменения погоды ансамблевой системой ICON-Ru2-EPS показал полезность как средних по ансамблю прогнозов, так и вероятностной продукции.

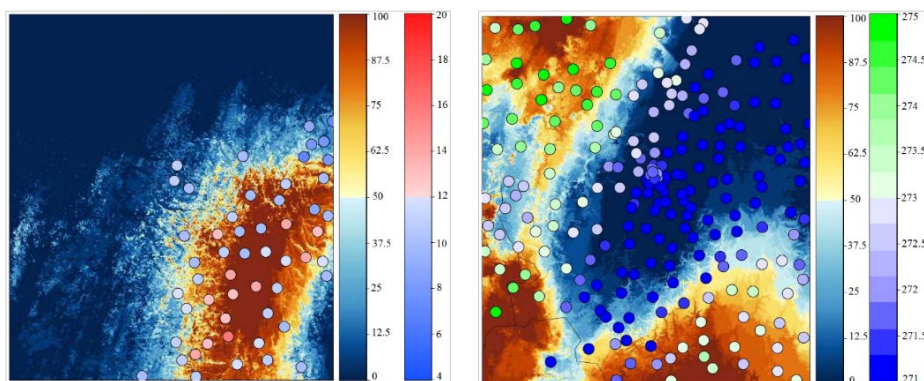


**Рис. 8.** Ансамблевые вероятности (фон) и данные станционных наблюдений (цветные точки): вероятность порывов ветра на уровне 10 м более 10 м/с для 27.02.2022, 12 ч ВСВ (36-часовой прогноз от 26.02.2022, 00 ч ВСВ) (%) и наблюдения (м/с) (слева); вероятность температуры воздуха на уровне 2 м более 272 К для 26.02.2022, 00 ч ВСВ (48-часовой прогноз от 24.02.2022, 00 ч ВСВ) (%) и наблюдения (К) (справа). Левые шкалы – вероятности, правые – наблюдения.

**Fig. 8.** Ensemble probabilities (background) vs station observations (colored dots). Left: Probability of 10m wind gusts greater than 10 m/s for 27.02.2022, 12 UTC (36-hour forecast from 26.02.2022, 00 UTC) (%) and observations (m/s). Right: Probability of 2-m temperature greater than 272 K for 26.02.2022, 00 UTC (48-hour forecast from 24.02.2022, 00 UTC) (%) and observations (K). Left scales are probabilities, right scales are observations.

## Выводы

В настоящее время актуальной является задача вероятностного прогнозирования с высоким пространственно-временным разрешением. Для решения ее в Гидрометцентре России разработана иерархическая ансамблевая система краткосрочного прогноза, основанная на негидростатической модели ICON. Система представляет из себя глобальную ансамблевую систему с шагом сетки модели 40 км по глобусу и 20 км по Европейской территории России в сочетании с региональной системой ICON-Ru2-EPS по территории Центрального федерального округа с шагом сетки около 2,2 км и явным разрешением глубокой конвекции. Система более грубого разрешения является источником данных для системы высокого разрешения.

Выполнена подробная верификация прогнозов по региональной ансамблевой системе ICON-Ru2-EPS с помощью пакета METplus, предоставляющего удобную возможность расчета разнообразных метрик, совокупность которых необходима для оценки качества прогнозов. Анализ метрик, характеризующих точность, надежность, разрешение, смещение и дискриминирующую способность прогнозов приземных характеристик продемонстрировал высокое качество прогнозов по системе ICON-Ru2-EPS.

Сопоставление результатов прогнозов по ансамблевой системе ICON-Ru2-EPS с данными наблюдений для случая резкого изменения погоды показало, что система способна дать информацию об ожидаемом количестве и местоположении осадков (лучше – для интенсивных осадков). Продемонстрирована полезность вероятностной продукции ансамблевого прогноза для порывов ветра и приземной температуры.

Исследование применимости метода случайных возмущений параметров схем, описывающих процессы подсеточного масштаба, показало его низкую эффективность для системы с высоким разрешением ICON-Ru2-EPS для территории ЦФО в зимний период. Вариации наборов возмущаемых параметров и диапазонов возмущения позволили достичь существенного повышения разброса и улучшения вероятностных оценок для скорости и порывов ветра только в сочетании с увеличением систематической ошибки этих характеристик. Обнаружена сильная чувствительность разброса и средних по ансамблю значений скорости и порывов приземного ветра к возмущениям параметра, влияющего на торможение горизонтального потока за счет подсеточной орографии. Влияние возмущений параметров модели на вероятностный прогноз приземной температуры и осадков оказалось мало. На основе анализа результатов численных экспериментов было решено пока остановиться на использовании случайных возмущений параметров физических схем модели в варианте ASLAM, приводящих к небольшому увеличению разброса и улучшению вероятностного прогноза, но не вызывающему ухудшения качества среднего по ансамблю прогноза, и в дальнейшем рассмотреть возможность применения другого метода возмущения модели.

Сокращение размера ансамбля с 21 до 15 реализаций не привело к значимым изменениям в оценках качества прогнозов для всех рассмотренных метеорологических величин, за исключением незначительного уменьшения смещения для давления на уровне море и скорости приземного ветра, проявляющегося при росте заблаговременности прогноза. Исходя из этого, в дальнейшем предполагается ограничиться в ансамбле 15 реализациями.

Разработанная система является базовой для дальнейших работ по краткосрочному ансамблевому прогнозированию. В связи с ограничением потоков информации из Немецкой службы погоды, разработкой и окончанием оперативных испытаний системы краткосрочных глобальных прогнозов ICON-Ru13/6N29 и версии глобальной ансамблевой системы на основе модели ПЛАВ с разрешением около 20 км, предполагается в ближайшем будущем перейти на использование продукции новых технологий Гидрометцентра России для подготовки граничных/начальных условий для мезомасштабной ансамблевой системы. Кроме того, планируется добавить стохастические возмущения поверхностных характеристик и ввести возмущения параметров, обладающие реалистичными пространственно-временными корреляциями.

Исследование проведено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета АААА-А20-120021890120-8 и АААА-А20-120021490079-3 (темы 1.1.4 и 1.1.3 на 2020–2024 гг.) и темы с регистрационным номером 125032004255-7 Проекта 1.1 на 2025–2029 годы.

### Список литературы

1. Алферов Ю.В. Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов // Труды Гидрометцентра России. 2003. Вып. 338. С. 119-124.
2. Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В., Цветков В.И. Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. Информационный сборник № 43. С. 63-79.
3. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Алгоритм расчета высоты свежеевыпавшего снега, предназначенный для постпроцессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO) // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 350. С. 195-212.
4. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
5. 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 компонентов развиваемой COSMO-Ru/icon // Метеорология и гидрология. 2024. № 8. С. 126-141.
6. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1740, no. 1. P. 012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012070.
7. Avgoustoglou E., Shtivelman A., Khain P., Marsigli C., Levi Y., Cerenzia I. On the seasonal sensitivity of ICON model // COSMO Newsletter. 2023. No. 22. DOI:10.5676/dwd\_pub/nwv/cosmo-nl\_22\_04.
8. Bishop C.H., Etherton B.J., Majumdar S.J. Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical Aspects // Mon. Wea. Rev. 2001. Vol. 129. P. 420-436. DOI: 10.1175/1520-0493(2001)129<0420:ASWTET>2.0.CO;2.

9. Bloom S.C., Takacs L.L., da Silva A.M., Ledvina D. Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates // *Mon. Wea. Rev.* 1996. Vol. 124. P. 1256-1271. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2.
10. Bouttier F., Raynaud L., Nuissier O., Ménétrier B. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016. Vol. 142. P. 390-403. DOI: 10.1002/qj.2622.
11. Bowler N.E., Arribas A., Mylne K.R., Robertson K.B., Beare S.E. The MOGREPS short-range ensemble prediction system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2008. Vol. 134. P. 703-722. DOI: 10.1002/qj.234.
12. Brown B. *et al.* The Model Evaluation Tools (MET) More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2021. Vol. 102. P. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1.
13. Buizza R., Palmer T.N. The singular-vector structure of the atmospheric general circulation // *J. Atm. Sciences.* 1995. Vol. 52. P. 1434-1456. DOI: 10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2.
14. Buizza R., Miller M., Palmer T.N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1999. Vol. 125. P. 2887-2908. DOI: 10.1002/qj.49712556006.
15. Buizza R., Houtekamer P.L., Pellerin G., Toth Z., Zhu Y., Wei M.A. Comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems // *Mon. Wea. Rev.* 2005. Vol. 133. P. 1076-1097. DOI: 10.1175/MWR2905.1.
16. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2008. Vol. 134. P. 2051-2066. DOI: 10.1002/qj.346.
17. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L., Haseler J. Combined use of EDA- and SV-based perturbations in the EPS // *ECMWF Newsletter.* 2010. Vol. 123. P. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.21957/codf7bpp>.
18. Buizza R., Richardson D. 25 years of ensemble forecasting at ECMWF // *ECMWF Newsletter.* 2017. Vol. 153. P. 20-31. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2017/18198-25-years-ensemble-forecasting-ecmwf.pdf>.
19. Christensen H.M., Lock S.-J., Moroz I.M., Palmer T.N. Introducing independent patterns into the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 2168-2181. DOI: 10.1002/qj.3075
20. Duan Q. *et al.* Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019. 1200 p. DOI: 10.1007/978-3-642-39925-1.
21. Fieldextra (COSMO software), 2024. <https://www.cosmo-model.org/content/support/software/default.htm#fieldextra>
22. Frogner I.-L., Haakenstad H., Iversen T. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2006. Vol. 132. P. 2785-2808. DOI: 10.1256/qj.04.178.
23. Giorgetta M.A. *et al.* ICON-A, the atmosphere component of the ICON Earth system model: I. Model description // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2018. Vol. 10. DOI: 10.1029/2017MS001242.
24. Gofa F. Verification in COSMO consortium // *COSMO Newsletter No. 23*, 2024. P. 12. <https://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter23/newsLetterNo23.pdf>
25. Hagelin S., Son J., Swinbank R., McCabe A., Roberts N., Tennant W. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 2846-2861. DOI: 10.1002/qj.3135.
26. Hersbach H. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems // *Wea. Forecasting.* 2000. Vol. 15(5). P. 559-570. DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2.
27. Hohenegger C. *et al.* ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales // *Geosci. Model Dev.* 2023. Vol. 16. P. 779-811. DOI: 10.5194/gmd-16-779-2023.

28. Houtekamer P.L., Lefaiivre L., Derome J., Ritchie H., Mitchell H.L. A system simulation approach to ensemble prediction // *Mon. Wea. Rev.* 1996. Vol. 124. P. 1225-1242. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1225:ASSATE>2.0.CO;2.
29. Houtekamer P.L., Mitchell H.L., Deng X. Model error representation in an operational ensemble Kalman filter // *Mon. Wea. Rev.* 2009. Vol. 137. P. 2126-2143. DOI: 10.1175/2008MWR2737.1.
30. Houtekamer P.L., Deng X., Mitchell H.L., Baek S.-J., Gagnon N. Higher resolution in an operational ensemble Kalman filter // *Mon. Wea. Rev.* 2014. Vol. 142. P. 1143-1162. DOI: 10.1175/MWR-D-13-00138.1.
31. Judt F. Insights into Atmospheric Predictability through Global Convection-Permitting Model Simulations // *J. Atmos. Sci.* 2018. Vol. 75. P. 1477-1497. DOI: 10.1175/JAS-D-17-0343.1.
32. Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Schmidt H. et al. The ICON Earth System Model version 1.0 // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2022. Vol. 14. P. e2021MS002813. DOI: 10.1029/2021MS002813.
33. Klasa C., Arpagaus M., Walser A., Wernli H. An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2018. Vol. 144. P. 744-764. DOI: 10.1002/qj.3245.
34. Keresturi E., Wang Y., Meier F., Weidle F., Wittmann C., Atencia A. Improving initial condition perturbations in a convection-permitting ensemble prediction system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145. P. 993-1012. DOI: 10.1002/qj.3473.
35. Kuhnlein C., Keil C., Craig G.C., Gebhardt C. The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 140. P. 1552-1562. DOI: 10.1002/qj.2238.
36. Lang S.T.K., Lock S.-J., Leutbecher M., Bechtold P., Forbes R.M. Revision of the Stochastically Perturbed Parametrisations model uncertainty scheme in the Integrated Forecasting System // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2021. Vol. 147. P. 1364-1381. DOI: 10.1002/qj.3978.
37. Lang S., Schepers D., Rodwell M. IFS upgrade brings many improvements and unifies medium-range resolutions // *ECMWF Newsletter*. 2023. No. 176. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/012023/81379-newsletter-no-176-summer-2023.pdf>.
38. Leutbecher M., Lock S.J., Ollinaho P. et al. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 2315-2339. DOI: 10.1002/qj.3094.
39. Lock S.J., Lang S.T.K., Leutbecher M., Hogan R.J., Vitari V. Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme and associated revisions in the ECMWF ensembles // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145 (Supplement 1). P. 75-89. DOI: 10.1002/qj.3570.
40. Magnusson L., Ackerley D., Bouteloup Y. et al. Skill of medium-range forecast models using the same initial conditions // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2022. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0234.1.
41. Marsigli C., Boccanera F., Montani A., Paccagnella T. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification // *Nonlin. Proc. Geophys.* 2005. Vol. 12 (4). P. 527-536. DOI: 10.5194/npg-12-527-2005. (hal-00302614).
42. Marsigli C. On the initial conditions of the ICON-D2-EPS ensemble: An analysis in terms of spread and skill // *EGU General Assembly 2020*, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-10803. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10803.
43. Miziak V., Rogutov V., Alipova K. Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1740. P. 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012072.
44. Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1996. Vol. 122. P. 73-119. DOI: 10.1256/smsqj.52904.
45. Molteni F., Buizza R., Marsigli C. et al. A strategy for high-resolution ensemble prediction. I: Definition of representative members and global-model experiments // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2001. Vol. 127. P. 2069-2094. DOI: 10.1002/qj.49712757612.

46. Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T. Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // *Tellus A*. 2011. Vol. 63. P. 605-624. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00499.x.
47. Ollinaho P., Lock S.-J., Leutbecher M. et al. Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143. P. 408-422. DOI: 10.1002/qj.2931.
48. Peralta C., Ben Bouallègue Z., Theis S. E., Gebhardt C., Buchhold M. Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. D07108. DOI: 10.1029/2011JD016581.
49. Porson A.N., Carr J.M., Hagelin S. et al. Recent upgrades to the Met Office convective-scale ensemble: An hourly time-lagged 5-day ensemble // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146. P. 3245-3265. DOI: 10.1002/qj.3844.
50. Rieger D., Milelli M., Boucouvala D. et al. Verification of ICON in Limited Area Mode at COSMO National Meteorological Services // *Reports on ICON*. 2021. Vol. 6. DOI: 10.5676/DWD\_pub/nwv/icon\_006.
51. Reinert D., Prill F., Frank H. et al. DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System // *Deutscher Wetterdienst (DWD)*. 2024. [https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon\\_dbbeschr\\_aktuell.html](https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon_dbbeschr_aktuell.html).
52. Rodwell M. J., Richardson D. S., Parsons D. B., Wernli H. Flow-Dependent Reliability: A Path to More Skillful Ensemble Forecasts // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2018. Vol. 99. P. 1015-1026. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0027.1.
53. Schraff C., Reich H., Rhodin A. et al. Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA) // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2016. Vol. 142. P. 1453-1472. DOI: 10.1002/qj.2748.
54. Schlemmer L., Zängl G., Helmert J. et al. ICON model parameters suitable for model tuning. DWD, 2022. <https://www.cosmo-model.org/content/support/icon/tuning/icon-tuning.pdf>.
55. Shutts G.J. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2005. Vol. 131. P. 3079-3100. DOI: 10.1256/qj.04.106.
56. Stensrud D. J., Brooks H. E., Du J., Tracton M. S., Rogers E. Using Ensembles for Short-Range Forecasting // *Mon. Wea. Rev.* 1999. Vol. 127. P. 433-446. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0433:UEFSRF>2.0.CO;2.
57. Tang Y., Lean H.W., Bornemann, J. The benefits of the Met Office variable resolution NWP model for forecasting convection // *Met. Apps.* 2013. Vol. 20. P. 417-426. DOI: 10.1002/met.1300.
58. Tennant W., Beare S. New schemes to perturb sea-surface temperature and soil moisture content in MOGREPS // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 140. P. 1150-1160. DOI: 10.1002/qj.2202.
59. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1993. Vol. 74. P. 2317-2330. DOI: 10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.
60. Toth Z., Kalnay E. Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method // *Mon. Wea. Rev.* 1997. Vol. 125. P. 3297-3319. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<3297:EFANAT>2.0.CO;2.
61. Tsyrlunikov M., Astakhova E., Gayfulin D. Additive Model Perturbations Scaled by Physical Tendencies for Use in Ensemble Prediction // *Tellus A*. 2023. Vol. 75 (1). P. 334-357. DOI: 10.16993/tellusa.3224.
62. Zängl G., Reinert D., Rípodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141. P. 563-579. DOI: 10.1002/qj.2378.
63. Zängl G., Reinert D., Prill F. Grid refinement in ICON v2.6.4 // *Geosci. Model Dev.* 2022. Vol. 15. P. 7153-7176. DOI: 10.5194/gmd-15-7153-2022.
64. Zhang F., Bei N., Rotunno R., Snyder C., Epifanio C. C. Mesoscale Predictability of Moist Baroclinic Waves: Convection-Permitting Experiments and Multistage Error Growth Dynamics // *J. Atmos. Sci.* 2007. Vol. 64. P. 3579-3594. DOI: 10.1175/JAS4028.1.

65. Vié B., Nuissier O., Ducrocq V. Cloud-Resolving Ensemble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions // *Mon. Wea. Rev.* 2011. Vol. 139. P. 403-423. DOI: 10.1175/2010MWR3487.1.
66. Wang X., Qiu X., Wu B. *et al.* Analysis of the different influence between initial/boundary and physical perturbation during ensemble forecast of fog // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2023. Vol. 135. P. 44. DOI: 10.1007/s00703-023-00981-2.
67. Wang Y., Bellus M., Wittmann C. *et al.* The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 483-502. DOI: 10.1002/qj.751.
68. Wang Y., Bellus M., Geleyn J. *et al.* A New Method for Generating Initial Condition Perturbations in a Regional Ensemble Prediction System: Blending // *Mon. Wea. Rev.* 2014. Vol. 142. P. 2043-2059. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00354.1.
69. Wang Y., Belluš M., Weidle F. *et al.* Impact of land surface stochastic physics in ALADIN-LAEF // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145. P. 3333-3350. DOI: 10.1002/qj.3623.
70. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y., Bishop C., Wang X. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP // *Tellus A.* 2006. Vol. 58. P. 28-44. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2006.00159.x.
71. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system // *Tellus A.* 2008. Vol. 60. P. 62-79. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00273.x.
72. Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th Edition // Elsevier. 2019. DOI: 10.1016/C2017-0-03921-6.

## References

1. Alferov Yu.V. Automated graphical system to visualize numerical forecast results. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2003, vol. 338, pp. 119-124 [in Russ.].
2. Astakhova E.D., Bundel A.Y., Bagrov A.N., Rozinkina I.A., Ponomareva T.Y., Ruzanova I.V., Tsvetkov V.I. Sistema ansamblevogo global'nogo prognoza meteorologicheskikh polej s zablagovremennost'ju do 240 chasov: rezul'taty operativnykh ispytaniy [Global ensemble system for predicting meteorological fields up to 240 hours ahead: results of operational trials]. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov, Informacionnyj sbornik № 43*. Ed. A.A. Alekseeva. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN publ., 2016, pp. 63-79 [in Russ.].
3. Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A. Algorithm for calculation of fresh snow height for postprocessing of atmospheric modeling systems (using COSMO as an example). *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 350, pp. 195-212 [in Russ.].
4. Kiktev D.B., Muraviev A.V., Bundel A.Y. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov [Methodical guidelines for weather forecasts verification]. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].
5. 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.
6. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1740, no. 1, pp. 012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012070.
7. Avgoustoglou E., Shtivelman A., Khain P., Marsigli C., Levi Y., Cerenzia I. On the seasonal sensitivity of ICON model. *COSMO Newsletter*, 2023, no. 22. DOI:10.5676/dwd\_pub/nwv/cosmo-nl\_22\_04.
8. Bishop C.H., Etherton B.J., Majumdar S.J. Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical Aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, vol. 129, pp. 420-436. DOI: 10.1175/1520-0493(2001)129<0420:ASWTET>2.0.CO;2.

9. Bloom S.C., Takacs L.L., da Silva A.M., Ledvina D. Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, vol. 124, pp. 1256-1271. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2.
10. Boultier F., Raynaud L., Nuissier O., Ménétrier B. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 390-403. DOI: 10.1002/qj.2622.
11. Bowler N.E., Arribas A., Mylne K.R., Robertson K.B., Beare S.E. The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 703-722. DOI: 10.1002/qj.234.
12. Brown B. et al. The Model Evaluation Tools (MET) More than a Decade of Community-Supported Forecast Verification. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2021, vol. 102, pp. E782-E807. DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0093.1.
13. Buizza R., Palmer T.N. The singular-vector structure of the atmospheric general circulation // *J. Atm. Sciences*, 1995, vol. 52, pp. 1434-1456. DOI: 10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2.
14. Buizza R., Miller M., Palmer T.N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1999, vol. 125, pp. 2887-2908. DOI: 10.1002/qj.49712556006.
15. Buizza R., Houtekamer P.L., Pellerin G., Toth Z., Zhu Y., Wei M.A. Comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, vol. 133, pp. 1076-1097. DOI: 10.1175/MWR2905.1.
16. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 2051-2066. DOI: 10.1002/qj.346.
17. Buizza R., Leutbecher M., Isaksen L., Haseler J. Combined use of EDAv- and SV-based perturbations in the EPS. *ECMWF Newsletter*, 2010, vol. 123, pp. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.21957/codf7bpp>.
18. Buizza R., Richardson D. 25 years of ensemble forecasting at ECMWF // *ECMWF Newsletter*, 2017, vol. 153, pp. 20-31. Available at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/library/2017/18198-25-years-ensemble-forecasting-ecmwf.pdf>.
19. Christensen H.M., Lock S.-J., Moroz I.M., Palmer T.N. Introducing independent patterns into the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 2168-2181. DOI: 10.1002/qj.3075.
20. Duan Q. et al. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2019, 1200 p. DOI: 10.1007/978-3-642-39925-1.
21. Fieldextra (COSMO software), 2024. Available at: <https://www.cosmo-model.org/content/support/software/default.htm#fieldextra>.
22. Frogner I.-L., Haakenstad H., Iversen T. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2006, vol. 132, pp. 2785-2808. DOI: 10.1256/qj.04.178.
23. Giorgetta M.A. et al. ICON-A, the atmosphere component of the ICON Earth system model: I. Model description. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2018, vol. 10. DOI: 10.1029/2017MS001242
24. Gofa F. Verification in COSMO consortium. *COSMO Newsletter*, 2024, no.23, pp. 12. Available at: <https://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter23/newsLetterNo23.pdf>.
25. Hagelin S., Son J., Swinbank R., McCabe A., Roberts N., Tennant W. The Met Office convective-scale ensemble, MOGREPS-UK. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 2846-2861. DOI: 10.1002/qj.3135.
26. Hersbach H. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. *Wea. Forecasting*, 2000, vol. 15, no. 5, pp. 559-570. DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2.
27. Hohenegger C. et al. ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer. *Geosci. Model Dev.*, 2023, Vol. 16, pp. 779-811. DOI: 10.5194/gmd-16-779-2023.

28. Houtekamer P.L., Lefaiivre L., Derome J., Ritchie H., Mitchell H.L. A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, vol. 124, pp. 1225-1242. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<1225:ASSATE>2.0.CO;2.
29. Houtekamer P.L., Mitchell H.L., Deng X. Model error representation in an operational ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2009, vol. 137, pp. 2126-2143. DOI: 10.1175/2008MWR2737.1.
30. Houtekamer P.L., Deng X., Mitchell H.L., Baek S.-J., Gagnon N. Higher resolution in an operational ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 1143-1162. DOI: 10.1175/MWR-D-13-00138.1.
31. Judt F. Insights into Atmospheric Predictability through Global Convection-Permitting Model Simulations. *J. Atmos. Sci.*, 2018, vol. 75, pp. 1477-1497. DOI: 10.1175/JAS-D-17-0343.1.
32. Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Schmidt H. et al. The ICON Earth System Model version 1.0. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2022, vol. 14, p. e2021MS002813. DOI: 10.1029/2021MS002813.
33. Klasa C., Arpagaus M., Walser A., Wernli H. An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2018, vol. 144, pp. 744-764. DOI: 10.1002/qj.3245.
34. Keresturi E., Wang Y., Meier F., Weidle F., Wittmann C., Atencia A. Improving initial condition perturbations in a convection-permitting ensemble prediction system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 993-1012. DOI: 10.1002/qj.3473.
35. Kuhnlein C., Keil C., Craig G.C., Gebhardt C. The impact of downscaled initial condition perturbations on convective-scale ensemble forecasts of precipitation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2014, vol. 140, pp. 1552-1562. DOI: 10.1002/qj.2238.
36. Lang S.T.K., Lock S.-J., Leutbecher M., Bechtold P., Forbes R.M. Revision of the Stochastically Perturbed Parametrisations model uncertainty scheme in the Integrated Forecasting System. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2021, vol. 147, pp. 1364-1381. DOI: 10.1002/qj.3978.
37. Lang S., Schepers D., Rodwell M. IFS upgrade brings many improvements and unifies medium-range resolutions. ECMWF Newsletter, 2023, no. 176. Available at: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/012023/81379-newsletter-no-176-summer-2023.pdf>.
38. Leutbecher M., Lock S.J., Ollinaho P. et al. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 2315-2339. DOI: 10.1002/qj.3094.
39. Lock S.J., Lang S.T.K., Leutbecher M., Hogan R.J., Vitart V. Treatment of model uncertainty from radiation by the Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) scheme and associated revisions in the ECMWF ensembles. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 75-89. DOI: 10.1002/qj.3570.
40. Magnusson L., Ackerley D., Bouteloup Y. et al. Skill of medium-range forecast models using the same initial conditions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2022. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0234.1.
41. Marsigli C., Boccanera F., Montani A., Paccagnella T. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlin. Proc. Geophys.*, 2005, vol. 12, no. 4, pp. 527-536. DOI: 10.5194/npg-12-527-2005. (hal-00302614).
42. Marsigli C. On the initial conditions of the ICON-D2-EPS ensemble: An analysis in terms of spread and skill. EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 May 2020, EGU2020-10803. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10803.
43. Miziak V., Rogutov V., Alipova K. Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1740, pp. 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/1740/1/012072.
44. Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 122, pp. 73-119. DOI: 10.1256/smsqj.52904.
45. Molteni F., Buizza R., Marsigli C. et al. A strategy for high-resolution ensemble prediction. I: Definition of representative members and global-model experiments. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2001, vol. 127, pp. 2069-2094. DOI: 10.1002/qj.49712757612.

46. Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T. Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges. *Tellus A.*, 2011, vol. 63, pp. 605-624. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00499.x.
47. Ollinaho P., Lock S.-J., Leutbecher M. et al. Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 143, pp. 408-422. DOI: 10.1002/qj.2931.
48. Peralta C., Ben Bouallègue Z., Theis S. E., Gebhardt C., Buchhold M. Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS. *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, pp. D07108. DOI: 10.1029/2011JD016581.
49. Porson A.N., Carr J.M., Hagelin S. et al. Recent upgrades to the Met Office convective-scale ensemble: An hourly time-lagged 5-day ensemble. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 3245-3265. DOI: 10.1002/qj.3844.
50. Rieger D., Milelli M., Boucouvala D. et al. Verification of ICON in Limited Area Mode at COSMO National Meteorological Services. *Reports on ICON*, 2021, vol. 6. DOI: 10.5676/DWD\_pub/nwv/icon\_006.
51. Reinert D., Prill F., Frank H. et al. DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System. Deutscher Wetterdienst (DWD), 2024. Available at: [https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modell/documentationen/nwv/icon/icon\\_dbbeschr\\_aktuell.html](https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modell/documentationen/nwv/icon/icon_dbbeschr_aktuell.html).
52. Rodwell M. J., Richardson D. S., Parsons D. B., Wernli H. Flow-Dependent Reliability: A Path to More Skillful Ensemble Forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2018, vol. 99, pp. 1015-1026. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0027.1.
53. Schraff C., Reich H., Rhodin A. et al. Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA). *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 1453-1472. DOI: 10.1002/qj.2748.
54. Schlemmer L., Zängl G., Helmert J. et al. ICON model parameters suitable for model tuning. DWD publ., 2022. Available at: <https://www.cosmo-model.org/content/support/icon/tuning/icon-tuning.pdf>.
55. Shutts G.J. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, pp. 3079-3100. DOI: 10.1256/qj.04.106
56. Stensrud D.J., Brooks H.E., Du J., Tracton M.S., Rogers E. Using Ensembles for Short-Range Forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, vol. 127, pp. 433-446. DOI: 10.1175/1520-0493(1999)127<0433:UEFSRF>2.0.CO;2.
57. Tang Y., Lean H.W., Bornemann, J. The benefits of the Met Office variable resolution NWP model for forecasting convection. *Met. Apps.*, 2013, vol. 20, pp. 417-426. DOI: 10.1002/met.1300.
58. Tennant W., Beare S. New schemes to perturb sea-surface temperature and soil moisture content in MOGREPS. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2014, vol. 140, pp. 1150-1160. DOI: 10.1002/qj.2202.
59. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, vol. 74, pp. 2317-2330. DOI: 10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.
60. Toth Z., Kalnay E. Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, vol. 125, pp. 3297-3319. DOI: 10.1175/1520-0493(1997)125<3297:EFANAT>2.0.CO;2.
61. Tsyrlunikov M., Astakhova E., Gayfulin D. Additive Model Perturbations Scaled by Physical Tendencies for Use in Ensemble Prediction. *Tellus A.*, 2023, vol. 75, no. 1, pp. 334-357. DOI: 10.16993/tellusa.3224.
62. Zängl G., Reinert D., Rípodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 141, pp. 563-579. DOI: 10.1002/qj.2378.
63. Zängl G., Reinert D., Prill F. Grid refinement in ICON v2.6.4. *Geosci. Model Dev.*, 2022, vol. 15, pp. 7153-7176. DOI: 10.5194/gmd-15-7153-2022.

64. Zhang F., Bei N., Rotunno R., Snyder C., Epifanio C. C. Mesoscale Predictability of Moist Baroclinic Waves: Convection-Permitting Experiments and Multistage Error Growth Dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 2007, vol. 64, pp. 3579-3594. DOI: 10.1175/JAS4028.1.
65. Vié B., Nuissier O., Ducrocq V. Cloud-Resolving Ensemble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 2011, vol. 139, pp. 403-423. DOI: 10.1175/2010MWR3487.1.
66. Wang X., Qiu X., Wu B. *et al.* Analysis of the different influence between initial/boundary and physical perturbation during ensemble forecast of fog. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2023, vol. 135, pp. 44. DOI: 10.1007/s00703-023-00981-2.
67. Wang Y., Bellus M., Wittmann C. *et al.* The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 483-502. DOI: 10.1002/qj.751.
68. Wang Y., Bellus M., Geleyn J. *et al.* A New Method for Generating Initial Condition Perturbations in a Regional Ensemble Prediction System: Blending. *Mon. Wea. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 2043-2059. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00354.1.
69. Wang Y., Belluš M., Weidle F. *et al.* Impact of land surface stochastic physics in ALADIN-LAEF. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 3333-3350. DOI: 10.1002/qj.3623.
70. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y., Bishop C., Wang X. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP. *Tellus A*, 2006, vol. 58, pp. 28-44. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2006.00159.x.
71. Wei M., Toth Z., Wobus R., Zhu Y. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system. *Tellus A*, 2008, vol. 60, pp. 62-79. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00273.x.
72. Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 4th Edition. Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/C2017-0-03921-6.

Поступила 28.01.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;

принята в печать 10.04.2025.

Submitted 28.01.2025; approved after reviewing 27.03.2025;

accepted for publication 10.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-37-50>

УДК 551.583:504.38

## **Система RANGES: структура, порядок расчета и пример применения**

***А.Ю. Богданович***

*Институт глобального климата и экологии  
имени академика Ю.А. Израэля, г. Москва, Россия  
bogda-anton@yandex.ru*

Описывается вычислительная система RANGES (от англ. range – «диапазон»), предназначенная для расчета климатической области распространения (КОР) природного явления на основе климатических характеристик и переменных (климатических предикторов) – гидрометеорологических величин и индексов, рассчитанных на их основе, – определяющих формирование КОР. Методология системы основана на байесовском подходе, позволяющем оценивать вероятность принадлежности географической точки к КОР исследуемого явления. Система RANGES реализована в виде комплекса программ и снабжена дружественным интерфейсом, построенным таким образом, чтобы автоматизировать процесс ввода данных, минимизируя ошибки. Система поддерживает работу как с данными наблюдений, так и с данными глобальных и региональных моделей (в данной версии системы – это модели Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова). Программный комплекс позволяет учитывать многочисленные климатические предикторы для описания условий, влияющих на природное явление. На основе анализа климатических предикторов система определяет вероятностные оценки принадлежности точек географического пространства к КОР и ранжирует эти оценки по методологии МГЭИК.

Приведен пример использования системы RANGES при вычислении КОР доминирования теплой части года (когда число суток с положительными среднесуточными температурами превышает 182). Рассчитаны изменения КОР для базового периода (1990–1999 гг.) и для 2030–2039 и 2050–2059 гг. в условиях сценария RCP8.5. Показаны смещения границ КОР доминирования теплой части года, иллюстрирующие влияние изменений климата.

*Ключевые слова:* климат, природное явление, климатическая область распространения, вычислительная система, пример применения

## **The RANGES system: structure, calculation procedure and application example**

***A.Yu. Bogdanovich***

*Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia  
bogda-anton@yandex.ru*

The RANGES computing system is described, which is intended for calculating the climatic area of distribution (CAD) of a natural phenomenon based on the climatic characteristics and parameters (climatic predictors) – hydrometeorological variables and indices calculated on their basis – that determine the formation of the CAD. The methodology of the system is based on a probabilistic Bayesian approach, which allows assessing

the belonging of a geographic point to the CAD of the phenomenon under study. The system is implemented as a set of programs and is equipped with a user-friendly interface to automate the process of data entry, minimizing errors. The system maintains operation both with observational data and with data of global and regional models (in the present version of the system, these are the models of Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences and Voeikov Main Geophysical Observatory). The software package allows taking into account multiple climatic predictors to describe the conditions influencing a natural phenomenon. Based on the analysis of climatic predictors, the system provides probabilistic estimates of the belonging of geographic points to the CAD and ranks the estimates according to the IPCC methodology.

An example of using the RANGES system to calculate the dominant CDA in the warm season (defined as a period with a number of days with positive temperatures above 182) is given. Changes in the CDA for the base period (1990–1999) and for 2030–2039 and 2050–2059 under the RCP8.5 scenario are calculated. Shifts in the boundaries of the warm-season dominant CAD illustrating the impact of climate change are shown.

*Keywords:* climate, natural phenomenon, climatic area of distribution, computing system, application example

## Введение

Климатическая область распространения (КОР) природного явления – часть географического пространства, климат которой допускает систематическое наличие природного явления при способствующем сочетании остальных факторов среды.

Разработка инструментов, позволяющих оценивать КОР природных явлений и их изменения при изменении климата, является одной из актуальных задач современной климатологии. При этом важно обеспечить не только расчет КОР, но и оценку неопределенности заключения о том, что точка географического пространства принадлежит КОР. Методика такой оценки, основанной на вероятностном байесовском подходе, изложена в [4].

Для расчета КОР природных явлений, исходя из состояния климата и характера зависимости исследуемого явления от состояния климата, создана вычислительная система RANGES. В ее современном виде это программный комплекс, разработанный А.Ю. Богдановичем. Дружественный интерфейс создан Н.Ю. Добролюбовым. Общее руководство этой разработкой осуществлял С.М. Семенов. Авторское свидетельство на разработку системы RANGES зарегистрировано в Роспатенте (Свидетельство Роспатента № 2024668052 [3]).

Функциональные возможности системы RANGES весьма широки. Она использовалась для оценки КОР таких явлений, как сильные засухи, распространение насекомых-вредителей сельскохозяйственных и лесных растений, распространение переносчиков трансмиссивных заболеваний человека.

Система RANGES может использовать при расчете данные мониторинга и моделирования климата. Исследуемое явление характеризуется специфической совокупностью переменных – гидрометеорологических

величин и/или индексов, рассчитанных на их основе (например, сумма активных температур, сумма эффективных температур, гидротермические коэффициенты). В научной литературе такие переменные часто называются «климатическими предикторами». При этом исследуемому явлению соответствуют допустимые диапазоны их значений.

Целью данной статьи является представление структуры системы RANGES, а также демонстрация ее возможностей на примере расчета климатической области распространения физического явления – доминирования теплой части года в календарном году.

## Входные данные

### *Данные о климате*

Система RANGES может работать с данными как о наблюдаемом (фактическом) климате, так и с результатами математического моделирования климата в условиях различных сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему Земли.

Климатические данные, используемые в текущей версии системы, – среднемесячные значения температуры воздуха в приповерхностном слое и месячные суммы осадков. Они организованы по узлам пространственной широтно-долготной сетки. В отдельных файлах хранятся данные о климате для конкретного года и определенной реализации климата (если речь идет о результатах модельных расчетов). Для различных сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему Земли используются отдельные группы файлов с климатическими данными.

В расчетах, проведенных к настоящему моменту, применялись климатические модельные данные из следующих двух источников:

- для глобальных оценок – глобальная климатическая модель Института вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН). Данные предоставлены Е.М. Володиным. Они характеризуют периоды 1990–1999, 2030–2039 и 2050–2059 гг., соответствуют сценариям SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Исходное пространственное разрешение –  $1.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ . Была проведена интерполяция на сетку  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ;

- для региональных расчетов применялись данные, предоставленные Климатическим центром Росгидромета (КЦР) и рассчитанные с использованием региональной климатической модели Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (ГГО). Эти данные, предоставленные И.М. Школьником, охватывают те же временные периоды, что и данные модели ИВМ РАН, но характеризуются более детальным исходным пространственным разрешением –  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  [10]. Рассчитанные значения соответствуют сценариям семейства RCP (Representative Concentration Pathways).

Оба набора модельных данных были скорректированы с учетом расхождений с фактическими климатическими данными за период 1990–1999 гг., которые представлены в массиве CRU TS v.4.04 [13]. Данные CRU,

созданные Отделом исследования климата Университета Восточной Англии, представляют собой значения для узлов сетки  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , полученные на основе обработки наблюдений метеостанций. Подробное описание методов корректировки приведено в работе [1]. Скорректированные массивы данных, таким образом, обозначаются с надстрочной латинской буквой «а» (от «adjusted»), например, КЦР<sup>а</sup> или ИВМ<sup>а</sup>. Именно эти массивы использовались в качестве входной климатической информации для системы RANGES.

### ***Технические параметры***

Для выполнения расчетов в системе RANGES требуется ввод следующих технических параметров:

- имя для результирующего файла;
- идентификаторы источника данных; например, для данной версии системы – модели ИВМ РАН (обозначается как "INM") или ГГО (обозначается как "MGO");
- сценарный параметр, который указывает сценарий антропогенного воздействия на климатическую систему Земли (например, SSP или RCP);
- временной период, задаваемый его начальным годом и продолжительностью;
- число реализаций климата, которое определяется объемом используемых данных; для глобальных данных ИВМ РАН это количество ограничено одной реализацией на сценарий, кроме SSP7.0 и исторического, где рассматриваются пять реализаций; для региональных данных ГГО на каждый сценарий RCP представлено до 50 реализаций;
- критическое минимальное значение доли лет в рассматриваемом климатически значимом периоде времени, при превышении которой исследуемое явление считается систематически наличествующим;
- номер старшей гармоники, учитываемой при разложении ступенчатой функции, принимающей в пределах каждого месяца значение, равное среднемесячному значению температуры воздуха, по гармоническим функциям при осуществлении интерполяции для получения суточных данных [8];
- географические границы для расчетов, задаваемые широтами и долготами в градусах в десятичном формате, что позволяет при необходимости ограничивать область исследования (подобная гибкость настройки делает систему RANGES удобным инструментом для работы с данными различных пространственных масштабов).

### ***Климатические предикторы***

Для описания климатических условий, влияющих на природное явление, в текущей версии системы RANGES используются следующие климатические предикторы:

- средняя температура за определенные месяцы года (до трех отрезков);
- месячная сумма осадков за выбранные месяцы (до трех отрезков);
- максимальная и минимальная среднемесячная температура за год;
- максимальная и минимальная среднесуточная температура за год;
- суммы активных (САТ), пассивных (СПТ) и эффективных (СЭТ) среднесуточных значений температуры;
- гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК);
- число дней в году, в которые среднесуточное значение температуры или же суточная сумма осадков превышала пороговые значения.

Структура системы RANGES допускает включение и иных климатических предикторов при необходимости.

### **Последовательность работы головной программы**

Для обеспечения удобного ввода параметров и минимизации ошибок пользователям предоставляется дружелюбный интерфейс, разработанный сотрудником ФГБУ «ИГКЭ» Н.Ю. Добролюбовым и реализованный на языке программирования Visual Basic .NET в среде MS Visual Studio Community (общедоступная версия). Интерфейс позволяет интерактивно формировать файл с заданными условиями и автоматически проверяет ввод данных.

Система RANGES использует вероятностный подход для определения принадлежности точки географического пространства к КОР исследуемого явления. Методология основана на оценке параметра  $p$ , представляющего долю лет в рассматриваемом климатически значимом периоде времени, климатические условия которых способствуют исследуемому явлению. Считается, что явление систематически наличествует, если  $p$  превышает пороговое значение  $p_0$ . Вероятность этого рассчитывается в рамках байесовского подхода методом, подробно описанным в [2, 4].

Система RANGES реализована на языке FORTRAN (общедоступная версия) в виде головной программы с рядом вспомогательных подпрограмм, обеспечивающих выполнение всех этапов анализа климатических данных и построения вероятностных оценок. Главной программой системы является модуль RANGES.FOR, название которого может включать маркер версии, например, RANGES\_B1.FOR. Рассмотрим подробно последовательность действий головной программы и взаимодействие с подпрограммами.

### **Чтение входной информации**

Выполняется чтение входной информации, находящейся в файле RANGES.PAR, содержащем информацию о технических параметрах, используемых при расчете климатических предикторов и их допустимых диапазонах, об именах файлов используемых климатических данных и географических ограничениях для расчета результатов оценки КОР.

### **Открытие используемых файлов с информацией о климате**

Открываются все файлы, содержащие информацию о климате, соответствующую заданному сценарию, годам из рассматриваемого периода времени и реализациям климата.

### **Создание выходного файла**

Открывается текстовый файл для вывода результатов, имя которого задано параметром *NOUT* в файле *RANGES.PAR*. В этот файл сначала копируется информация из *RANGES.PAR* для однозначного сопоставления впоследствии результатов расчета с исходными данными.

### **Среднесуточные значения: интерполяция**

Для каждого месяца календарного года  $K$  задается функция суток  $D$  в календарном году, принимающая значение 1 для суток этого месяца и 0 для остальных. Эта функция разлагается по гармоническим функциям и рассматривается начальная часть разложения до  $NF$ -й гармоники (значение  $NF$  задается в файле входной информации *RANGES.PAR*, по умолчанию  $NF = 4$ ). Полученная функция обозначается  $Z0(K, D)$  для обычного года и  $ZV(K, D)$  для високосного.

Если в файле входной информации указывается необходимость использования климатических предикторов, рассчитываемых с использованием среднесуточных значений температуры, то последовательности среднемесячных значений температуры  $\{T(K), K=1, \dots, 12\}$  ставится в соответствие последовательность значений среднесуточной температуры  $\{Z(D)\}$ , где для обычного года  $Z(D) = T(1) \cdot Z0(1, D) + \dots + T(12) \cdot Z0(12, D)$ ,  $D = 1, \dots, 365$ , а для високосного  $Z(D) = T(1) \cdot ZV(1, D) + \dots + T(12) \cdot ZV(12, D)$ ,  $D = 1, \dots, 366$ .

Расчет функции  $Z0(K, D)$  (или  $ZV(K, D)$ ) выполняется через вызов подпрограммы *SMD\_C.FOR*. Ее входные переменные – номер года *YEAR*, число используемых гармоник  $NF$  и 12 среднемесячных значений гидрометеорологических переменных (например, температуры воздуха).

*SMD\_C.FOR*, в свою очередь, вызывает две вспомогательные подпрограммы:

- *MD.FOR* – преобразует порядковый номер суток в году в номер месяца и порядковый номер суток в пределах месяца;
- *FCOEF.FOR* – рассчитывает коэффициенты разложения по гармоническим функциям.

Следует отметить, что описанная выше гармоническая интерполяция суточных значений, исходя из месячных, применяется для температуры, но не осадков. Для интерполяции осадков в текущей версии системы месячные их значения равномерно распределяются в пределах месяца для получения суточных значений.

### **Обработка климатической информации**

Программа анализирует файлы с климатической информацией, соответствующей заданному временному периоду продолжительностью  $NY0$  лет. Общее число климатических файлов  $NB0$  определяется как произведение  $NB0 = NY0 \cdot NR0$ , где  $NR0$  – число имеющихся реализаций климата.

Обработка климатической информации производится в режиме совместного чтения климатических данных из всех открытых файлов. На каждом шаге читаются данные, относящиеся к определенному узлу используемой пространственной сетки. Если такой узел не удовлетворяет широтно-долготным ограничениям, указанным среди технических параметров расчета, то дальнейшая обработка этой строки не производится, и программа переходит к обработке следующей строки.

Если рассматриваемый узел сетки удовлетворяет широтно-долготным ограничениям, но какой-то элемент климатической информации за какой-то год при какой-то реализации климата отсутствует (т. е. наблюдается пропуск данных), то эта информация в дальнейшем не учитывается. В ином случае проводится проверка, находятся ли значения всех заданных климатических предикторов в пределах своих допустимых диапазонов. Если находятся, то данной реализации климата в данном году ставится в соответствие 1, иначе 0.

В результате для рассматриваемого узла, удовлетворяющего широтно-долготным ограничениям, определяются два числа:  $N$  – общее число лет во всех реализациях климата, для которых имеется полная климатическая информация, и  $k$  – их часть, для которых значения климатических предикторов находятся в допустимых диапазонах.

### **Оценка вероятностей**

Если  $N > 0$ , числа  $k$  и  $N$  передаются на вход подпрограммы `LAS_B.FOR`, которая определяет степень уверенности в том (вероятности того), что данная точка географического пространства принадлежит КОР исследуемого явления.

Подпрограмма `LAS_B.FOR` вызывает модуль `BAYES.FOR`, который:

- оценивает вероятность  $ACP$  того, что параметр биномиального распределения меньше заданного порогового значения  $p_0$  [4];  $p_0$  задается в файле `RANGES.PAR`;

- определяет ранг вероятности  $PR = 1 - ACP$  в соответствии с приведенными в табл. 1.

Ранг принимает значения от 0 («маловероятно») до 4 («практически достоверно») в соответствии с методологией МГЭИК, описанной в [15].

Таким образом, каждому обработанному узлу пространственной сетки присваивается определенный ранг, соответствующий уверенности в том

(вероятности того), что он принадлежит КОР исследуемого природного явления. Картографический вывод результатов поддерживается внешними системами, например QGIS.

**Таблица 1.** Определение ранга вероятности  $PR$

**Table 1.** Determination of rank for likelihood  $PR$

| Диапазон значений<br>$PR = 1 - ACP$ | Ранг | Словесная характеристика |
|-------------------------------------|------|--------------------------|
| (0.99; 1]                           | 4    | Практически достоверно   |
| (0.90; 0.99]                        | 3    | Весьма вероятно          |
| (0.66; 0.90]                        | 2    | Вероятно                 |
| (0.33; 0.66]                        | 1    | Средневероятно           |
| $\leq 0.33$                         | 0    | Маловероятно             |

Теоретическое обоснование использованных в системе RANGES подходов и алгоритмов предложено в [2, 4, 7, 11].

### Пример использования системы RANGES

Рассмотрим в качестве примера такое явление, как доминирование теплой части года в календарном году. Это означает, что число суток с положительными среднесуточными температурами воздуха в приповерхностном слое превышает 182.

В условиях умеренного и холодного климата продолжительность теплой части года сильно зависит от географической широты, высоты над уровнем моря, близости к морям и океанам, а также от некоторых других физико-географических факторов. Географическая широта особенно важна, так как она в значительной мере определяет поступление солнечной энергии на земную поверхность. В тропических регионах теплая часть года может занимать весь календарный год, тогда как в полярных регионах может продолжаться только несколько недель [14].

Физико-географическая среда оказывает локальное влияние на продолжительность теплой части года. Например, горные районы характеризуются резким сокращением теплой части года из-за снижения температуры с высотой, в то время как прибрежные территории в высоких широтах могут иметь более длительный теплый сезон вследствие смягчающего влияния водных акваторий [9, 14]. Темные почвы и плотные лесные массивы также способны изменять микроклимат, увеличивая число дней с положительными среднесуточными температурами [6, 12].

Изменение продолжительности теплой части года, вызванное глобальным изменением климата, оказывает значительное воздействие на природные и хозяйственные процессы. Длительный теплый сезон улучшает условия для сельского хозяйства, способствует расширению зон производства

продукции растениеводства и повышению урожайности [5]. Глобальные климатические изменения продолжают оказывать влияние на региональные климатические процессы, увеличивая длительность теплой части года [14].

Для выполнения расчётов той области географического пространства, где теплая часть года доминирует, использовалась система RANGES. Климат соответствовал массиву КЦР<sup>a</sup>, сценарий RCP8.5; в качестве значения параметра  $p_0$  принято 0.5. Расчеты выполнялись для следующих временных срезов: 1990–1999 (базовый период), 2030–2039, 2050–2059 годов.

Для визуализации были построены карты КОР доминирования теплой части года для базового периода и ее изменений для прогнозных периодов времени. Балльные оценки вероятности принадлежности точек к зоне доминирования (табл. 1) отражены с помощью цветовой шкалы. Рангам  $PR$  соответствуют следующие цвета: 0 – белый, 1 – желтый, 2 – темно-желтый, 3 – коричневый, 4 – темно-коричневый.

При изменении климата ранги  $PR$  могут, вообще говоря, изменяться от -4 до 4. В рассматриваемом случае отрицательных значений не возникло. В табл. 2 представлены вербальная характеристика и соответствующее цветовое воплощение ([7] с изменениями). Однако в данной работе отсутствие изменений отображалось бежевым цветом, а не белым, как в оригинальной системе.

**Таблица 2.** Вербальная характеристика и цветовое представление изменений рангов вероятности ([7] с изменениями)

**Table 2.** Verbal characteristics and color representation of changes in probability ranks ([7] with changes)

| Изменение ранга | Вербальная характеристика |               | Цвет          |
|-----------------|---------------------------|---------------|---------------|
| 4               | Увеличение                | Очень сильное | Фиолетовый    |
| 3               |                           | Сильное       | Темно-красный |
| 2               |                           | Среднее       | Красный       |
| 1               |                           | Слабое        | Розовый       |
| 0               | Изменений не выявлено     |               | Бежевый       |

Для базового климата 1990–1999 гг. (рис. 1) доминирование теплой части года наблюдается на большей территории европейской части страны, а также на юге Сибири и Дальнего Востока.

Для климата 2030–2039 гг. (рис. 2) сценария RCP8.5 северная граница доминирования теплой части года смещается на север по сравнению с базовым климатом.

В 2050–2059 гг. (рис. 3) смещение зоны доминирования теплой части года становится ещё более выраженным.

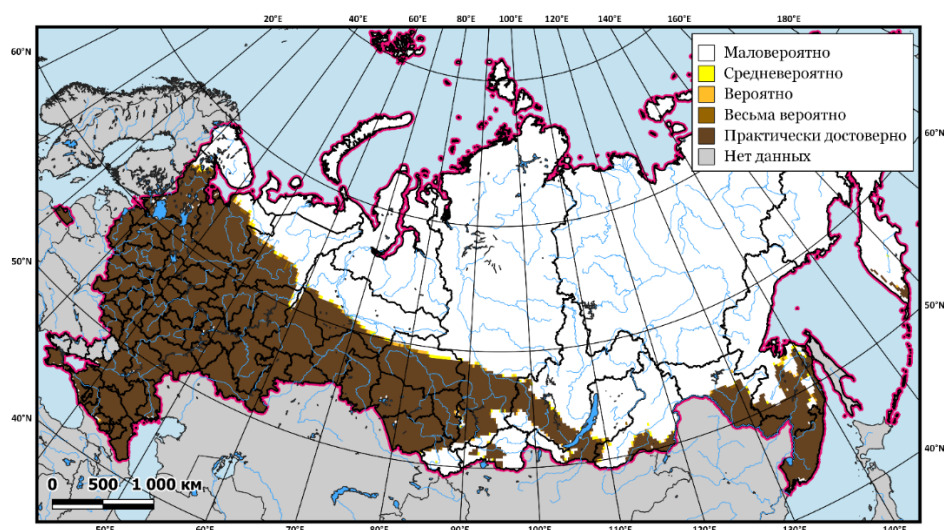


**Рис. 1.** Пространственное распределение балльной оценки вероятности того, что в точке географического пространства доминирует теплая часть года; климат КЦР<sup>а</sup> для 1990–1999 гг.

**Fig. 1.** Spatial distribution of the probability score that a warm part of the year dominates at a point of geographic space; climate of the КЦР<sup>а</sup> for 1990–1999.

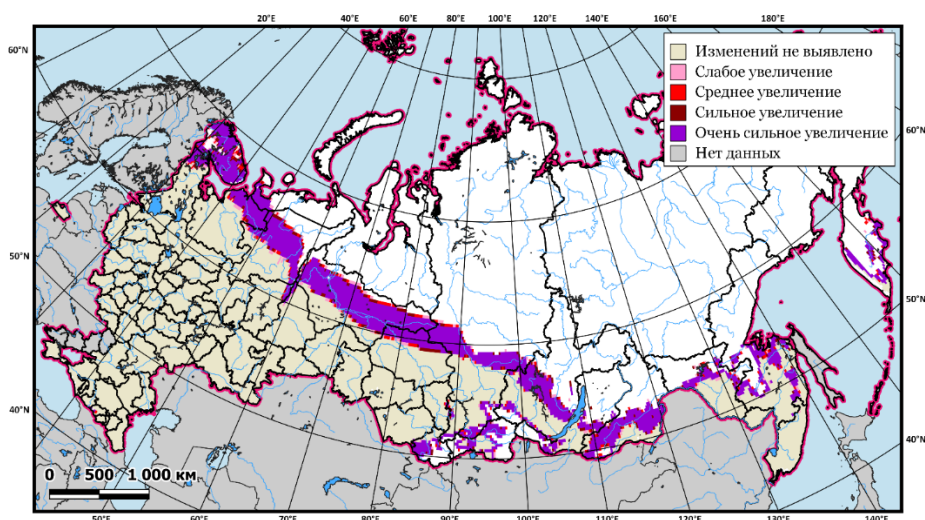


**Рис. 2.** Пространственное распределение изменений балльной оценки вероятности того, что в точке географического пространства доминирует теплая часть года; для 2030–2039 гг. по сравнению с 1990–1999 гг.; климат КЦР<sup>а</sup>, сценарий RCP8.5

**Fig. 2.** Spatial distribution of changes in the probability score that a warm part of the year dominates at a point of geographic space; for 2030–2039 compared to 1990–1999; КЦР<sup>а</sup> climate, RCP8.5 scenario.

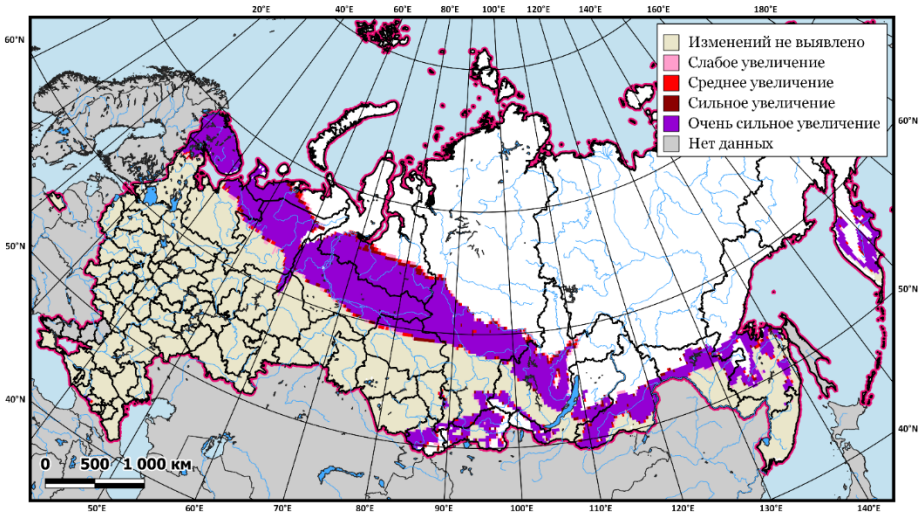


**Рис. 3.** Пространственное распределение изменений балльной оценки вероятности того, что в точке географического пространства доминирует теплая часть года; для 2050–2059 гг. по сравнению с 1990–1999 гг.; климат КЦР<sup>a</sup>, сценарий RCP8.5.

**Fig. 3.** Spatial distribution of changes in the probability score that a warm part of the year dominates at a point of geographic space; for 2050–2059 compared to 1990–1999; КЦР<sup>a</sup> climate, RCP8.5 scenario.

Для климата 2050–2059 гг. на Европейской территории России КОР доминирования теплой части года охватывает практически всю территорию, включая северо-запад и такие регионы, как Мурманская область, Архангельская область и большая часть Республики Коми. В Западной Сибири это происходит на значительной части территории вплоть до юга Ямало-Ненецкого автономного округа. На Дальнем Востоке граница также продвигается на север. В горных регионах, таких как Алтай, также происходит смещение границы в направлении больших высот.

### Заключение

Система RANGES в текущей версии позволяет рассчитывать КОР природного явления исходя из климата (фактического или модельного) и тех климатических факторов (климатических предикторов), которые определяют КОР. Используются климатические данные о температуре и осадках месячного разрешения, а также климатические предикторы, представленные в специальной научной литературе.

В ближайшие годы предполагается дальнейшее развитие системы, в том числе в следующих направлениях:

- использование данных мониторинга и моделирования климата суточного разрешения;

– выявление совокупности климатических предикторов, соответствующих явлению, путем анализа данных фактической области его распространения.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Росгидромета: план НИТР Росгидромета на 2025 г., регистрационный номер 125030703339-4 в системе ЕГИСУ НИОКТР, тема 3.1.3 «Выявление климатогенных угроз секторам экономики России, функционирующим на основе природного комплекса, экосистемам и здоровью населения, в том числе связанных с изменением климатических ареалов видов в XXI веке. Оценки рисков и возможностей адаптации».

**Acknowledgements.** The research was carried out with the support of Roshydromet: Roshydromet's research and development plan for 2025, registration number 125030703339-4 in the EGISU R&D system, topic 3.1.3. "Identification of climate-related threats to sectors of the Russian economy operating on the basis of the natural complex, ecosystems and human health, including those associated with changes in the climatic ranges of species in the 21<sup>st</sup> century. Assessment of risks and adaptation opportunities."

#### Список литературы

1. Богданович А.Ю., Павлова В.Н., Ранькова Э.Я., Семенов С.М. Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. № 1. С. 20-35.
2. Богданович А.Ю., Семенов С.М. Оценка климатических ареалов видов с использованием системы RANGES // *Сборник тезисов докладов Международной конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат–2023»*, 9–13 октября 2023 года. М.: Физматкнига, 2023. С. 220-220.
3. Богданович А.Ю., Семенов С.М., Добролюбов Н.Ю. Система RANGES: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024668052. Дата государственной регистрации 01 августа 2024 года.
4. Добролюбов Н.Ю., Семенов С.М., Володин Е.М., Богданович А.Ю. Алгебраический алгоритм статистической оценки параметра биномиального распределения и пример его применения в одной глобальной геоинформационной задаче прикладной климатологии // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 10. С. 16-24.
5. Ковтун В.И., Ковтун Л.Н. Технология выращивания высококачественного зерна озимой пшеницы на юге России // *Земледелие*. 2013. № 3. С. 19-21.
6. Национальный атлас России в четырех томах. Том 2. Природа. Экология. М.: Роскартография, 2007. 496 с.
7. Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 59-65.
8. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. Выявление климатогенных изменений. М.: Метеорология и гидрология, 2006. 324 с.
9. Хромов С.П., Петросьянц М.А. Метеорология и климатология: Учебник. – 8-е издание. М.: Изд-во МГУ, 2012. 584 с.
10. Школьник И.М., Ефимов С.В. Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2015. № 576. С. 201-211.

11. Ясюкевич В.В., Богданович А.Ю. Климатические предикторы для модельного описания климатических ареалов некоторых биологических видов и их изменений в условиях будущего климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 1. С. 117-137.
12. Hansen M.C., DeFries R.S., Townshend J.R., Sohlberg, R. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach // International journal of remote sensing. 2000. Vol. 21, no. 6-7. P. 1331-1364.
13. Harris I., Osborn T.J., Jones P.D., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. Vol. 7, no. 1. Article number 109. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
14. IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., and Zhou B. (Eds.). Cambridge University Press – Cambridge – United Kingdom and New York – NY – USA, 2021. 2391 p.
15. Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. (Core Writing Team). IPCC Fifth Assessment Guidance Note for Lead Authors IPCC Cross-Working Group for Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2010. Available at <http://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/uncertainty-guidance-note.pdf> (accessed 10 March 2025).

## References

1. Bogdanovich A.Yu., Pavlova V.N., Ran'kova E.Ya., Semenov S.M. Vliyaniye izmeneniy zasushlivosti v Rossi v XXI veke na prigodnost' territorij dlya vozdeleyvaniya zernovykh kul'tur [Influence of changes in aridity in Russia in the XXI century on the suitability of territories for the cultivation of grain crops]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology], 2021, № 1, pp. 20-35 [in Russ.].
2. Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. Ocenka klimaticheskikh arealov vidov s ispol'zovaniem sistemy RANGES [Estimating the climatic ranges of species using the RANGES system]. *Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy konferencii «Izmeneniya klimata: prichiny, riski, posledstviya, problemy adaptatsii i regulirovaniya. Klimat–2023»*. 9-13 oktyabrya 2023 goda. Moscow, Fizmatkniga publ., 2023, pp. 220-220 [in Russ.].
3. Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M., Dobrolyubov N.Yu. Sistema RANGES [RANGES System]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2024668052. Data gosudarstvennoy registratsii 01 avgusta 2024 goda.[in Russ.].
4. Dobrolyubov N.Yu., Semenov S.M., Volodin E.M., Bogdanovich A.Yu. Algebraic Algorithm for Statistical Estimation of the Binomial Distribution Parameter and an Example of Its Application in a Global Geoinformation Task of Applied Climatology. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no 1, pp. 72-78.
5. Kovtun V.I., Kovtun L.N. Technology of growing high-quality winter wheat grain in the south of Russia. *Zemledelie* [Agriculture], 2013, № 3, pp. 19-21 [in Russ.].
6. Nacional'nyj atlas Rossii v chetyreh tomah. – Tom 2 «Priroda. Ekologiya» [National Atlas of Russia in four volumes. – Volume 2 “Nature. Ecology”] Moscow: Roskartografiya publ., 2007, 496 p. [in Russ.].
7. Semenov S.M., Popov I.O., Yasyukevich V.V. Statistical Model for Assessing the Formation of Climate-related Hazards Based on Climate Monitoring Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 339-344. DOI: 10.3103/S1068373920050040.
8. Semenov S.M., Yasyukevich V.V., Gel'ver E.S. Vyyavlenie klimatogennykh izmenenij [Identification of climatogenic changes] Moscow: Publishing Center «Meteorology and Hydrology», 2006, 324 p. [in Russ.].

9. Hromov S.P., Petrosyanc M.A. Meteorologiya i klimatologiya: Uchebnik. – 8-e izdanie [Meteorology and Climatology: Textbook. – 8th edition] M.: Moscow University Publishing House, 2012, 584 p. [in Russ.].

10. Shkol'nik I.M., Efimov S.V. Regional'naya model' novogo pokoleniya dlya territorii severnoj Evrazii [Regional model of a new generation for the territory of northern Eurasia]. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2015, no. 576, pp. 201-211 [in Russ.].

11. Yasyukevich V.V., Bogdanovich A.Yu. Climate predictors for the model description of the climatic ranges of some biological species and their changes in the conditions of the future climate. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2021, vol. 7, № 1, pp. 117-137 [in Russ.].

12. Hansen M.C., DeFries R.S., Townshend J.R., Sohlberg, R. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International journal of remote sensing*, 2000, vol. 21, № 6-7, pp. 1331-1364.

13. Harris I., Osborn T.J., Jones P.D., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 2020, vol. 7, article number 109.

14. IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., and Zhou B. (Eds.). Cambridge University Press – Cambridge – United Kingdom and New York – NY – USA, 2021, 2391 pp.

15. Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. (Core Writing Team). IPCC Fifth Assessment Guidance Note for Lead Authors IPCC Cross-Working Group for Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2010. Available at <http://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/uncertainty-guidance-note.pdf> (accessed 10 March 2025).

Поступила 06.11.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.

Submitted 06.11.2024; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-51-69>

УДК 551.515.4

## **О воспроизведении сезонного хода и среднегодовых осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6**

***А.Б. Полонский, П.А. Сухонос***

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

Рассмотрено качество воспроизведения сезонного цикла и среднегодовых величин атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем, по данным расчетов, полученных с помощью 36 глобальных численных моделей (173 реализации) из международного проекта Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Результаты расчетов сопоставляются с данными реанализа ERA5 за исторический период 1959–2022 гг. Показано, что большинство моделей проекта CMIP6 неудовлетворительно воспроизводит климатический сезонный ход и среднегодовые величины осадков над Черным морем. В целом, с данными реанализа ERA5 лучше согласуются результаты моделирования зимних осадков. Это свидетельствует о низком качестве параметризации осадков конвективного типа в средних широтах Северного полушария в большей части моделей из консорциума CMIP6. Отобраны 5 моделей из 36, которые можно использовать для оценки среднегодовых величин осадков над Черным морем, из них только 3 целесообразно использовать для оценки месячных осадков.

*Ключевые слова:* атмосферные осадки, сезонный ход, Черное море, CMIP6

## **Reproducibility of seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea from CMIP6 models**

***A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos***

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

The quality of simulation of the seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea is considered using the calculations of 36 global numerical models (173 realizations) from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The calculation results are compared with the ERA5 reanalysis data for the historical period of 1959–2022. It is shown that most of the CMIP6 models poorly simulate the climatic seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea. In general, the results of modeling winter precipitation are more consistent with the ERA5 reanalysis data than summer precipitation. This indicates a low quality of parameterization of convective precipitation in the Northern Hemisphere midlatitudes in most of the CMIP6 models. Five of 36 models that can be used for estimating annual precipitation over the Black Sea are selected, and only three of the models can be used to estimate monthly precipitation.

*Keywords:* precipitation, seasonal cycle, Black Sea, CMIP6

## Введение

Изучение вероятных изменений климата в 21 веке предполагает детальный анализ современного климатического режима на региональных масштабах [2]. В последнее время достигнут существенный прогресс в мультимодельном подходе к численному моделированию изменений климата [12]. Однако оценки климатических параметров на региональных масштабах (особенно в регионах с большой неоднородностью подстилающей поверхности) все еще характеризуются большим разбросом и требуют уточнения [1].

Наиболее неопределенным оцениваемым параметром, важным с точки зрения его влияния на гидролого-гидрохимический режим морских акваторий, являются осадки. В настоящее время вопрос о качестве воспроизведения характеристик атмосферных осадков во многих регионах земного шара по данным климатических моделей остается открытым. Анализ способности глобальных климатических моделей международного проекта Coupled Model Intercomparison Project Phase (CMIP6) воспроизводить осадки показал сильные различия между модельными расчетами и данными натурных измерений в разных географических регионах и климатических зонах мира [10, 14, 15]. В частности, почти все численные модели переоценивают глобальные месячные осадки над сушей, за исключением региона Юго-Восточной Азии и тропических широт, где модели, наоборот, их недооценивают.

Сезонный цикл атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем, изучен достаточно хорошо (см., например, [3–5, 8] и др.). В этих работах показано, что наибольшее количество осадков в указанном регионе выпадает в осенне-зимний период (с сентября по февраль). Среднегодовой максимум атмосферных осадков отмечается в декабре. Наименьшее количество осадков выпадает в весенне–летний период.

В данной работе описываются результаты сравнения сезонного хода атмосферных осадков над Черным морем по данным расчетов, полученных с помощью численных моделей, входящих в проект CMIP6, с данными атмосферного реанализа. В нашем случае использовались данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Данные указанного реанализа верифицированы авторами статьи с помощью данных инструментальных наблюдений за осадками в Северном Крыму в работе [7].

Использование данных реанализа, усваивающего натурные и дистанционные наблюдения и с достаточной степенью точности описывающего погодноклиматические условия прошлых десятилетий, позволяет, с определенными ограничениями, сделать выводы о качестве воспроизведения сезонного хода осадков, выпадающих над Черным морем, по данным глобальных климатических моделей из проекта CMIP6 в исторический период.

## Данные и методы

Использованы данные 36 численных моделей, которые входят в международный проект сравнения моделей климата CMIP6 [11]. Выбор этих моделей обусловлен наличием данных о месячных величинах атмосферных осадков, выраженных в мм, в исторический период (всего 173 реализации). Список используемых в работе моделей и их основные характеристики приведены в таблице. Данные получены из источника открытого доступа (<https://climexp.knmi.nl/>). Горизонтальное разрешение численных моделей изменяется от  $0,5\text{--}0,7^\circ$  (модели CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3 и др.) до  $2,5\text{--}2,8^\circ$  (модели CanESM5, MIROC-ES2L и др.). Для сравнения с модельными результатами привлекались данные реанализа ERA5 с пространственным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  [13]. Использовались данные численных экспериментов и реанализа за исторический период 1959–2022 гг. для региона, охватывающего всю акваторию Черного моря ( $40\text{--}48^\circ$  с. ш.,  $26\text{--}42^\circ$  в. д.).

По исходным данным о количестве атмосферных осадков для каждой реализации всех численных моделей и реанализа ERA5 рассчитаны медиана и ее доверительный интервал на уровне 99 % для каждого месяца и среднегодовые величины в рассматриваемый период. Анализ медианных значений количества осадков обусловлен тем, что величины атмосферных осадков характеризуют случайный процесс, существенно отличный от простого гауссовского процесса [6].

## Результаты

По данным реанализа ERA5 медиана среднегодовых величин месячных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря в исследуемый период, находится в диапазоне от 39,9 до 45,1 мм на доверительном уровне 99 %. Сезонный цикл осадков характеризуется минимумом в июле и максимумом в декабре. Доверительный интервал медианы осадков на уровне 99 % в эти месяцы составляет 14,9–30,7 и 58,2–74,9 мм соответственно. Количество осадков, выпадающих в холодный период года, в 2,5–3 раза превышает количество осадков, выпадающих в теплый период. В целом, это согласуется с известными представлениями о внутригодовом распределении осадков в исследуемом регионе [3, 4, 7, 8].

Перейдем к описанию качества воспроизведения сезонного хода и климатической величины месячных атмосферных осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6 в рассматриваемый период.

Климатические модели ACCESS-CM2 и ACCESS-ESM1-5 некорректно воспроизводят внутригодовой ход медианы осадков над Черным морем (рис. 1а). По данным этих моделей сезонная изменчивость осадков характеризуется выраженным максимумом в мае (в диапазоне 75–90 мм по разным реализациям) и минимумом в августе (8–17 мм), что никак не согласуется с данными реанализа ERA5 (24 и 22 мм соответственно).

**Таблица.** Используемые модели CMIP6, их основные характеристики и количество реализаций

**Table.** CMIP6 models used, their main parameters and number of the runs

| № п/п | Модели             | Страна         | Шаг по долготе, град. | Шаг по широте, град. | Колич. реализаций |
|-------|--------------------|----------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 1     | ACCESS-CM2         | Австралия      | 1,875                 | 1,25                 | 3                 |
| 2     | ACCESS-ESM1-5      | Австралия      | 1,875                 | 1,25                 | 3                 |
| 3     | AWI-CM-1-1-MR      | Германия       | 0,937                 | 0,935                | 1                 |
| 4     | BCC-CSM2-MR        | Китай          | 1,125                 | 1,121                | 1                 |
| 5     | CAMS-CSM1-0        | Китай          | 1,125                 | 1,121                | 2                 |
| 6     | CanESM5 p1         | Канада         | 2,813                 | 2,791                | 25                |
| 7     | CanESM5 p2         | Канада         | 2,813                 | 2,791                | 25                |
| 8     | CanESM5-CanOE p2   | Канада         | 2,813                 | 2,791                | 3                 |
| 9     | CESM2              | США            | 1,25                  | 0,942                | 6                 |
| 10    | CESM2-WACCM        | США            | 1,25                  | 0,942                | 3                 |
| 11    | CMCC-CM2-SR5       | Италия         | 1,25                  | 0,942                | 1                 |
| 12    | CNRM-CM6-1 f2      | Франция        | 1,406                 | 1,401                | 6                 |
| 13    | CNRM-CM6-1-HR f2   | Франция        | 0,5                   | 0,5                  | 1                 |
| 14    | CNRM-ESM2-1 f2     | Франция        | 1,406                 | 1,401                | 5                 |
| 15    | EC-Earth3          | Евросоюз       | 0,703                 | 0,702                | 21                |
| 16    | EC-Earth3-Veg      | Евросоюз       | 0,703                 | 0,702                | 5                 |
| 17    | FGOALS-f3-L        | Китай          | 1,25                  | 1                    | 1                 |
| 18    | FGOALS-g3          | Китай          | 2                     | 2,025                | 4                 |
| 19    | FIO-ESM-2-0        | Китай          | 1,25                  | 0,942                | 3                 |
| 20    | GFDL-CM4           | США            | 1,25                  | 1                    | 1                 |
| 21    | GFDL-ESM4          | США            | 1,25                  | 1                    | 3                 |
| 22    | GISS-E2-1-G p3     | США            | 2,5                   | 2                    | 5                 |
| 23    | HadGEM3-GC31-LL f3 | Великобритания | 1,875                 | 1,25                 | 1                 |
| 24    | INM-CM4-8          | Россия         | 2                     | 1,5                  | 1                 |
| 25    | INM-CM5-0          | Россия         | 2                     | 1,5                  | 1                 |
| 26    | IPSL-CM6A-LR       | Франция        | 2,5                   | 1,268                | 11                |
| 27    | KACE-1-0-G         | Южная Корея    | 1,875                 | 1,25                 | 3                 |
| 28    | MIROC6             | Япония         | 1,406                 | 1,401                | 3                 |
| 29    | MIROC-ES2L f2      | Япония         | 2,813                 | 2,791                | 1                 |
| 30    | MPI-ESM1-2-HR      | Германия       | 0,938                 | 0,935                | 2                 |
| 31    | MPI-ESM1-2-LR      | Германия       | 1,875                 | 1,865                | 10                |
| 32    | MRI-ESM2-0         | Япония         | 1,125                 | 1,121                | 1                 |
| 33    | NESM3              | Китай          | 1,875                 | 1,865                | 2                 |
| 34    | NorESM2-LM         | Норвегия       | 2,5                   | 1,895                | 3                 |
| 35    | NorESM2-MM         | Норвегия       | 1,25                  | 0,942                | 1                 |
| 36    | UKESM1-0-LL f2     | Великобритания | 1,875                 | 1,25                 | 5                 |

Значения медианы осадков с октября по февраль находятся в пределах 99 % доверительного интервала медианы, за исключением двух реализаций в декабре. Среднегодовые величины месячных модельных осадков значимо завышены (на 99 % доверительном уровне).

Внутригодовой ход медианных осадков по данным других климатических моделей в целом описывает наблюдаемую тенденцию увеличения осадков зимой и их уменьшения летом. Однако количественное соответствие между результатами расчетов по большинству прогностических моделей и данными реанализа отсутствует. Покажем это путем прямого сравнения соответствующих величин медианных осадков.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели AWI-CM-1-1-MR характеризуется максимумом зимой и минимумом летом (рис. 1а). Но по данным этой модели величины медианы осадков в январе завышены (74 мм), а с мая по октябрь занижены (5 мм) по сравнению с величинами медианы осадков, рассчитанными по данным реанализа ERA5. Хорошее согласие величин медианы осадков с данными реанализа отмечается только в ноябре и декабре. В целом, описанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели BCC-CSM2-MR также характеризуется зимним максимумом и летним минимумом (рис. 1а). При этом по данным этой модели величины медианы осадков завышены с октября по январь и занижены с июня по август. С февраля по май отмечается хорошее согласие средних величин медианы осадков с данными реанализа. Указанное распределение величин медианы осадков в сезонном ходе приводит к совпадению диапазона медианы среднегодовых величин месячных осадков, рассчитанных по данным этой модели и с использованием результатов реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CAMS-CSM1-0 в принципе описывает и зимний максимум, и летний минимум (рис. 1а). Причем по данным этой модели величины медианы осадков с октября по апрель находятся в пределах доверительного интервала медианы осадков, оцененного по данным реанализа, но с мая по сентябрь они существенно занижены. Согласно результатам моделирования, количество осадков, выпадающих в июле, составляет менее 5 мм, а по данным реанализа – более 15 мм. Полученный в модельных расчетах внутригодовой ход величин медианы месячных осадков приводит к значимому занижению их среднегодовых значений.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатических моделей CanESM5-p1 и CanESM5-p2 также описывает зимний максимум и летний минимум (рис. 1д–з). Причем по большинству реализаций обеих версий этой модели отмечается хорошее согласие средних величин медианы осадков с данными реанализа с октября по март. Исключение составляют реализация *ens23* для версии модели *p1* в декабре (завышает количество осадков), реализация *ens23* для версии модели *p2* в декабре (занижает) и реализация *ens15* для версии модели *p2* в феврале (занижает).

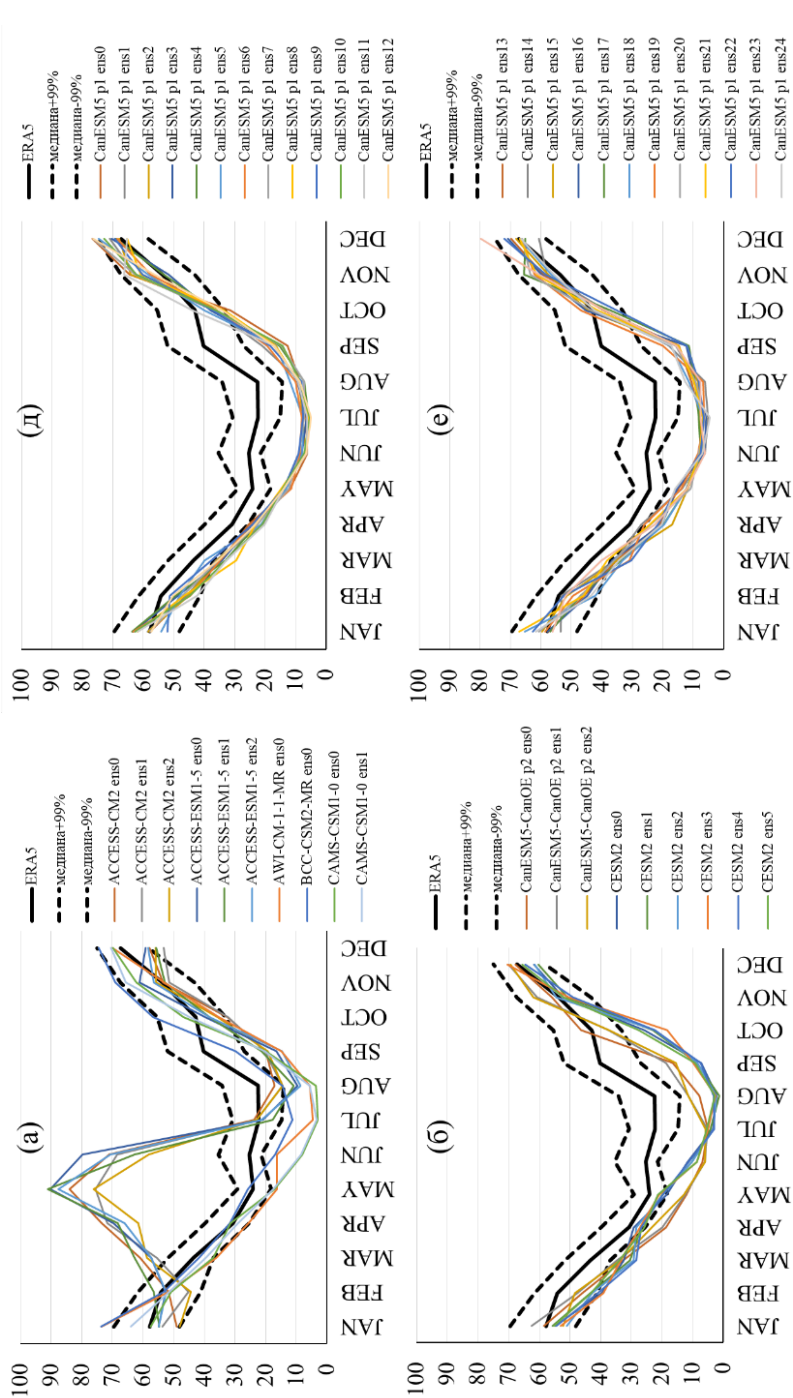


**Рис. 1.** Сезонный цикл месячных осадков (мм), выпадающих над Черным морем, по данным атмосферного реанализа ERA5 (сплошная черная линия) и реализаций численных моделей проекта CMIP6 (тонкие цветные линии). Пунктирными черными линиями показан доверительный интервал для медианы осадков по данным ERA5 на уровне 99 %.

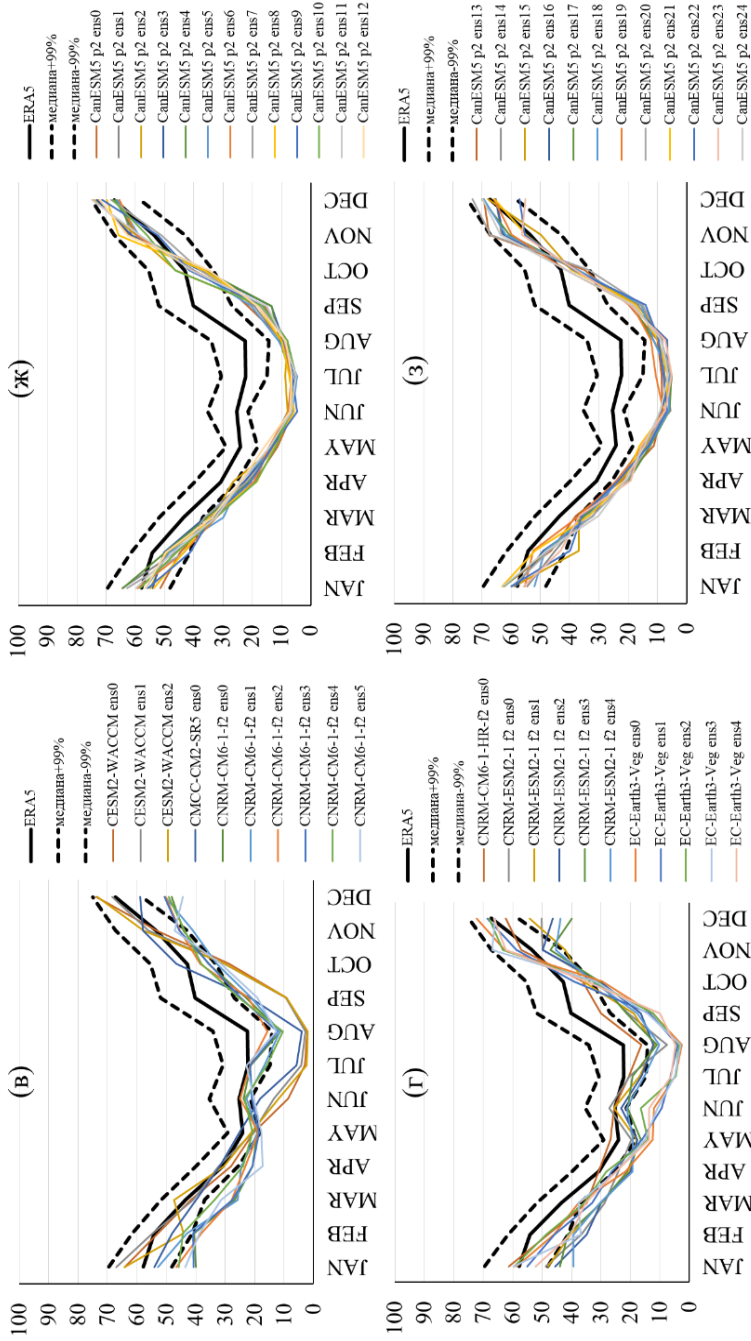


**Fig. 1.** Seasonal cycle of monthly precipitation (mm) over the Black Sea based on ERA5 atmospheric reanalysis data (solid black line) and CMIP6 numerical model implementations (thin colored lines). The dashed black lines show the confidence interval for the median precipitation based on ERA5 data at the 99 % level.

Вместе с тем реализации этой модели занижают величины медианы осадков с апреля по сентябрь. Согласно данным большинства реализаций этих моделей, количество осадков, выпадающих в июне, июле и августе составляет менее 10 мм. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков для всех реализаций.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CanESM5-CanOE p2 характеризуется хорошим согласием средних величин медианы осадков с данными реанализа с октября по февраль, но все реализации этой модели занижают величины медианы осадков с марта по сентябрь (рис. 1б). По данным этой модели количество осадков, выпадающих в июне и июле, составляет около 5 мм. Указанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков для всех реализаций.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным всех реализаций климатической модели CESM2 находится в пределах 99 % доверительного интервала медианы осадков, оцененного по данным реанализа с ноября по январь и в апреле–мае. В феврале величины медианы осадков для большинства реализаций этой модели занижены. В марте и с июня по октябрь величины медианы осадков занижены для всех реализаций модели CESM2. Согласно данным этой модели, количество осадков, выпадающих в июле–августе, составляет менее 5 мм, что более чем в 3 раза меньше, чем по данным реанализа (рис. 1б). Описанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков, оцененных по данным модельных расчетов.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CESM2-WACCM неплохо соответствует данным реанализа с ноября по май (рис. 1в). Вместе с тем с июня по октябрь величины медианы осадков занижены для всех реализаций этой модели. Согласно модельным данным количество осадков, выпадающих в июле–августе, составляет менее 3 мм, а по данным реанализа – оно более чем в 5 раз превышает эту величину. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели CMCC-CM2-SR5 и результатам реанализа совпадает с октября по май в пределах 99 % доверительного интервала (рис. 1в). С июня по сентябрь модельные величины медианы осадков занижены. Причем количество осадков, выпадающих в июле–августе, по данным модели CMCC-CM2-SR5 более чем в 3 раза занижает величину осадков, рассчитанных для этих месяцев по данным реанализа. Указанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к некоторому занижению среднегодовых величин месячных осадков, но оно незначимо на доверительном уровне 99 %.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CNRM-CM6-1-f2 характеризуется минимумом в августе и максимумом в январе (рис. 1в). Все реализации этой модели, кроме реализации *ens1*, занижают величину медианы осадков в январе, марте, апреле, сентябре и декабре. В остальные месяцы величины медианы осадков находятся в интервале от медианного значения до нижней границы 99 % доверительного уровня. Обнаруженное распределение величин медианы осадков в сезонном ходе приводит к совпадению среднегодовых величин месячных осадков по данным этой модели и реанализа. Эту климатическую модель можно считать удовлетворительно воспроизводящей внутригодовой ход атмосферных осадков над акваторией Черного моря, если не учитывать значимого занижения величин медианы осадков в отдельные месяцы.

В целом, внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели CNRM-CM6-1-HR f2 находится в хорошем соответствии с сезонным ходом медианы осадков по данным ERA5 (рис. 1г). Исключение составляет величина медианы осадков в марте, которая по данным этой модели значимо занижена (34,8 мм) по сравнению с реанализом (43,5 мм). Среднегодовые величины месячных осадков также хорошо согласуются с данными реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CNRM-ESM2-1 f2 качественно согласуется с внутригодовым ходом медианы осадков по данным ERA5, но модельные величины медианы осадков занижены (рис. 1г). Все реализации этой модели значимо занижают медиану осадков в марте, апреле, августе, сентябре, октябре и декабре. Величина медианы осадков по реализациям этой модели в июне (кроме *ens4*) и ноябре (кроме *ens1*) находится в пределах 99 % доверительного уровня, оцененного по данным реанализа. Разброс медианы осадков по реализациям этой модели составляет от 39,9 мм (*ens3*) до 54,4 мм (*ens1*). При этом величина медианы осадков в декабре по данным ERA5 равна 67,4 мм. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатических моделей EC-Earth3 (рис. 2а, б) и EC-Earth3-Veg (рис. 1г) характеризуется минимумом в августе и максимумом в декабре. Величина медианы осадков с мая по сентябрь значимо занижена во всех реализациях этих моделей. В июле–августе эти величины составляют менее 5 мм. Величина медианы осадков по всем реализациям модели EC-Earth3 в январе (кроме *ens0*) и декабре соответствует данным реанализа (в пределах 99 % доверительного уровня). С февраля по апрель количество реализаций, которые занижают величину медианы осадков, увеличивается.

Величина медианы осадков в ноябре по реализациям *ens3* и *ens4* этой модели завышена, а с ноября по январь по всем реализациям модели EC-Earth3-Veg находится в пределах 99 % доверительного уровня, рассчитанного по данным реанализа.

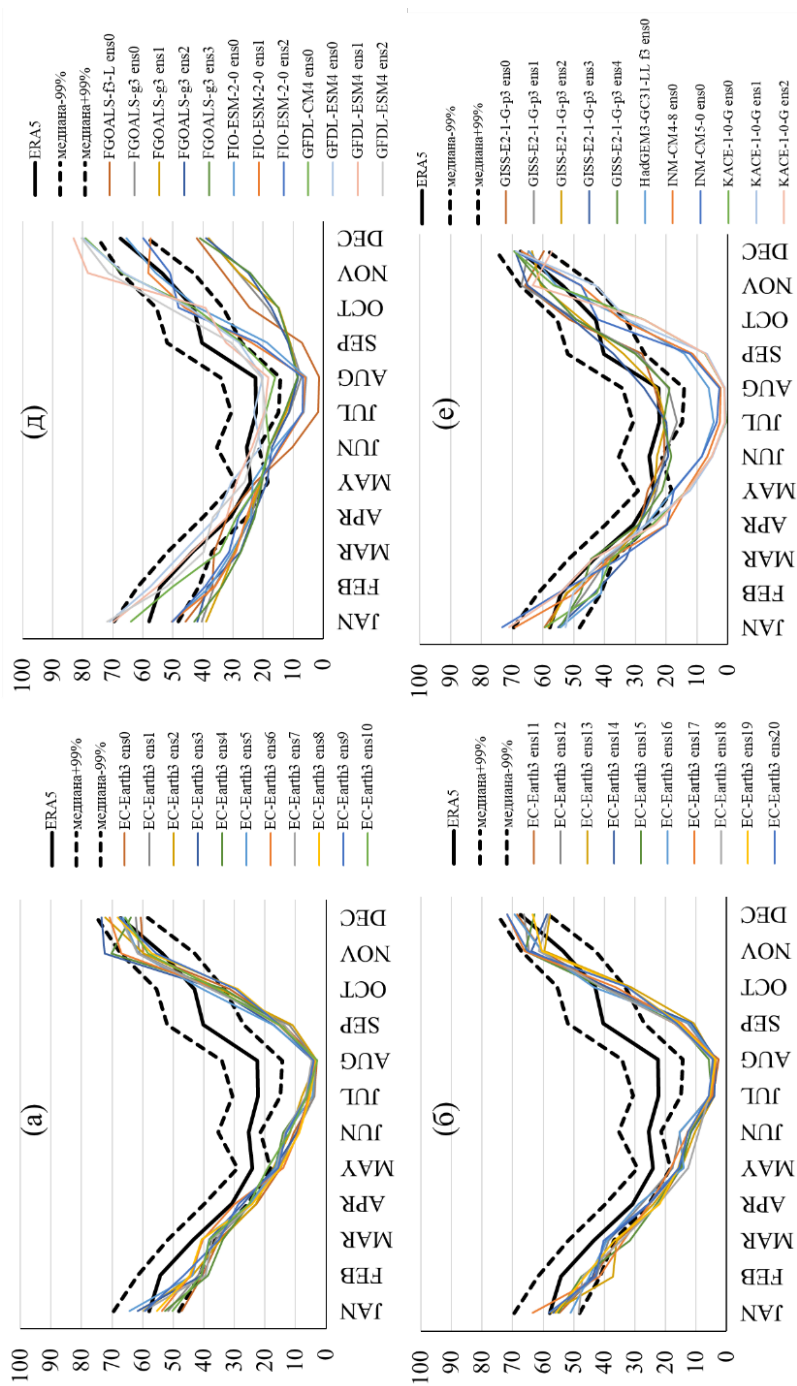


**Рис. 2.** Сезонный цикл месячных осадков (мм), выпадающих над Черным морем, по данным атмосферного реанализа ERA5 (сплошная черная линия) и реализаций численных моделей проекта SMIP6 (тонкие цветные линии). Пунктирными черными линиями показан доверительный интервал для медианы осадков по данным ERA5 на уровне 99 %.

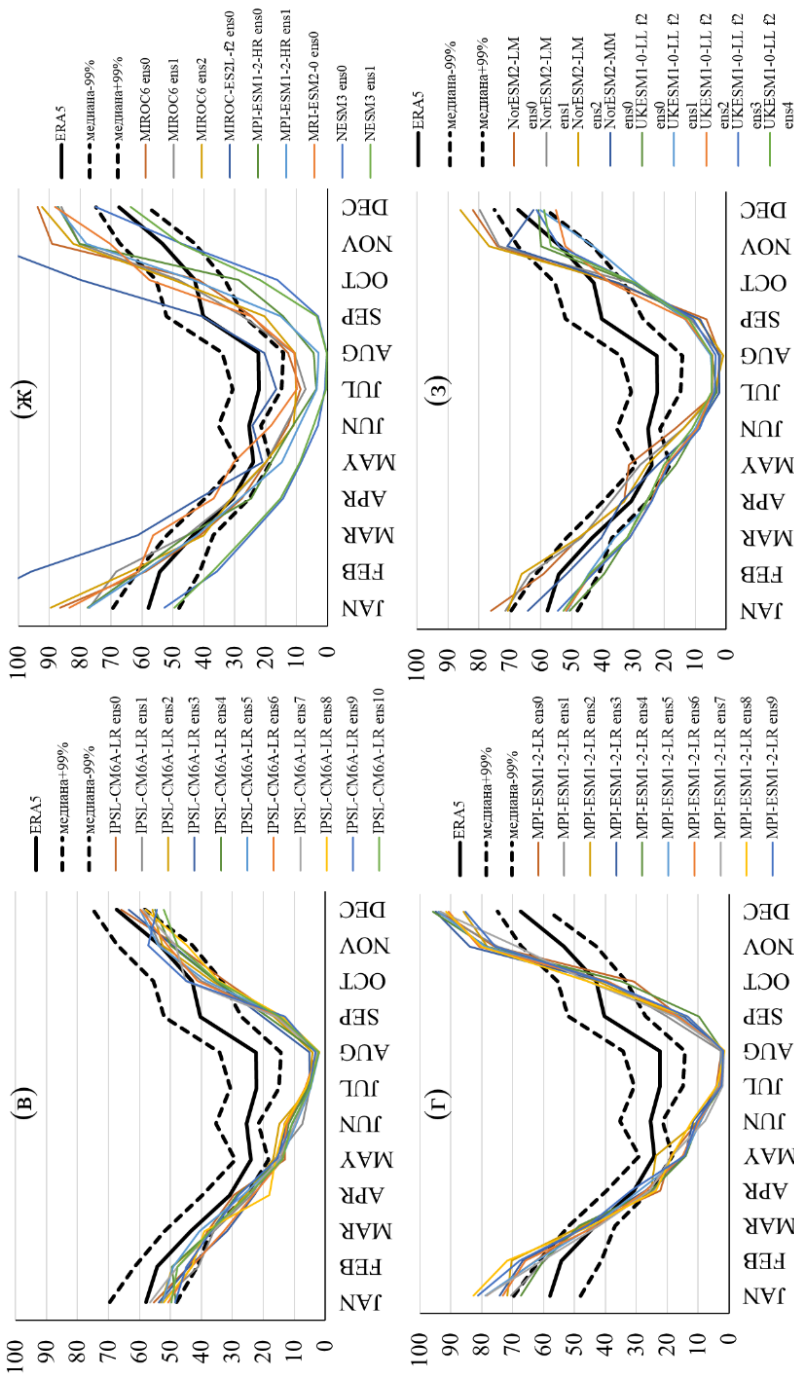


**Fig. 2.** Seasonal cycle of monthly precipitation (mm) over the Black Sea based on ERA5 atmospheric reanalysis data (solid black line) and CMIP6 numerical model implementations (thin colored lines). The dashed black lines show the confidence interval for the median precipitation based on ERA5 data at the 99 % level.

Указанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков во всех реализациях этой модели.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели FGOALS-f3-L характеризуется минимумом в июле–августе (менее 2 мм) и максимумом в январе (рис. 2д). Величина медианы осадков занижена во все месяцы, кроме апреля (32 мм) и мая (22,5 мм). Среднегодовые величины месячных осадков также значимо занижены по сравнению с данными реанализа.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели FGOALS-g3 указывает на минимум в августе и максимум в декабре–январе (около 40 мм) (рис. 2д). Величина медианы осадков значимо занижена во все месяцы, кроме мая. Сравнение модельных результатов с данными реанализа показывает, что среднегодовые величины месячных осадков также некорректно воспроизводятся по всем реализациям этой модели.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели FIO-ESM-2-0 характеризуется минимумом в июле–августе и максимумом в декабре (рис. 2д). Величина медианы осадков по всем реализациям этой модели с октября по январь, в апреле (кроме *ens0*) и мае находится в пределах 99 % доверительного уровня, оцененного по данным реанализа. При этом медиана среднегодовых величин месячных осадков значимо занижена во всех реализациях этой модели.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели GFDL-CM4 указывает на минимум в августе и максимум в декабре (рис. 2д). По сравнению с данными реанализа величина медианы осадков занижена в марте и июне и завышена в декабре (79,2 мм). При этом среднегодовые величины месячных модельных осадков хорошо согласуются с данными реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели GFDL-ESM4 характеризуется летним минимумом и зимним максимумом (рис. 2д). При этом величины медианы осадков завышены в декабре (79,9–81,1 мм) и январе (69,8–72,0 мм) по сравнению с данными реанализа (67,4 и 57,9 мм в декабре и январе соответственно). В летние месяцы величины осадков по данным этой модели неплохо согласуются с данными реанализа. Обнаруженное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к небольшому завышению среднегодовых величин месячных осадков во всех реализациях этой модели, но оно статистически незначимо.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели GISS-E2-1-G r3 также правильно описывает понижение величин осадков летом и их повышение зимой (рис. 2е). При этом медиана осадков занижена в марте (по реализации *ens3*) и июне (по реализациям *ens3* и *ens4*). Величины медианы осадков в остальные месяцы по всем реализациям этой модели находятся в пределах 99 % доверительного уровня,

рассчитанного по данным реанализа. В целом среднегодовые величины месячных модельных осадков и осадков, полученных по данным реанализа, неплохо соответствуют друг другу.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели HadGEM3-GC31-LL f3 на качественном уровне правильно описывает летнее понижение и зимнее повышение количества осадков (рис. 2е). При этом величины медианы модельных месячных осадков значимо занижены с мая по октябрь, а также в среднем за год по сравнению с данными реанализа.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатических моделей INM-CM4-8 и INM-CM5-0 также характеризуется летним минимумом и зимним максимумом (рис. 2е). При этом модель INM-CM4-8 занижает величины медианы осадков с апреля по сентябрь, а модель INM-CM5-0 завышает величины медианы осадков в январе и занижает с марта по сентябрь. В зимние месяцы величины медианы осадков по данным этих моделей находятся в удовлетворительном согласии с данными реанализа. В целом, отмечается значимое занижение среднегодовых величин месячных осадков по данным этих моделей по сравнению с данными реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели IPSL-CM6A-LR правильно описывается только для части холодного периода года (рис. 2в). Величины медианы осадков в январе, феврале и ноябре по всем реализациям этой модели находятся в пределах 99 % доверительного интервала, рассчитанного по данным реанализа. С мая по сентябрь, а также в среднем за год величины медианы месячных осадков значимо занижены по сравнению с данными реанализа.

Во внутригодовом ходе медианы осадков по данным климатической модели KACE-1-0-G количество осадков значимо занижено с апреля по октябрь, а в июле и августе вообще отмечаются близкие к нулевым величины медианы осадков (рис. 2е). В январе величина медианы осадков по реализации *ens2* завышена. Описанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин модельных месячных осадков по сравнению с данными реанализа.

В сезонном ходе медианы осадков по данным климатической модели MIROC6 количество осадков значимо завышено с ноября по февраль (рис. 2ж). С июня по сентябрь величины медианы осадков, напротив, значимо занижены по сравнению с данными реанализа. С марта по май и в октябре величины медианы осадков по всем реализациям этой модели соответствуют данным реанализа (в пределах 99 % доверительного уровня). Завышение величины медианы месячных осадков зимой и занижение летом приводит к хорошему согласию среднегодовых величин осадков по данным этой модели с величинами осадков, полученными по данным реанализа.

Внутригодовой ход осадков по данным климатической модели MIROC-ES2L f2 характеризуется существенным завышением величины медианы осадков в период с октября по апрель (рис. 2ж). Максимум

осадков (128 мм) отмечается в декабре, что почти в 2 раза превышает осадки, полученные по данным реанализа. С мая по сентябрь величины медианы осадков по данным этой модели и реанализа хорошо совпадают. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому завышению среднегодовых величин месячных осадков по данным этой модели.

Сезонный ход осадков по данным климатической модели MPI-ESM1-2-HR характеризуется значимым завышением величины медианы осадков в период с ноября по январь по сравнению с данными реанализа (рис. 2ж). С мая по сентябрь эти величины, напротив, значимо занижены, причем в июле–августе они составляют менее 5 мм. Величины медианы мартовских осадков, оцененные по данным модели и реанализа, хорошо согласованы, так же как и среднегодовые величины осадков.

Внутригодовой ход осадков по данным климатической модели MPI-ESM1-2-LR завышает медиану осадков в период с ноября по февраль (за исключением реализации *ens4* в январе и феврале, рис. 2г). С мая по сентябрь величины медианы модельных осадков значимо занижены, за исключением реализации *ens2* в мае. Минимум медианы осадков отмечается в августе, когда ее величина составляет менее 3 мм. В результате среднегодовые величины месячных осадков по данным всех реализаций рассматриваемой модели соответствуют величинам осадков, полученным по данным реанализа ERA5.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели MRI-ESM2-0 характеризуется минимумом в июле–августе (10 мм) и максимумом в декабре–январе (83–88 мм) (рис. 2ж). С ноября по январь, в марте и мае величины медианы осадков значимо завышены, а с июня по сентябрь эти величины, напротив, занижены. Так же, как и в случае с моделью MPI-ESM1-2-LR, среднегодовые величины модельных месячных осадков соответствуют величинам осадков по данным ERA5.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели NESM3 находится в неплохом соответствии с данными реанализа в период с ноября по январь (рис. 2ж). В остальные месяцы модельные величины медианы осадков существенно занижены. В июле и августе величины медианы осадков по данным этой модели вообще близки к нулю. Описанное внутригодовое распределение величин медианы осадков приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков по данным рассматриваемой модели.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели NorESM2-LM верно указывает на летнее понижение и зимнее повышение количества выпадающих осадков (рис. 2з). Но при этом с ноября по февраль величины медианы осадков значимо завышены, а с июня по сентябрь эти величины, наоборот, занижены. В марте–апреле величины медианы модельных осадков находятся в пределах 99 % доверительного уровня, оцененного по данным реанализа. Такой сезонный ход величины медианы

месячных осадков приводит к согласию среднегодовых величин модельных осадков с величинами осадков, рассчитанными по данным ERA5. По данным климатической модели NorESM2-MM величины медианы осадков соответствуют данным реанализа в октябре и с декабря по май (рис. 2з). В ноябре модельные величины значимо завышены, а в период с июня по сентябрь, напротив, значимо занижены. Причем в июле–августе эти величины составляют менее 3 мм. В результате по данным этой модели медиана среднегодовых величин месячных осадков значимо занижена.

Наконец, внутригодовой ход осадков по данным климатической модели UKESM1-0-LL f2 характеризуется величинами медианы в окрестности нижней границы 99 % доверительного уровня медианы осадков, оцененного по данным реанализа в период с января по май (рис. 2з). С июня по октябрь (за исключением реализации *ens2* в октябре) величины медианы осадков по данным этой модели значимо занижены. С ноября по декабрь, за исключением реализаций *ens1* в ноябре и *ens2* в декабре, величины медианы осадков соответствуют данным реанализа. Полученный внутригодовой ход величин медианных осадков приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков по данным этой модели.

## Выводы

Проведенный анализ позволил систематизировать численные модели проекта CMIP6 по их способности воспроизводить сезонный ход атмосферных осадков над Черным морем в исторический период (1959–2022 гг.).

Выявлены следующие группы моделей.

Модели, в принципе некорректно воспроизводящие внутригодовой цикл осадков: ACCESS-CM2 и ACCESS-ESM1-5.

Модели, удовлетворительно воспроизводящие величины осадков в зимний сезон и занижающие величины осадков летом, что приводит к занижению среднегодовых величин месячных осадков: AWI-CM-1-1-MR, CAMS-CSM1-0, CanESM5-p1 и CanESM5-p2, CanESM5-CanOE p2, CESM2, CESM2-WACCM, CMCC-CM2-SR5, EC-Earth3 и EC-Earth3-Veg, FIO-ESM-2-0, HadGEM3-GC31-LL f3, INM-CM4-8 и INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, KACE-1-0-G, NESM3, NorESM2-MM и UKESM1-0-LL f2.

Модели, завышающие величины осадков в зимний сезон и занижающие величины осадков летом, что приводит к удовлетворительному воспроизведению среднегодовых величин месячных осадков: BCC-CSM2-MR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 и NorESM2-LM.

Модели, занижающие величины осадков и в зимний, и в летний сезоны, что приводит к существенному занижению среднегодовых величин месячных осадков: CNRM-ESM2-1 f2, FGOALS-f3-L и FGOALS-g3.

Модель, завышающая величины осадков в зимний сезон и удовлетворительно воспроизводящая величины осадков летом, что приводит к завышению среднегодовых величин месячных осадков: MIROC-ES2L f2.

Модели CNRM-CM6-1 f2 и GFDL-ESM4, удовлетворительно воспроизводящие сезонный ход осадков в изучаемом регионе, но значимо занижающие или завышающие величины осадков в отдельные месяцы.

Климатические модели CNRM-CM6-1-HR f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G р3 хорошо воспроизводят внутригодовой цикл осадков над Черным морем. Как следствие, в хорошем согласии с данными реанализа ERA5 находятся и среднегодовые величины месячных региональных осадков, рассчитанные по данным этих моделей. Конечно, этот вывод касается моделирования осадков, осредненных по всему рассматриваемому региону. Для того, чтобы адекватно описывать осадки, выпадающие в окрестности орографических особенностей подстилающей поверхности с пространственными масштабами порядка 100 км (типа Крымских гор) и более мелкомасштабных неоднородностей, необходимо применять даунскейлинг.

Таким образом, большинство численных моделей проекта CMIP6 неудовлетворительно воспроизводит климатический сезонный ход и среднегодовые величины месячных атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем. В целом, результаты моделирования зимних осадков лучше согласуются с данными реанализа ERA5, чем летних. Это свидетельствует о неадекватной параметризации конвективных осадков в большинстве моделей проекта CMIP6. Поэтому можно заключить, что использование мультимодельного осреднения по всему массиву моделей CMIP6 (без корректировки результатов моделирования) может давать неверный результат при анализе сезонного цикла и среднегодовых величин атмосферных осадков в рассматриваемом регионе. Самый простой способ избежать искусственного завышения или занижения моделируемых осадков, а также добиться уменьшения их разброса, заключается в использовании только тех моделей, которые адекватно отражают известные из наблюдений региональные климатические особенности режима осадков для контрольного периода. Аналогичный подход использован в работе [9] при анализе данных сценарных расчетов, выполненных в рамках проекта CMIP5.

Необходимо отметить, что приведенный выше вывод о неудовлетворительной параметризации конвективных осадков в большинстве моделей проекта CMIP6, основанный на результатах анализа расчетов количества региональных осадков, подтверждает один из основных выводов работы авторов [7] относительно качества моделирования осадков над Черным морем. В этой работе на основании анализа данных по расчету количества региональных осадков, выполненному в рамках проекта CORDEX с входными данными из ансамбля реализаций глобальных климатических моделей проекта CMIP5, было показано, что параметризация осадков конвективного типа в подавляющем большинстве моделей неудовлетворительна и нуждается в совершенствовании. К сожалению, несмотря на развитие глобальных климатических моделей, в целом приводящее к последовательному улучшению качества воспроизведения климатических характеристик, осадки конвективного типа над Черным морем все еще моделируются недостаточно качественно.

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

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

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

### Список литературы

1. Алешина М.А., Семенов В.А. Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей СМIP6 // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8, № 4. С. 424–440. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-4-424-440
2. Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Корнева И.А. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 29–45.
3. Белокопытов В.Н. Климатические изменения гидрологического режима Черного моря: Дис. ... докт. геогр. наук. Севастополь: МГИ РАН, 2017. 377 с.
4. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 430 с.
5. Ефимов В.В., Белокопытов В.Н., Анисимов А.Е. Оценка составляющих водного баланса Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 12. С. 69–76.
6. Ефимов В.В., Шакалова Е.С. О формировании атмосферных сезонных осадков в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 4. С. 43–51.
7. Полонский А.Б., Сухонос П.А. Расчет климатических характеристик осадков над Черным морем по данным региональных климатических моделей // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023. № 3 (389). С. 59–74. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-3-59-74
8. Репетин Л.Н., Долотов В.В., Липченко М.М. Пространственно-временная и климатическая изменчивость атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон*. 2006. Т. 14. С. 462–476.
9. Basharin D., Polonsky A., Stankunavicius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs // *J. Water Clim. Change*. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 103–113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081
10. Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblas-Reyes F.J. How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? // *Geophys. Res. Lett.* 2023. Vol. 50, no. 14. P. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466
11. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9, no. 5. P. 1937–1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
12. Eyring V., Gillett N.P., Achuta Rao K.M., Barimalala R., Barreiro Parrillo M., Bellouin N., Cassou C., Durack P.J., Kosaka Y., McGregor S., Min S., Morgenstern O., Sun Y. Human Influence on the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, P. 423–552. DOI: 10.1017/9781009157896.005
13. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis

M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146, no. 730. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803

14. Li Z., Liu T., Huang Y., Peng J., Ling Y. Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land // *Earth's Future*. 2022. Vol. 10, no. 8. P. e2021EF002500. DOI: 10.1029/2021EF002500

15. Yazdandoost F., Moradian S., Izadi A., Aghakouchak A. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison // *Atmospheric Res.* 2021. Vol. 250. P. 105369. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105369

## References

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

2. Bardin M.Y., Ran'kova E.Y., Platova T.V., Samokhina O.F., Korneva I.A. Modern surface climate change as inferred from routine climate monitoring data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 317–329 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373920050027

3. Belokopytov V.N. Klimaticheskiye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Chernogo morya: Diss. doct. geogr. nauk [Climatic changes in the hydrological regime of the Black Sea]: Doct. geogr. sci. thesis, Sevastopol: MGI, 2017, 377 p. [in Russ.].

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

5. Efimov V.V., Belokopytov V.N., Anisimov A.E. Estimation of water balance components in the Black Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, pp. 769–774 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373912110118

6. Efimov V.V., Shakalova E.S. On the formation of atmospheric seasonal precipitation in the Black Sea region. *Phys. Oceanogr.*, 2008, vol. 18, pp. 204–211. DOI: 10.1007/s11110-008-9022-6.

7. Polonsky A.B., Sukhonos P.A. Raschot klimaticheskikh kharakteristik osadkov nad Chornym morem po dannym regional'nykh klimaticheskikh modeley [Calculation of climatic characteristics of precipitation over the Black Sea based on data from regional climate models]. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2023, no. 3 (389), pp. 59–74 [in Russ.]. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-3-59-74

8. Repetin L.N., Dolotov V.V., Lipchenko M.M. Prostranstvenno-vremennaya i klimaticheskaya izmenchivost' atmosferykh osadkov, vypadayushchikh na poverkhnost' Chernogo moray [Spatial-temporal and climatic variability of atmospheric precipitation falling on the surface of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon*, 2016, vol. 14, pp. 462–476 [in Russ.].

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

10. Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblas-Reyes F.J. How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? *Geophysical Research Letters*, 2023, vol. 50, no. 14. pp. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466

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

12. Eyring V., Gillett N.P., Achuta Rao K.M., Barimalala R., Barreiro Parrillo M., Bellouin N., Cassou C., Durack P.J., Kosaka Y., McGregor S., Min S., Morgenstern O., Sun Y. Human Influence on the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, pp. 423-552. DOI: 10.1017/9781009157896.005

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

14. Li Z., Liu T., Huang Y., Peng J., Ling Y. Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. *Earth's Future*, 2022, vol. 10, no. 8. pp. e2021EF002500. DOI: 10.1029/2021EF002500

15. Yazdandoost F., Moradian S., Izadi A., Aghakouchak A. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 2021, vol. 250, pp. 105369. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105369

*Поступила 22.01.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 22.01.2025; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-70-94>

УДК 551.513.7+551.582: 581.526.42(477.75)

## **Влияние крупномасштабных климатических сигналов на растительный покров на территории Крымского полуострова**

***В.С. Красовская, Е.Н. Воскресенская,  
В.Н. Маслова, А.С. Лубков***

*Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия  
veronika\_maslova@mail.ru*

Исследуется реакция растительности Крыма (лиственные, сосновые, можжевельные породы, степная яйла) на изменения дальнедействующих климатических индексов, на примере вегетационного нормализованного разностного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования за период 2000–2023 гг. Рассмотрена взаимосвязь NDVI и девяти климатических индексов в Северном полушарии с использованием коэффициента корреляции Пирсона, мультирегрессионного моделирования и композитного анализа. Обнаружено, что Североатлантическое, Восточно-Атлантическое, Арктическое и Полярное/Евразийское колебания с декабря по май объясняют 80 % изменения вегетационного индекса лесных сообществ в апреле–июне. При этом сигналы Восточно-Атлантического и Средиземноморского колебаний с января по май объясняют 59 % изменения индекса NDVI степных сообществ в апреле–июне. Вегетационный индекс всех растительных сообществ возрастает при тех фазах климатических индексов, которые сопровождаются, как правило, усилением циклонической активности. При этом NDVI лесных сообществ увеличивается при ослаблении циклонической активности в зимние месяцы, что может быть связано с более морозными условиями для сохранения твердых осадков в горах.

*Ключевые слова:* ненарушенные растительные сообщества, Черноморский регион, барические моды, предикторы биомассы, лиственные породы, сосновые породы, можжевельные породы, степная яйла

## **The impact of large-scale climate oscillations on the vegetation cover on the Crimean Peninsula**

***V.S. Krasovskaya, E.N. Voskresenskaya,  
V.N. Maslova, A.S. Lubkov***

*Institute of Natural and Technical Systems,  
Sevastopol, Russia  
veronika\_maslova@mail.ru*

The paper examines the response of Crimean vegetation (deciduous, pine, juniper species, mountain steppe yayla) to the changes in teleconnection indices using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) based on remote sensing data for the period of 2000–2023. The interrelation of the NDVI and nine Northern Hemisphere teleconnection patterns is analyzed using the Pearson's correlation coefficient, multiregression modeling, and composite analysis. It was found that 80% of variability of the vegetation index of forest species

in April–June is associated with the joint impact of the North Atlantic Oscillation, East Atlantic pattern (EA), Arctic Oscillation, and Polar/Eurasia pattern from December to May. At the same time, 59 % of variability of in the NDVI index for steppe species in April–June is explained by the EA and Mediterranean Oscillation indices from January to May. The vegetation index of all plant communities increases during the phases of teleconnection patterns that are accompanied, as a rule, by increased cyclone activity. At the same time, the NDVI of forest communities increases with a decrease in cyclone activity in the winter months, which may be due to more frosty conditions for maintaining solid precipitation in the mountains.

**Keywords:** undisturbed plant communities, Black Sea region, teleconnection indices, biomass predictors, deciduous species, pine species, juniper species, mountain steppe yayla

## Введение

Растительный покров играет важную роль в глобальном углеродном цикле, выполняя функцию поглощения углекислого газа и влияя на климатические процессы [12, 27]. Изменения в экосистемах могут быть обусловлены различными факторами, включая изменения климата. Климатические условия, как на глобальном, так и на локальном уровне, оказывают значительное воздействие на динамику растительности через атмосферные процессы, а в средних широтах преимущественно посредством циклонической активности. Одними из ключевых факторов, определяющих эти изменения, являются глобальные климатические процессы, или процессы в системе океан – атмосфера. Учитывая очевидную связь между состоянием растительного покрова и атмосферными процессами [17], можно считать, что, помимо ботанических и местных факторов окружающей среды, на развитие растительности по всей планете оказывают влияние крупномасштабные дальнедействующие процессы через взаимодействие центров действия атмосферы (ЦДА) и изменение направления и интенсивности шторм-треков.

Много научных исследований было посвящено этой проблематике в приложении к различным регионам мира [18]. В частности, в [20] обнаружено, что теплые явления Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) или положительные фазы Североатлантического колебания (САК) способствовали росту растительности в степных экосистемах Евразии в результате повышения температуры и увеличения количества осадков. Холодные события ЭНЮК или отрицательные фазы САК, сопровождающиеся похолоданием и неравномерным уменьшением количества осадков, пагубно влияли на состояние лугов Евразийской степи.

Однако, несмотря на важную роль этих процессов, влияние крупномасштабных атмосферных колебаний на растительность Крымского полуострова остается практически неизученным. Особую актуальность таким исследованиям придают уникальные климатические и географические условия региона, который расположен на пересечении средиземноморских и степных экосистем.

Целью данного исследования является изучение реакции растительности Крымского полуострова на изменения дальнедействующих климатических сигналов, проявляющихся посредством циклонической активности, на примере вегетационного нормализованного разностного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования. Понимание этих взаимосвязей имеет значение для прогнозирования долгосрочных тенденций изменения климата и его воздействия на экосистемы Крымского полуострова, что может способствовать разработке эффективных стратегий управления окружающей средой и адаптации к климатическим изменениям.

## 1. Материалы и методика исследования

### 1.1. Индекс NDVI

Индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) – это нормализованный разностный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Он представляет собой числовой показатель качества и количества растительности и зависит от того, как растения отражают и поглощают световые волны разной длины. Зеленые растения содержат пигмент хлорофилл, который хорошо отражает зелёные волны и поглощает красные волны, а клеточная структура растения отражает ближние инфракрасные волны. Таким образом, здоровое растение, в котором много хлорофилла и хорошая клеточная структура, активно поглощает красный свет и отражает ближний инфракрасный, а увядающее или больное растение – наоборот [6]. Отношение разницы инфракрасного и красного света к их сумме позволяет нормализовать индекс от -1 до 1. Таким образом, NDVI вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR и RED – спектральные измерения отражательной способности растений в красной (видимой) и ближней инфракрасной областях спектра соответственно.

Ряд исследований показал, что нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является эффективным показателем фотосинтетически активной биомассы [22]. Также было показано, что NDVI хорошо коррелирует с физическими климатическими переменными, включая количество осадков, температуру [5, 26]. Таким образом, можно считать, что NDVI отражает реакцию растительности на климатические воздействия.

Для целей настоящего исследования требовался ряд наблюдений, отвечающих условиям непрерывности, однородности и малой дискретности по времени. Для выявления межгодовых изменений в структуре изучаемого растительного покрова необходимы данные наблюдений за длительный отрезок времени, включающий 2–3 периода межгодовой изменчивости.

С учетом перечисленных условий был сделан выбор в пользу снимков, полученных со спутника «TERRA» (радиометр «MODIS») с 250-метровым пространственным и 16-дневным временным разрешением на базе продукта MODIS/Terra (MOD13Q1) (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [16]. Выбор данных MODIS обусловлен также наличием качественной системы предоставления обработанных снимков в виде растров с указанием уровня достоверности полученных значений, что позволило выбрать лишь надежные данные.

Для изучения временной изменчивости вегетационного индекса NDVI за вегетационный период (апрель–октябрь) с 2000 по 2023 год включительно всего было получено 312 спутниковых снимков на геопортале NASA (Национальное агентство по аэронавтике и исследованию космического пространства, англ. NASA – National Aeronautics and Space Administration) [24]. В качестве индикатора состояния растительных геосистем Крыма в настоящей работе для получения средних оценок вегетационного индекса был выбран трёхмесячный промежуток апрель–июнь по критерию наличия пика NDVI в мае (с 9 по 24 мая).

На этапе предварительной обработки данных дистанционного зондирования была составлена модель, в которой каждый растр, содержащий значения вегетационного индекса, был подвергнут фильтрации на основе слоя качества. Для разделения пикселей NDVI была использована европейская классификация ландшафтных комплексов CORINE Land Cover (CLC) [13] и визуальное дешифрирование. Полученные ряды были отфильтрованы по данным спутниковой классификации, включающей в себя леса и степные участки. Таким образом, была получена сеть из 9 тыс. тестовых точечных данных по Крыму с шагом  $1 \times 1$  км, включающая все насаждения площадью 6,25 га (рис. 1).

На следующем этапе проводилась агрегация данных в соответствии с выбранным периодом наблюдений. Для приведения 16-дневных наблюдений NDVI к данным с месячной дискретностью применялся метод взвешенных коэффициентов.

## 1.2. Индексы атмосферной циркуляции

Атмосферная циркуляция характеризуется наличием достаточно устойчивых областей с максимальной амплитудой низкочастотной (межгодовой – междесятилетней) изменчивости. Обычно эта изменчивость проявляется в наблюдающихся в течение определенного устойчивого периода аномалиях температурных полей и осадков, сопровождающихся смещениями основных центров действия атмосферы и интенсивности струйных течений. Такие аномалии существенно влияют на частоту, интенсивность и траектории циклонов. Типичные проявления низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции называют «дальнодействующими» низкочастотными колебаниями или крупномасштабными сигналами системы океан – атмосфера.

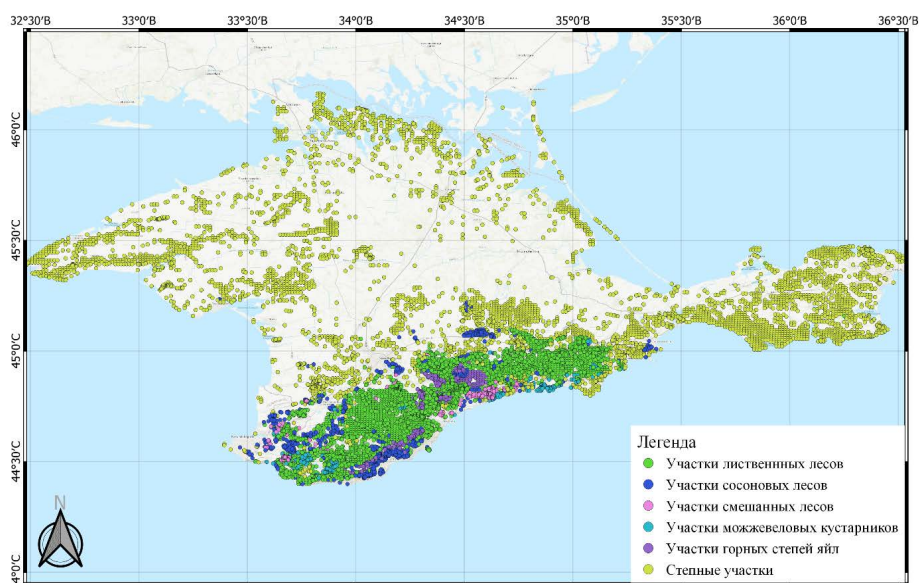


**Рис. 1.** Карта Крыма с нанесенным точечным слоем по типам растительности.

**Fig. 1.** Map of Crimea with the indication of the type of vegetation species.

Главные центры дальнего действия, влияющие на аномалии природной среды и климат Евразии, концентрируются над Североатлантическим – Европейским сектором, экваториальной и северной частями Тихого океана и Северной Америкой. В качестве меры изменчивости перечисленных сигналов системы океан – атмосфера обычно используют характеристики их интенсивности, чаще всего выражаемые как перепад давления между центрами действия атмосферы или как пространственные эмпирические моды в разложении поля давления. Временные масштабы основных мод составляют от нескольких лет до нескольких десятилетий [25].

В настоящей работе были использованы индексы следующих мод Северного полушария за период с 2000 по 2023 год:

- Североатлантическое колебание (САК) [32];
- Восточно-Атлантическое колебание (ВАК) [32];
- Колебание Восточная Атлантика/Западная Россия (ВА/ЗР) [32];
- Скандинавское колебание (СКАНД) [32];
- Полярное/Евразийское колебание (ПОЛ/ЕВР) [32];
- Колебание Тропики/Северное полушарие (ТСП) [32];
- Арктическое колебание (АК) [32];
- Средиземноморское колебание (СК) [21];
- Западно-Средиземноморское колебание (ЗСК) [23].

Расположение центров колебаний для используемых индексов приведено на рис. 2.

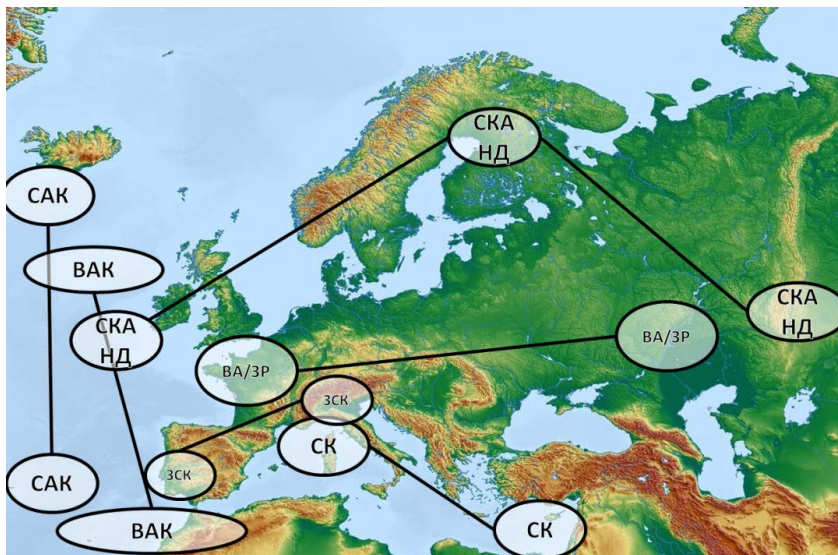


**Рис. 2.** Расположение центров действия индексов САК, ВАК, ВА/ЗР, СКАНД, СК и ЗСК.

**Fig. 2.** The location of the centers of action of the NAO, EA, EA/WR, SCAND, MO and WMO indexes.

### 1.3. Циклоническая активность

Временные ряды частоты циклонов в Черноморско-Средиземноморском регионе были получены по четырехсрочным данным реанализа NCEP/NCAR за период 1951–2017 гг. с помощью методики объективной идентификации и трекинга М.Ю. Бардина [2]. Закономерности связи климатических сигналов с циклонической активностью обобщены в монографии [3]. В работах [3, 8] исследованы особенности многолетней изменчивости временных рядов урожайности агрокультур Северного Причерноморья в связи с циклонической деятельностью и глобальными климатическими процессами межгодового-междесятилетнего масштаба.

### 1.4. Методика исследования закономерностей

Возможная связь NDVI с климатическими индексами определялась с помощью корреляционного анализа, множественной линейной регрессии и композитного анализа. Между NDVI и климатическими индексами рассчитывались коэффициенты корреляции Пирсона, для оценки значимости использовался  $t$ -критерий Стьюдента ( $t$ -статистика).

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ), определяемый по коэффициенту корреляции ( $r^2$ ), использовался для оценки доли дисперсии индекса NDVI, объясняемой корреляционной связью с индексами климатических сигналов.

Выявление совместного вклада климатических индексов в изменчивость вегетационного индекса осуществлялось по формуле на основе метода множественной линейной регрессии (МЛР):

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n, \quad (2)$$

где  $X_n$  – независимые переменные;  $Y$  – зависимая переменная;  $b_n$  – коэффициент наклона для  $X_n$ ;  $b_0$  – точка пересечения с осью  $y$ .

Смысл МЛР заключается в подборе оптимальных коэффициентов  $b$ , для которых используется минимизация с помощью суммы квадратов разностей между модельным расчетом и фактическим значением. Для МЛР применялся набор независимых переменных, отобранных на основе результатов анализа корреляции и значимости коэффициентов. Модель оптимизировалась с применением пошагового алгоритма, предложенного в [33], в результате чего выделялись те факторы, на основе которых модель наиболее успешна.

Для проверки множественной линейной регрессии можно использовать несколько подходов, которые позволяют оценить качество, надежность и статистическую значимость построенной модели. В настоящей работе были использованы метод статистики Фишера ( $F$ -статистика с  $p$ -значением – вероятностью того, что случайная величина с данным распределением Фишера превысит данное значение статистики), тест на мультиколлинеарность (фактор роста дисперсии VIF – Variance Inflation Factor) и тест Шапиро-Уилка ( $W$  с  $p$ -значением). Значение  $W$  – это статистическая оценка, которая указывает, насколько данные отклоняются от нормального распределения. Значение  $W$  варьируется от 0 до 1. Близкие к 1 значения  $W$  указывают на то, что данные близки к нормальному распределению. Уровень значимости, или  $p$ -значение, представляет собой вероятность того, что наблюдаемое отклонение от нормального распределения (или любое другое отклонение) произошло бы случайно, если бы данные действительно были нормально распределены. Высокое  $p$ -значение в тесте Шапиро – Уилка ( $>0,05$ ) указывает на то, что нет достаточных оснований для отвержения нулевой гипотезы о нормальности распределения данных. Низкое  $p$ -значение ( $\leq 0,05$ ) указывает на то, что данные значительно отклоняются от нормального распределения и нулевая гипотеза может быть отвергнута. Таким образом, тест Шапиро – Уилка позволяет оценить, насколько данные соответствуют нормальному распределению, что является важным аспектом для многих статистических методов и моделей.

На основе полученных моделей были рассчитаны значения зависимой переменной NDVI. Отклонения NDVI для каждого значения нормировались на стандартное отклонение за период 2000–2023 гг. согласно формуле:

$$I = \frac{NDVI - \overline{NDVI}}{CKO}, \quad (3)$$

где  $I$  – центрированный и нормированный индекс NDVI,  $\overline{NDVI}$  – среднее NDVI, СКО – среднеквадратическое отклонение.

Обратная нормировка и смещение являются важными шагами в процессе прогнозирования, когда используются центрированные и нормированные данные. При центрировании и нормировании зависимой переменной преобразуются ее значения в новый масштаб, где среднее значение равно нулю, а стандартное отклонение равно единице. Это часто применяется для улучшения стабильности и точности моделей, а также для интерпретации коэффициентов модели.

Однако после того, как модель сделала прогнозы на основе центрированных и нормированных данных, эти прогнозы преобразуются в исходный масштаб. Для этого используется обратное преобразование модельных расчетов в NDVI по формуле:

$$NDVI(i) = I' \times СКО + \overline{NDVI}, \quad (4)$$

где  $I'$  – рассчитанный индекс NDVI;  $\overline{NDVI}$  – среднее; СКО – среднеквадратическое отклонение.

Для оценки степени влияния положительной и отрицательной фаз климатических индексов, характеризующих интенсивность крупномасштабных процессов системы океан – атмосфера, на реакцию NDVI использовался композитный анализ. К положительной и отрицательной фазе атмосферных индексов относилось по 25 % выборки за 2000–2023 гг. с каждого «хвоста» распределения, для которых рассчитывались средние значения индекса NDVI.

Описанная методика исследования была применена для выявления отклика растительности Крымского полуострова на климатические факторы с целью выявления закономерностей в динамике растительного покрова, обусловленных изменением климатических условий.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Корреляционные связи и моделирование изменчивости NDVI

В табл. 1 представлены коэффициенты корреляции среднегодовых глобальных климатических индексов с 2000 по 2023 год со средним значением NDVI растительных сообществ за апрель–июнь.

Для Крымского полуострова обнаружены значимые корреляции только для колебания межгодового масштаба ПОЛ/ЕВР с индексами состояния лесов. Коэффициенты корреляции между NDVI различных типов леса с индексом ПОЛ/ЕВР составляют -0,54 и -0,58.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции глобальных климатических индексов по месяцам с декабря по июнь с 2000 по 2023 год со средним значением NDVI лесных сообществ за апрель–июнь. Такое рассмотрение помогает выявить возможные запаздывания влияния климатических факторов на NDVI.

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции среднегодовых индексов глобальных климатических сигналов со средним значением NDVI за апрель–июнь с 2000 по 2023 год. Значимые на 90 % уровне величины выделены жирным шрифтом со звездочкой

**Table 1.** Correlation coefficients between the average annual indices of global climate signals and the average (April–June) NDVI value from 2000 to 2023. Values significant at the 90 % level are highlighted in bold with an asterisk

| Климатический индекс | Лиственные леса | Сосновые и можжевельн. леса | Степь | Степь яйл | Все леса      |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|-------|-----------|---------------|
| ВАК                  | 0,07            | 0,13                        | -0,13 | -0,04     | 0,07          |
| САК                  | 0,16            | 0,15                        | -0,17 | 0,07      | 0,16          |
| СКАНД                | 0,01            | -0,02                       | -0,08 | -0,1      | 0,03          |
| ПОЛ/ЕВР              | <b>-0,58*</b>   | <b>-0,54*</b>               | -0,19 | -0,16     | <b>-0,57*</b> |
| АК                   | 0,02            | -0,1                        | -0,24 | -0,03     | -0,09         |
| ВА/ЗР                | -0,32           | -0,15                       | -0,16 | -0,21     | -0,25         |
| ТСП                  | 0,25            | 0,2                         | -0,19 | -0,05     | 0,21          |
| СК                   | -0,04           | -0,06                       | -0,28 | -0,1      | -0,08         |
| ЗСК                  | -0,1            | -0,01                       | -0,13 | 0,08      | -0,09         |

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции глобальных климатических сигналов за декабрь–июнь по месяцам со средним значением NDVI всех лесных сообществ за апрель–июнь с 2000 по 2023 год. Значимые величины выделены жирным шрифтом: на 90 % уровне – \*, на 95 % уровне – \*\*. Подчеркнуты те значения коэффициентов корреляции, которые усваивались моделью

**Table 2.** Correlation coefficients between monthly (December–June) global climate signals and the average (April–June) NDVI value of all forest communities from 2000 to 2023. Significant values are shown in bold: at the 90 % level – \*, at the 95 % level – \*\*. The values of the correlation coefficients that were assimilated by the model are underlined

| Сигнал  | Декабрь             | Январь                | Февраль               | Март  | Апрель                | Май                  | Июнь  |
|---------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-----------------------|----------------------|-------|
| ВАК     | <b><u>0,39*</u></b> | -0,20                 | 0,06                  | 0,21  | 0,24                  | <b><u>-0,35*</u></b> | 0,05  |
| САК     | <b><u>0,41*</u></b> | 0,15                  | <b><u>0,32</u></b>    | -0,11 | -0,05                 | -0,17                | 0,05  |
| СКАНД   | -0,28               | 0,18                  | -0,08                 | -0,15 | 0,05                  | <b><u>0,32</u></b>   | -0,11 |
| ПОЛ/ЕВР | -0,15               | <b><u>-0,44**</u></b> | <b><u>-0,52**</u></b> | -0,12 | <b><u>-0,44**</u></b> | 0,18                 | -0,08 |
| АК      | <b><u>0,34*</u></b> | -0,18                 | -0,02                 | -0,16 | <b><u>-0,49</u></b>   | -0,24                | 0,18  |
| ВА/ЗР   | 0,04                | -0,16                 | <b><u>-0,29</u></b>   | 0,04  | -0,23                 | 0,03                 | -0,20 |
| ТСП     | <b><u>0,39*</u></b> | -0,07                 | -0,03                 |       |                       |                      |       |
| СК      | -0,21               | 0,28                  | <b><u>-0,34*</u></b>  | 0,14  | 0,21                  | 0,03                 | 0,07  |
| ЗСК     | 0,24                | 0,28                  | <b><u>-0,54**</u></b> | -0,22 | -0,27                 | -0,28                | -0,19 |

Изменчивость NDVI наиболее отчетливо реагирует на такие крупномасштабные климатические явления, как Североатлантическое колебание, Восточно-Атлантическое колебание и Полярное/Евразийское колебание. Проявления сигналов будут рассмотрены ниже отдельно.

В результате проведенного анализа данных с использованием множественной линейной регрессии была построена модель, которая включала в себя 14 сигналов, полученных на основе корреляционного анализа. В табл. 2 подчеркнуты те значения коэффициентов корреляции, которые участвовали в модели. В итоге моделью были отобраны восемь наиболее значимых характеристик с декабря по май ( $R^2$  в табл. 3), вклад которых объясняет 80,52 % дисперсии зависимой переменной.

Отдельно в модели с целью получения прогностической оценки были использованы атмосферные индексы за декабрь–март включительно, из которых отобраны три основных индекса за декабрь–февраль (прR2 в табл. 3). Таким образом, была построена прогностическая модель, которая объясняет 55 % дисперсии NDVI лесных сообществ.

**Таблица 3.** Коэффициенты корреляции и детерминации для глобальных климатических индексов, отобранных для моделирования NDVI всех лесных сообществ за апрель–июнь

**Table 3.** Coefficients of correlation and determination for global climate indices that were selected for modeling April–June NDVI of all forest communities

| Сигнал           | Коэффициент корреляции | $R^2$ | пр $R^2$<br>(прогностическая модель) |
|------------------|------------------------|-------|--------------------------------------|
| БАК в мае        | -0,35                  | 0,12  |                                      |
| БАК в декабре    | 0,35                   | 0,12  | 0,12                                 |
| ПОЛ/ЕВР в апреле | -0,44                  | 0,19  |                                      |
| АК в апреле      | -0,48                  | 0,24  |                                      |
| САК в феврале    | 0,32                   | 0,10  |                                      |
| САК в декабре    | 0,40                   | 0,16  |                                      |
| ТСП в декабре    | 0,38                   | 0,15  |                                      |
| СК в феврале     | -0,34                  |       | 0,12                                 |
| ЗСК в феврале    | -0,54                  |       | 0,30                                 |
| Результат модели |                        | 0,80  | 0,55                                 |

На основании полученных коэффициентов модели, с учетом индексов климатических сигналов с декабря по май, можно записать уравнение множественной линейной регрессии следующим образом:

$$Y = 0,6521 - 0,0180 \times X_1 + 0,0135 \times X_2 - 0,0092 \times X_3 - 0,0092 \times X_4 - 0,0071 \times X_5 + 0,0054 \times X_6 - 0,0069 \times X_7 + 0,0186 \times X_8, \quad (5)$$

где  $Y$  – значение зависимой переменной NDVI;  $X_1$  – БАК в мае;  $X_2$  – САК в феврале;  $X_3$  – Пол/ЕВР в январе;  $X_4$  – Пол/ЕВР в апреле;  $X_5$  – АК в апреле;  $X_6$  – БАК в декабре;  $X_7$  – САК в декабре;  $X_8$  – ТСП в декабре.

Значение  $F$ -статистики равно 12,37 ( $p$ -значение =  $3,828 \cdot 10^{-5}$ ), что указывает на статистическую значимость модели в целом. Согласно результатам модели все предикторы имеют статистически значимые коэффициенты ( $p$ -значение  $< 0,05$ ). Тест Шапиро – Уилка показывает, что нулевая

гипотеза о нормальности распределения остатков не может быть отвергнута ( $p$ -значение = 0,3956 > 0,05), т.е. предположение о нормальности распределения остатков выполняется. Коэффициенты VIF для всех предикторов в модели не превышают критического значения 5, что указывает на отсутствие мультиколлинеарности между предикторами.

Прогностическая модель, которая учитывает вклад индексов климатических сигналов с декабря по февраль, описывается с помощью следующего уравнения:

$$Y = 0,6560 + 0,0065 \times X_1 + 0,0059 \times X_2 - 0,0081 \times X_3 - 0,0176 \times X_4, \quad (6)$$

где  $Y$  – значение зависимой переменной NDVI;  $X_1$  – БАК в декабре;  $X_2$  – АК в декабре;  $X_3$  – Средиземноморское колебание в феврале;  $X_4$  – Западно-Средиземноморское колебание в феврале.

Значение  $F$ -статистики, равное 7,644, является значимым при  $p$ -значении 0,05, что указывает на статистическую значимость модели. Остаточная стандартная ошибка модели составляет 0,02027, а тест Шапиро – Уилка на нормальность остатков показывает, что предположение о нормальности выполнено ( $W = 0,97437$ ,  $p$ -значение = 0,7919). Значения VIF варьируются от 1,033 до 1,063, что указывает на отсутствие признаков мультиколлинеарности между прогностическими переменными.

Такая оценка об отсутствии мультиколлинеарности подтверждает то, что Средиземноморское колебание, исследуемое в работе [21], и Западно-Средиземноморское колебание, предложенное в работе [23], действительно могут рассматриваться как самостоятельные сигналы изменчивости давления в регионе Средиземного моря, несмотря смежные центры действия в окрестности Генуэзского залива. Здесь следует упомянуть, что АК, САК и БАК – отдельные климатические сигналы, хотя имеют общие центры действия.

Также может возникнуть вопрос о том, почему индексы СК и ЗСК в феврале, отличаясь высокими коэффициентами корреляции с NDVI, не попадают в первую модель, но попадают во вторую (прогностическую). Это как раз можно объяснить тем, что региональные средиземноморские колебания являются зависимыми от более масштабных колебаний Атлантико-Европейского региона. Следовательно, индексы СК и ЗСК могут не попадать в первую модель из-за наличия мультиколлинеарности с другими климатическими индексами. При этом во второй модели (прогностической) главную роль играют именно региональные индексы, т.е. моделью учитываются в основном результирующие региональные изменения барического поля над Средиземноморским регионом под действием более масштабных климатических процессов.

Для иллюстрации точности двух моделей на рис. 3 представлены фактические значения NDVI лесных сообществ и расчетные значения зависимой переменной на основе полученных коэффициентов и значений климатических сигналов с декабря по май и с декабря по февраль.

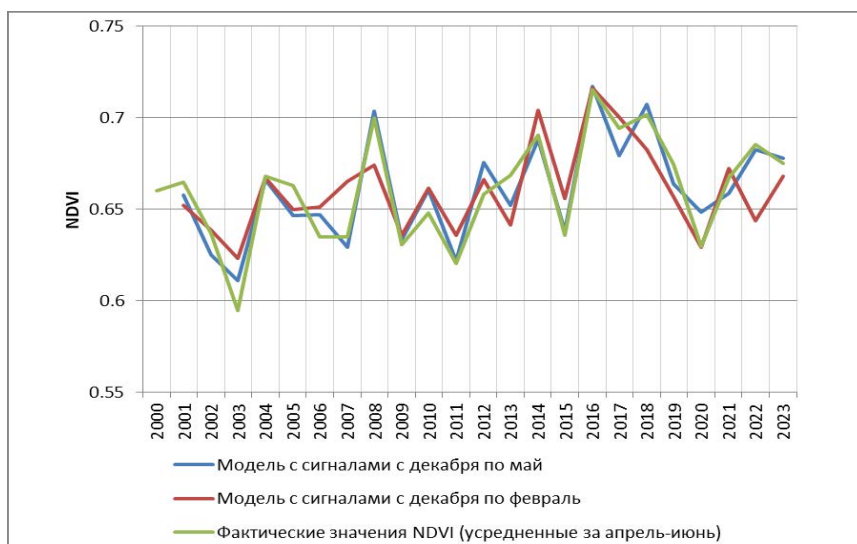


**Рис. 3.** Фактические значения NDVI и рассчитанные значения NDVI по двум моделям для лесных сообществ.

**Fig. 3.** Initial (green line) and calculated NDVI values of forest communities in two models with climate signals from December to May (blue line) and from December to February (red line).

Для выявления связи между атмосферными индексами и степной нарушенной растительностью так же, как и в предыдущем случае, были рассчитаны коэффициенты корреляции между глобальными климатическими индексами по месяцам с декабря по июнь с 2000 по 2023 год со средним значением NDVI всех степных сообществ за апрель–июнь (табл.4).

В результате проведенного анализа данных с использованием множественной линейной регрессии была построена модель, которая рассматривала вклад 10 предикторов (табл. 4), полученных на основе результатов анализа корреляции и значимости коэффициентов. В итоге моделью были отобраны по три наиболее значимых климатических сигнала с января по май ( $R^2$  в табл. 5) и с января по февраль ( $prR^2$  в табл. 5), которые объясняют, соответственно, 59,48 % и 49 % дисперсии зависимой переменной.

На основании полученных коэффициентов модели, можно записать уравнение множественной линейной регрессии следующим образом:

$$Y = 0,523393 - 0,006641 \times X_1 - 0,020325 \times X_2 - 0,022742 \times X_3, \quad (7)$$

где  $Y$  – значение зависимой переменной NDVI;  $X_1$  – БАК в январе;  $X_2$  – БАК в мае;  $X_3$  – Средиземноморское колебание в феврале.

Значение  $F$ -статистики, равное 12,25, является значимым при  $p$ -значении 0,05, что указывает на статистическую значимость модели в целом.

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции глобальных климатических индексов атмосферы по месяцам с декабря по июнь со средним значением NDVI степных сообществ за апрель–июнь с 2000 по 2023 год. Значимые величины выделены жирным шрифтом: на 90 % уровне – \*, на 95 % уровне – \*\*. Подчеркнуты те значения коэффициентов корреляции, которые усваивались моделью

**Table 4.** Correlation coefficients between monthly (December–June) global climate signals and the average (April–June) NDVI value of steppe communities from 2000 to 2023. Significant values are shown in bold: at the 90 % level – \*, at the 95 % level – \*\*. The values of the correlation coefficients that were assimilated by the model are underlined

| Сигнал  | Декабрь | Январь                | Февраль               | Март  | Апрель               | Май                   | Июнь  |
|---------|---------|-----------------------|-----------------------|-------|----------------------|-----------------------|-------|
| ВАК     | 0,15    | <b><u>-0,40**</u></b> | 0,12                  | 0,31  | -0,14                | <b><u>-0,53**</u></b> | 0,07  |
| САК     | -0,03   | -0,23                 | 0,05                  | 0,09  | 0,04                 | <b><u>-0,31</u></b>   | -0,21 |
| СКАНД   | -0,17   | 0,11                  | -0,08                 | -0,09 | 0,18                 | -0,06                 | -0,17 |
| ПОЛ/ЕВР | 0,05    | -0,13                 | -0,28                 | 0,08  | <b><u>-0,37*</u></b> | 0,07                  | 0,11  |
| АК      | -0,05   | <b><u>-0,41*</u></b>  | -0,05                 | 0,13  | -0,31                | <b><u>-0,38*</u></b>  | -0,02 |
| ВА/ЗР   | -0,12   | -0,11                 | 0,20                  | -0,24 | -0,09                | 0,02                  | -0,08 |
| ТСП     | -0,11   | -0,03                 | -0,18                 |       |                      |                       |       |
| СК      | -0,21   | <b><u>0,34*</u></b>   | <b><u>-0,67**</u></b> | 0,05  | <b><u>0,41*</u></b>  | 0,11                  | -0,05 |
| ЗСК     | -0,16   | 0,15                  | <b><u>-0,33*</u></b>  | -0,01 | 0,19                 | -0,02                 | 0,04  |

**Таблица 5.** Коэффициенты корреляции и детерминации глобальных климатических сигналов, отобранных для моделирования, с NDVI степных сообществ за апрель–июнь

**Table 5.** Coefficients of correlation and determination for global climate indices that were selected for modeling April–June NDVI of steppe communities

| Сигнал           | Коэффициент корреляции | R <sup>2</sup> | прR <sup>2</sup><br>(прогностическая модель) |
|------------------|------------------------|----------------|----------------------------------------------|
| ВАК в январе     | -0,40                  | 0,18           | 0,18                                         |
| ВАК в мае        | -0,53                  | 0,28           |                                              |
| СК в феврале     | -0,67                  | 0,45           | 0,45                                         |
| СК в январе      | 0,34                   |                | 0,11                                         |
| Результат модели |                        | 0,59           | 0,49                                         |

Тест Шапиро – Уилка показал нормальность распределения остатков,  $p$ -значение, равное 0,7017, указывает на то, что остаточные значения существенно не отличаются от нормального распределения. Коэффициенты увеличения дисперсии VIF варьируются от 1,067 до 1,117, что указывает на отсутствие признаков мультиколлинеарности между прогностическими переменными.

С целью прогностической оценки NDVI степных сообществ за апрель–июнь был рассмотрен вклад атмосферных индексов с декабря по март

включительно и была построена прогностическая модель с помощью следующего уравнения:

$$Y = 0,516995 - 0,008097 \times X_1 + 0,010207 \times X_2 - 0,023999 \times X_3, \quad (8)$$

где  $Y$  – значение зависимой переменной NDVI;  $X_1$  – БАК в январе;  $X_2$  – Средиземноморское колебание в январе;  $X_3$  – Средиземноморское колебание в феврале.

Значение  $F$ -статистики, равное 8,607, является значимым при  $p$ -значении 0,05, что указывает на статистическую значимость модели в целом. Для коэффициентов модели  $p$ -значение меньше 0,05, что указывает на то, что эти коэффициенты являются статистически значимыми.

Для проверки нормальности остатков использовался тест Шапиро – Уилка на нормальность. Оценка  $p$ -значения, равная 0,2612, указывает на то, что остатки существенно не отличаются от нормального распределения. Значения VIF варьируются от 1,030 до 1,117, что указывает на отсутствие признаков мультиколлинеарности между прогностическими переменными.

Для иллюстрации точности двух моделей на рис. 4 представлены фактические значения NDVI степных сообществ и расчетные значения зависимой переменной на основе полученных коэффициентов и значений климатических сигналов за рассмотренный период вегетации и заблаговременный период.

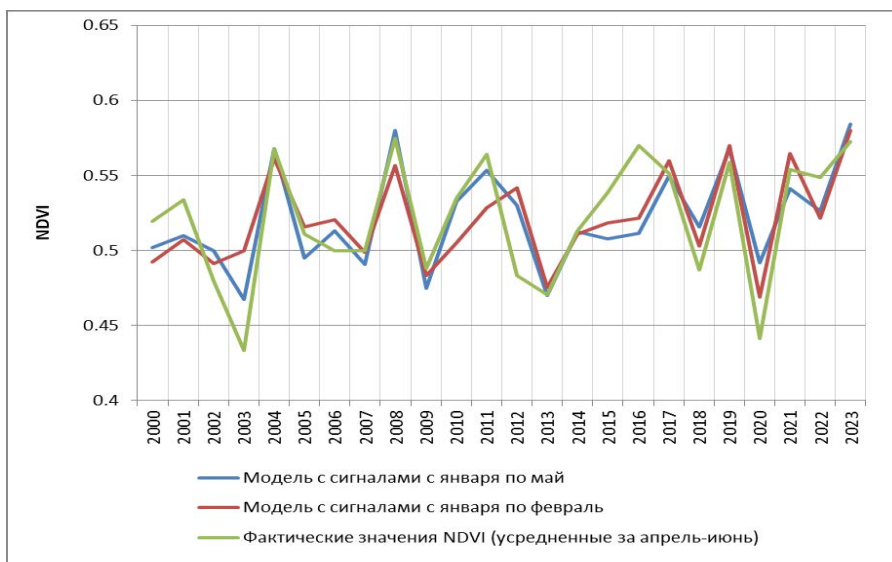


**Рис. 4.** Фактические значения NDVI и рассчитанные значения NDVI двух моделей для степных сообществ.

**Fig. 4.** Initial (green line) and calculated NDVI values of forest communities in two models with climate signals from January to May (blue line) and from January to February (red line).

Успешное использование прогностической модели возможно для вегетационного периода текущего года. Таким образом, зная индексы климатических сигналов с декабря по февраль, можно получить заблаговременную оценку ожидаемого среднего индекса NDVI по типам растительности за апрель–июнь. В каждом следующем году коэффициенты модели и основные климатические факторы должны быть актуализированы.

## 2.2. Проявления климатических сигналов

Результаты, приведенные в табл. 2 и 4, обобщены и сгруппированы по проявлениям климатических сигналов в индексах NDVI растительных сообществ.

Североатлантическое колебание (САК). Для лесных сообществ индекс NDVI за апрель–июнь (табл. 2) характеризуется положительной связью с индексом САК в декабре ( $r = 0,41$ ) и феврале (0,32). Для степных сообществ (табл. 4) наблюдается отрицательная связь с индексом САК в мае (-0,31).

Восточно-Атлантическое колебание (БАК). Для NDVI лесных сообществ (табл. 2) определяется положительная связь с индексом БАК в декабре (0,39) и отрицательная связь с индексом БАК в мае (-0,35). Для NDVI степей (табл. 4) наблюдается отрицательная связь с индексом БАК в январе (-0,40) и мае (-0,53).

Полярное/Евразийское колебание (ПОЛ/ЕВР). В табл. 1 среди всех коэффициентов корреляции для разных типов растительности значимыми являются только отрицательные корреляции ( $< -0,50$ ) между NDVI и среднегодовым индексом ПОЛ/ЕВР для разных типов леса. Для степей и степей яйл не наблюдается значимой корреляции даже и со среднегодовым индексом ПОЛ/ЕВР (табл. 1). Для NDVI лесов (табл. 2) наблюдается значимая отрицательная зависимость от индекса ПОЛ/ЕВР в декабре (-0,44), феврале (-0,44) и апреле (-0,52). Наибольшим откликом характеризуются лиственные породы (табл. 1). Для NDVI степей (табл. 4) наблюдается значимая отрицательная зависимость от индекса ПОЛ/ЕВР в апреле (-0,37).

Арктическое колебание (АК). Отклик NDVI всех лесных сообществ (табл. 2) характеризуется положительной корреляцией с индексом АК в декабре (0,34) и отрицательной корреляцией с индексом АК в апреле (-0,49). Отклик NDVI степных сообществ (табл. 4) имеет отрицательную связь с индексом АК в январе (-0,41) и мае (-0,38).

Тропики/Северное полушарие (ТСП). Отклик NDVI всех лесных сообществ (табл. 2) имеет положительную связь с индексом ТСП в декабре (0,39). Для NDVI степных участков нет значимой связи (табл. 4).

Средиземноморское колебание (СК). Отклик NDVI лесных сообществ (табл. 2) отрицателен на индекс СК в феврале (-0,34). Индекс NDVI степных сообществ (табл. 4) характеризуется положительным откликом на индекс СК в январе (0,34) и апреле (0,41), и отрицательным откликом на индекс СК в феврале (-0,67).

Западно-Средиземноморское колебание (ЗСК). Получен отрицательный отклик NDVI на индекс ЗСК в феврале (табл. 2 и 4) как для лесных сообществ (-0,54), так и для степных сообществ (-0,33).

На рис. 5 и 6 представлена реакция NDVI разных типов растительности, основанная на композитном анализе, на положительные (+) и отрицательные (-) фазы основных определяющих атмосферных индексов из табл. 2 и 5.

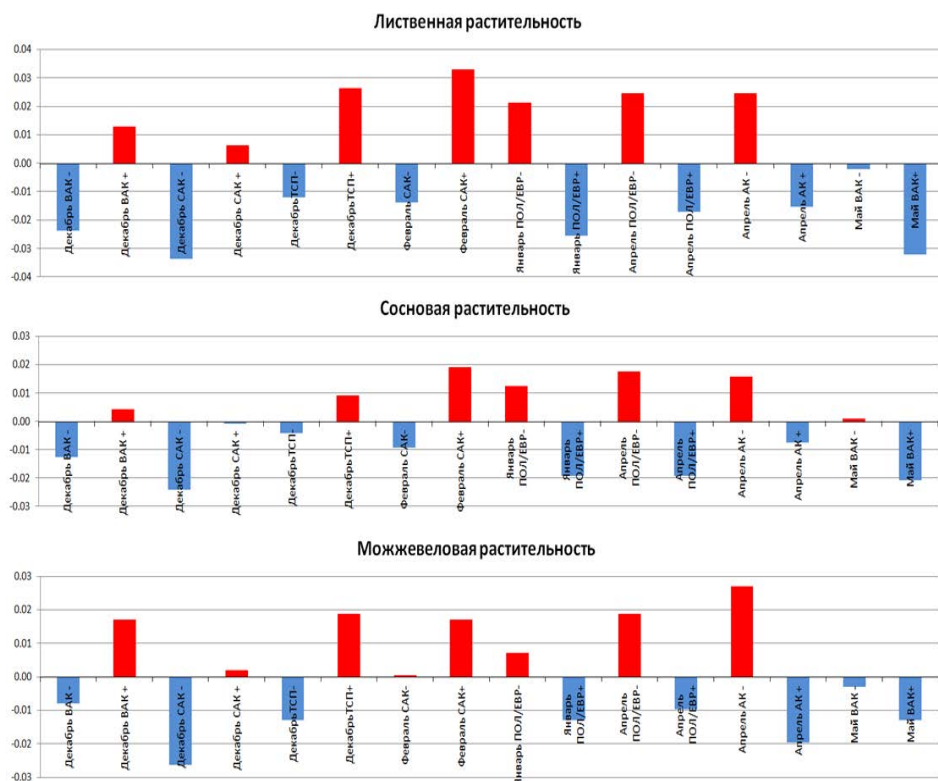


**Рис. 5.** Реакция NDVI различных типов леса на положительные (+) и отрицательные (-) фазы климатических индексов в разные месяцы.

**Fig. 5.** NDVI response to the positive (+) and negative (-) phases of monthly climate indices for different forest types.

Как видно на рис. 5, для лиственной и сосновой растительности наиболее высокие средние значения NDVI наблюдаются при положительной фазе САК в феврале, при которой происходит понижение частоты циклонов Черноморского региона в зимне-весенний период. Для можжевельной растительности самый высокий средний индекс NDVI – при отрицательной фазе Арктического колебания в апреле, при которой частота циклонов Черноморского региона возрастает весной и уменьшается летом. Самые низкие средние значения индекса NDVI всех типов леса – при отрицательной фазе САК в декабре, которая сопровождается повышением частоты циклонов в декабре.

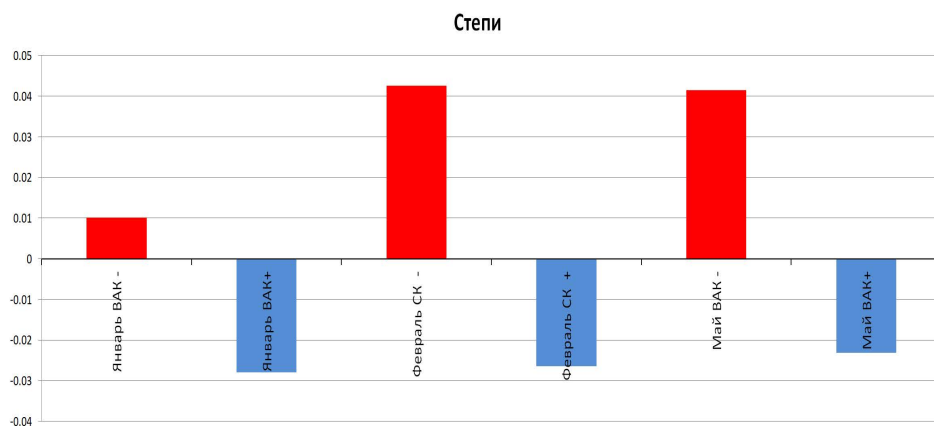


**Рис. 6.** Реакция NDVI степей на положительные (+) и отрицательные (-) фазы климатических индексов в разные месяцы.

**Fig. 6.** NDVI response to the positive (+) and negative (-) phases of monthly climate indices for steppe communities.

Из рис. 6 в изменении индекса NDVI для степной растительности видно, что Средиземноморское колебание в феврале и BAK в мае больше проявляются в своей отрицательной фазе (индекс NDVI  $> +0,04$ ), когда циклоническая активность возрастает, чем в положительной фазе (индекс NDVI до  $-0,25$ ) и ослаблении циклонической активности. При этом NDVI степных сообществ больше реагирует на ослабление циклонической активности (недостаток увлажнения) в январе в положительную фазу BAK (NDVI  $-0,28$ ), чем при большем количестве циклонов (достаточном увлажнении) в отрицательную фазу BAK (NDVI  $+0,01$ ).

### 2.3. Обсуждение и интерпретация результатов

Известно, что положительные и отрицательные фазы рассмотренных климатических процессов значимо проявляются в изменении частоты, глубины циклонов и смещении их траекторий [3]. В целом, повышение циклонической активности приводит к увеличению количества осадков, смягчению температур холодных месяцев и охлаждению теплых месяцев. Понижение активности циклонов (т. е. увеличение активности антициклонов), напротив, уменьшает количество выпадающих осадков, сопровождается морозными зимами и жарким летом.

Рассмотрим закономерности проявлений климатических сигналов в изменчивости индекса NDVI посредством циклонической активности на примере САК как наиболее изученного колебания.

Ранее в исследованиях [1, 28] было подтверждено влияние САК на изменчивость характеристик циклонов и антициклонов, что влияет на температурно-влажностный режим в Черноморско-Средиземноморском регионе: в отрицательную фазу САК наблюдается повышение числа циклонов,

и следовательно, увеличение осадков, а в положительную фазу – противоположные условия. Как получено в настоящей работе, отрицательная фаза САК в мае сопровождается ростом NDVI степных участков (табл. 4), что согласуется с результатами работ [4, 11].

Для лесных участков, напротив, наблюдается положительная корреляция NDVI с зимним индексом САК (табл. 2). При этом выделяются следующие особенности для всех рассмотренных типов леса (рис. 5). Отрицательный индекс САК в январе приводит к падению индекса NDVI, а положительный индекс в феврале – к росту индекса NDVI.

Для объяснения таких закономерностей сначала нужно учесть региональные особенности объекта исследования. На площади примерно 4 тыс. кв. км – главная гряда Крымских гор – соотношение атмосферных осадков и испаряемости близко к единице, а влажность почвы в течение 9–10 месяцев не опускается ниже влажности разрыва капилляров, при которой вода теряет сплошность заполнения капилляров, и ее подвижность резко уменьшается [7]. Это состояние наблюдается, когда вода начинает накапливаться в глубоких слоях почвы. Таким образом, на протяжении большей части года в крымских лесах преобладает доступность капиллярной воды для растений. В то же время степные участки более чувствительны как к недостатку влаги, так и к переувлажнению почвы из-за менее мощной корневой системы растений степи.

Получается, что несмотря на более теплые условия и увеличение циклонической активности в отрицательную фазу САК, в январе может создаваться множество неблагоприятных факторов для роста лесов на Крымском полуострове. Хотя повышение числа циклонов обычно сопровождается более теплыми условиями, оно также может обуславливать выпадение избыточных осадков [19]. На Крымском полуострове это может сопровождаться затоплением и переувлажнением почвы, что негативно влияет на рост растительности и, как следствие, приводит к снижению их фотосинтетической активности. Сильные ветры и избыточные осадки могут способствовать эрозии почвы, что ухудшает условия для роста корней растений и снижает доступность питательных веществ. При этом переувлажнение почвы, очевидно, является более неблагоприятным фактором для степных сообществ, а эрозия почвы – для лесных сообществ с активными склоновыми эффектами. Кроме того, неблагоприятным фактором может быть не столько общее количество осадков, сколько неравномерность их выпадения [34], т. е. когда при одном и том же среднемесячном количестве осадки выпадают с большей интенсивностью в течение короткого времени.

При положительном индексе САК в феврале в Черноморском регионе преобладают антициклонические барические системы [28]. Морозные температуры могут создавать условия для накопления твердых осадков и формирования более мощного снежного покрова в Крымских горах, в отличие от теплых температур при повышенной циклонической активности, когда поступает большее количество осадков, но в жидкой фазе. Такой запас

твердых осадков реализуется весной, приводя к более выраженному пику весеннего половодья крымских рек и росту вегетационного индекса лесов за счет снегового питания.

Рассмотрим теперь, как рассмотренные особенности проявлений САК в изменчивости индекса NDVI посредством циклонической активности оправдываются для других сигналов.

Характер проявлений ВАК в изменении индекса NDVI в целом аналогичен САК, что также справедливо и для циклонической активности. Для лесных и степных сообществ наблюдается отрицательная корреляция с индексом ВАК в мае (табл. 2 и 4), т. е. при положительной фазе ВАК в мае наблюдается пониженная циклоническая активность, и индекс NDVI понижается. Зимний индекс ВАК проявляется по-разному для лесных и степных сообществ.

Для степных сообществ январский индекс ВАК проявляется так же, как и майский индекс ВАК (табл. 4), т. е. в положительную фазу, при уменьшении циклонической активности, происходит уменьшение вегетационного индекса. Это можно объяснить ухудшением зимних (январских) условий увлажнения степных почв.

Индекс NDVI лесных сообществ характеризуется положительной корреляцией с индексом ВАК в декабре (табл. 2), как и с индексом САК в декабре. При сохранении общей закономерности наблюдаются следующие особенности по типам лесов (рис. 5). Индекс NDVI лиственных и сосновых лесов сильнее реагирует уменьшением в отрицательную фазу ВАК в декабре, а можжевельниковая растительность – ростом в положительную фазу ВАК в декабре. Можно предположить, что запас снежного покрова более важен для вегетации можжевельниковых пород с их менее развитой корневой системой, чем для сосновых и лиственных пород.

Проявления зимнего и весеннего индекса Арктического колебания в вегетационном индексе (табл. 2 и 4) аналогичны проявлениям ВАК, а также САК. Индекс АК характеризуется сильной корреляционной связью с индексом САК и включает в себя центры действия САК [29]. Характер проявлений АК в циклонической активности аналогичен САК. При этом ВАК хотя и отдельное колебание давления в Северной Атлантике, часто интерпретируется как смещенное на юго-восток САК [14].

Годовой индекс Полярного/Евразийского колебания отличается наиболее выраженной отрицательной связью с индексом NDVI лесных сообществ за апрель–июнь (табл. 1). Видимо, это связано с тем, что в отдельные месяцы знак отрицательной корреляции сохраняется (табл. 2) и не погашается при усреднении, как для других сигналов.

При положительной фазе ПОЛ/ЕВР в зимние и весенние месяцы циклоническая активность над Крымским полуостровом понижается весной, при этом, как показано в [15], уменьшается количество осадков. Таким образом, формируются неблагоприятные весенние условия увлажнения для развития растительности, и NDVI падает, как при положительной фазе САК, в мае.

Вегетационный индекс лесных сообществ сильнее реагирует на январский, февральский и апрельский индекс ПОЛ/ЕВР (табл. 2). В то же время NDVI степных сообществ откликаются только на апрельский индекс (табл. 4). То, что лесные сообщества более выражено реагируют на зимне-весенний индекс ПОЛ/ЕВР и условия весеннего увлажнения, возможно, связано с тем, что в предгорных и горных условиях крымского леса сложнее достигаются неблагоприятные для растений условия переувлажнения, чем на равнинных степных участках.

Отрицательная связь ПОЛ/ЕВР с рассмотренным индексом NDVI согласуется с результатами работы [9], где ПОЛ/ЕВР выделяется как основной предиктор изменчивости урожайности озимой пшеницы (с отрицательной корреляцией) в новых регионах Российской Федерации в Северном Причерноморье и в Крыму.

Индексы ТСП, СКАНД и ВА/ЗР проявляются только в NDVI лесных сообществ благодаря вкладу единичных месяцев (табл. 2). Рост вегетационного индекса лесов наблюдается при положительной фазе ТСП в декабре, отрицательной фазе колебания ВА/ЗР в феврале и положительной фазе Скандинавского колебания в мае. При положительной фазе ТСП в декабре зимняя циклоническая активность ослабевает и создаются условия для накопления твердых осадков в горах. При отрицательной фазе колебания ВА/ЗР в феврале и положительной фазе Скандинавского колебания в мае активность циклонов весной возрастает и создает более благоприятные условия для растительности.

Отклики NDVI на Средиземноморское и Западно-Средиземноморское колебания также укладываются в описанные выше закономерности проявлений посредством циклонической активности. Вегетационный индекс как лесных, так и степных сообществ характеризуется отрицательной корреляцией с индексом СК в феврале (табл. 2 и 4). При росте зимнего индекса СК весенняя циклоническая активность над Крымским полуостровом падает. При этом создаются менее благоприятные тепло-влажностные условия для развития растительности, чем в противоположных условиях отрицательной фазы СК.

Итак, закономерности проявлений климатических сигналов в изменчивости индекса NDVI Крымского полуострова посредством циклонической активности можно обобщить следующим образом.

Рост вегетационного индекса лесных сообществ происходит при тех фазах климатических сигналов, которые сопровождаются понижением зимней (возможно, благодаря снеговому питанию) и повышением весенней циклонической активности. Увеличение вегетационного индекса степных сообществ наблюдается при тех фазах климатических сигналов, которые характеризуются повышением циклонической активности как в зимний, так и в весенний период (возможно, в связи с исключительно дождевым питанием). И наоборот, уменьшение индекса NDVI всех растительных сообществ Крымского полуострова происходит при противоположных фазах климатических сигналов и условиях циклонической активности.

## Выводы

Проведённое исследование позволило выявить значимые отклики крупномасштабных климатических сигналов в изменениях состоянии растительного покрова на территории Крымского полуострова за период 2000–2023 гг. Наибольшее влияние на состояние и продуктивность лесных сообществ в апреле–июне оказывает среднегодовой индекс Полярного/Евразийского колебания (ПОЛ/ЕВР), в то время как влияние Северо-атлантического колебания (САК) и Восточно-Атлантического колебания (ВАК) выражено менее значительно. Для степных сообществ наибольшим фактором воздействия являются ВАК и Средиземноморское колебание. Вегетационный индекс растительных сообществ возрастает при тех фазах климатических сигналов, которые сопровождаются усилением циклонической активности. Исключение составляют лесные сообщества, индекс NDVI которых увеличивается при ослаблении зимней циклонической активности, возможно, в связи с формированием более морозных условий, благоприятных для накопления твердых осадков в горах.

В ходе проведенного анализа на основе мультирегрессионного моделирования показано, что совместное влияние САК, ВАК, АК, ПОЛ/ЕВР и ТСП с декабря по май объясняет 80 % изменения вегетационного индекса лесных сообществ в апреле–июне. Влияние процессов ВАК и СК с января по май объясняет 59 % изменения вегетационного индекса степных сообществ. Прогностические модели, анализирующие вклад глобальных климатических индексов с декабря по февраль, объясняют 55 % изменения NDVI лесных сообществ и 49 % изменения NDVI степных сообществ.

Полученные выводы работы подчеркивают важность учёта роли крупномасштабных климатических колебаний для понимания и необходимости их применения в прогнозировании изменений в экосистемах Крыма. Данные выводы могут стать основой для разработки эффективных стратегий управления природными ресурсами и адаптации к климатическим изменениям.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИПТС «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера», номер гос. регистрации 124013000609-2.

The work was funded by the state assignment of the Institute of Natural and Technical Systems "Fundamental and applied research of patterns and mechanisms of formation of regional changes in the natural environment and climate under the influence of global processes in the ocean-atmosphere system", state registration number 124013000609-2.

## Список литературы

1. Воскресенская Е.Н., Сухонос О.Ю. Антициклоны и экстремальная температура воздуха в Черноморско-Средиземноморском регионе. Севастополь: ИПТС, 2020. 172 с.
2. Бардин М.Ю. Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 1995. № 11. С. 24-37.
3. Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н. Циклоническая активность в Черноморско-Средиземноморском регионе. Проявления глобальных процессов в системе океан-атмосфера. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 168 с.
4. Гармаев Е.Ж., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Андреев С.Г., Жарникова М.А., Батомункуев В.С., Мандах Н., Салихов Т.К., Тулохонов А.К. Оценка пространственно-временной изменчивости засушливых экосистем республики Бурятия // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 2. С. 34-42.
5. Дегерменджи А.Г., Высоцкая Г.С., Сомова Л.А., Письман Т.И., Шевырнов А.П. Многолетняя динамика NDVI-растительности различных классов тундры в зависимости от температуры и осадков // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493, № 2. С. 103-106.
6. Как использовать NDVI для анализа своих полей. 2018–2023. <https://blog.onesoil.ai/ru/what-is-ndvi>.
7. Лычак А.И., Бобра Т.В. Геоэкологическая ситуация и проблема формирования экологической сети в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2009. Т. 5, № 1. С. 63-69.
8. Маслова В.Н., Воскресенская Е.Н., Дунаевская Е.В. Декадные аномалии циклонической активности в Черноморско-Средиземноморском регионе и урожайность озимой пшеницы в Украине // Системы контроля окружающей среды. 2009. Т. 66, № 12. С. 327-330.
9. Маслова В.Н., Воскресенская Е.Н. Закономерности изменчивости урожайности агрокультур в новых субъектах РФ // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2024. № 4 (180). С. 79-86.
10. Попова В.В. Современные изменения температуры приземного воздуха на севере Евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // Известия РАН. Серия географическая. 2009. № 6. С. 59-69.
11. Цыдыпов Б.З. Трансформация отдельных компонентов природной среды севера Центральной Азии в условиях изменения климата // Материалы Международной научно-практической конференции «Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации». Москва: ООО «МАКС Пресс», 2020. С. 185-190.
12. Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. Vol. 320, no. 5882. P. 1444-1449.
13. Bossard M., Feranec J., Otahel J. CORINE land cover technical guide: Addendum 2000. Copenhagen: European Environment Agency, 2000. 105 p.
14. Climate Prediction Center – East Atlantic (EA). 2012. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>
15. Climate Prediction Center – Polar Eurasia: Associated Precipitation Patterns. 2005. [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur\\_pmap.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur_pmap.shtml)
16. Didan K., Munoz A.B., Compton T.J., Pinzon J.E. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 2015. 33 p.
17. Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J. et al. Global carbon budget 2018 // Earth System Science Data. 2018. Vol. 10, no. 4. P. 2141-2194.
18. Gong D.Y., Ho C.H. Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. Vol. 108, no. D16. P. 4498.
19. Hawcroft M., Walsh E., Hodges K., Zappa G. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones // Environmental research letters. 2018. Vol. 13, no. 12. P. 124006.

20. Liu C., Li J., Liu Q., Gao J., Mumtaz F., Dong Y., Wang C., Gu C., Zhao J. Combined influence of ENSO and North Atlantic Oscillation (NAO) on Eurasian Steppe during 1982–2018 // *Science of the total environment*. 2023. Vol. 892. P. 164735.
21. Maheras P., Kutiel H. Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century // *International Journal of Climatology*. 1999. Vol. 19, no. 7. P. 745–764.
22. Mahyou H., Tychon B., Lang M., Balaghi R. (2018). Phytomass estimation using eMODIS NDVI and ground data in arid rangelands of Morocco // *African Journal of Range & Forage Science*. 2018. Vol. 35, no. 1. P. 1–12.
23. Martin-Vide J., Lopez-Bustins J. The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula // *International Journal of Climatology*. 2006. Vol. 26, no. 11. P. 1455–1475.
24. Science Strategy – Science Mission Directorate. 2008. <https://web.archive.org/web/20090117171543/http://nasascience.nasa.gov/about-us/science-strategy>
25. CPC – Monitoring & Data: Daily Arctic Oscillation Index. 2002. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
26. Schultz P.A., Halpert M.S. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation // *Advances in Space Research*. 1993. Vol. 13, no. 5. P. 277–280.
27. Padrón R.S., Gudmundsson L., Decharme B., Ducharme A., Lawrence D.M., Mao J., Peano D., Krinner G., Kim H., Seneviratne S.I. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change // *Nat. Geosci.* 2020. Vol. 13, no. 7. P. 477–481.
28. Polonsky A.B., Bardin M.Yu., Voskresenskaya E.N. Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black Sea in the second half of the 20th century // *Physical Oceanography*. 2007. Vol. 17, no. 6. P. 348–359.
29. Rogers J., McHugh M. On the separability of the North Atlantic oscillation and Arctic oscillation // *Climate Dynamics*. 2002. Vol. 19. P. 599–608.
30. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *NASA Spec. Publ.* 1974. Vol. 351, no. 1. P. 309–317.
31. ПИ5. 2004–2025. <https://m.rp5.ru>
32. National Centers for Environmental Information (NCEI). <https://www.ncei.noaa.gov/>
33. Venables W.N., Ripley B.D. *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. 3rd ed. // *Statistics and Computing*. NY: Springer, 1999. 501 p.
34. Vyshkvarkova E., Voskresenskaya E., Martin-Vide J. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia // *Atmospheric Research*. 2018. Vol. 203. P. 36–43.

## References

1. Voskresenskaya E.N., Sukhonos O.Y. Anticiklony i ekstremal'naya temperatura vozduha v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione [Anticyclones and extreme air temperature in the Black Sea-Mediterranean region]. Sevastopol: Institute of Natural and Technical Systems, 2020, 172 p. [in Russ.].
2. Bardin M.Y. Izmenchivost' harakteristik ciklonichnosti v srednej troposfere umerennykh shirot Severnogo polushariya [Variability of cyclonic characteristics in the middle troposphere of the temperate latitudes of the Northern hemisphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 1995, vol. 11, pp. 24–37 [in Russ.].
3. Voskresenskaya E.N., Maslova V.N. Ciklonicheskaya aktivnost' v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione. Proyavleniya global'nykh processov v sisteme okean-atmosfera [Cyclonic activity in the Black Sea-Mediterranean region. Manifestations of global processes in the ocean-atmosphere system]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 168 p. [in Russ.].
4. Garmaev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Tsydygov B.Z., Alymbaeva Zh.B., Sodnomov B.V., Andreev S.G., Zharnikova M.A., Batomunkuyev V.S., Mandakh N., Salikhov T.K., Tulokhonov A.K. Ocenka prostranstvenno-vremennoy izmenchivosti zasushlivykh ekosistem respubliki Buryatiya [Assessment of spatial and temporal variability of arid ecosystems of the Republic of Buryatia]. *Arid ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 34–42 [in Russ.].

5. Degermendzhi A.G., Vysotskaya G.S., Somova L.A., Pisman T.I., Shevyrnogov A.P. Long-term dynamics of NDVI vegetation of various tundra classes depending on temperature and precipitation. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 493, no. 2, pp. 658-660 DOI: 10.1134/S1028334X20080048.

6. Kak ispol'zovat' NDVI dlya analiza svoih polej [How to use NDVI to analyze your fields]. 2018-2023. Available at: <https://blog.onesoil.ai/ru/what-is-ndvi> [in Russ.].

7. Lychak A.I., Bobra T.V. Geoekologicheskaya situatsiya i problema formirovaniya ekologicheskoy seti v Krymu [Geoecological situation and the problem of forming an ecological network in Crimea]. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 2009, vol. 5, no. 1, pp. 63-69 [in Russ.].

8. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Dunaevskaya E.V. Dekadnye anomalii ciklonicheskoy aktivnosti v Chernomorsko-Sredizemnomorskom regione i urozhajnost' ozimoy pshenicy v Ukraine [Decadal anomalies of cyclonic activity in the Black Sea-Mediterranean region and winter wheat yield in Ukraine]. *Monitoring systems of environment*, 2009, vol. 66, no. 12, pp. 327-330 [in Russ.].

9. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N. Zakonomernosti izmenchivosti urozhajnosti agrokul'tur v novykh sub"ekтах RF [Patterns of agricultural yield variability in new regions of the Russian Federation]. *Use and protection of natural resources of Russia*, 2024, no. 4(180), pp. 79-86 [in Russ.].

10. Popova V.V. Sovremennyye izmeneniya temperatury prizemnogo vozduha na severe Evrazii: regional'nye tendentsii i rol' atmosfernoj cirkulyacii [Modern changes in surface air temperature in the north of Eurasia: regional trends and the role of atmospheric circulation]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2009, no. 6, pp. 59-69 [in Russ.].

11. Tsydyapov B.Z. Transformatsiya ot del'nykh komponentov prirodnoy sredy severa Central'noy Azii v usloviyakh izmeneniya klimata [Transformation of individual components of the natural environment of the North of Central Asia in the context of climate change]. *Proc. Int. Sci. Pract. Conf. "Land Degradation and Desertification: problems of sustainable environmental management and adaptation"*. Moscow, MAKS Press publ., 2020, pp. 185-190 [in Russ.].

12. Bonan G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, vol. 32, no. 5882, pp. 1444-1449.

13. Bossard M., Feranec J., Otahal J. CORINE land cover technical guide: Addendum 2000. Copenhagen: European Environment Agency, 2000, 105 p.

14. Climate Prediction Center – East Atlantic (EA). 2012. Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml>.

15. Climate Prediction Center - Polar Eurasia: Associated Precipitation Patterns. 2005. Available at: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur\\_pmap.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/poleur_pmap.shtml).

16. Didan K., Munoz A.B., Compton T.J., Pinzon J.E. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 2015, 33 p.

17. Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., ... Zheng, B. Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 2141-2194.

18. Gong D.Y., Ho C.H. Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, vol. 108, no. D16, p. 4498.

19. Hawcroft M., Walsh E., Hodges K., Zappa G. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones. *Environmental research letters*, 2018, vol. 13, no. 12, p. 124006.

20. Liu C., Li J., Liu Q., Gao J., Mumtaz F., Dong Y., Wang C., Gu C., Zhao J. Combined influence of ENSO and North Atlantic Oscillation (NAO) on Eurasian Steppe during 1982–2018. *Science of the total environment*, 2023, vol. 892, p. 164735.

21. Maheras P., Kutiel H. Spatial and temporal variations in the temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century. *International Journal of Climatology*, 1999, vol. 19, no. 7, pp. 745-764.

22. Mahyou H., Tychon B., Lang M., Balaghi R. (2018). Phytomass estimation using eMODIS NDVI and ground data in arid rangelands of Morocco. *African Journal of Range & Forage Science*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 1-12.

23. Martin-Vide J., Lopez-Bustins J. The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 2006, vol. 26, no. 11, pp. 1455-1475.
24. Science Strategy – Science Mission Directorate. 2008. Available at: <https://web.archive.org/web/20090117171543/http://nasascience.nasa.gov/about-us/science-strategy>
25. CPC – Monitoring & Data: Daily Arctic Oscillation Index. 2002. Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
26. Schultz P.A., Halpert M.S. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research*, 1993, vol. 13, no. 5, pp. 277-280.
27. Padrón R.S., Gudmundsson L., Decharme B., Ducharme A., Lawrence D.M., Mao J., Peano D., Krinner G., Kim H., Seneviratne S.I. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nat. Geosci.*, 2020, vol. 13, no. 7, pp. 477-481.
28. Polonsky A.B., Bardin M.Yu., Voskresenskaya E.N. Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black Sea in the second half of the 20th century. *Physical Oceanography*, 2007, vol. 17, no. 6, pp. 348-359.
29. Rogers J., McHugh M. On the separability of the North Atlantic oscillation and Arctic oscillation. *Climate Dynamics*, 2002, vol. 19, pp. 599-608.
30. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ.*, 1974, vol. 351, no. 1, pp. 309-317.
31. PII5. 2004-2025. Available at: <https://m.rp5.ru>
32. National Centers for Environmental Information (NCEI). Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/>
33. Venables W.N., Ripley B.D. Modern Applied Statistics with S-PLUS. 3rd ed. Statistics and Computing. NY: Springer, 1999, 501 p.
34. Vyshkvarkova E., Voskresenskaya E., Martin-Vide J. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia. *Atmospheric Research*, 2018, vol. 203, pp. 36-43.

Поступила 15.11.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.

Submitted 15.11.2024; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-95-117>

УДК 551.509.5

## **Условия возникновения и прогноз сильных ливней и шквалов в Московском регионе на примере двух случаев в июне 2024 года**

***Т.Г. Дмитриева, А.А. Алексеева***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
tdsin@mecom.ru, antonida\_alekseeva@mail.ru*

Проведен сравнительный анализ синоптических условий и численных прогнозов двух случаев опасных конвективных явлений в Московском регионе: 5–6 и 20 июня 2024 г. Рассмотрены прогнозы явлений мезомасштабной модели COSMO-Ru2, усваивающей данные радиолокаторов, и рассчитанные на основе данных региональной модели Гидрометцентра России. Радиолокационные данные ДМРЛ-С «Внуково» и полученные на основе сети ДМРЛ-С в экспериментальной технологии диагноза дополняют картину синоптических процессов и их особенностей. Даны рекомендации по использованию синоптической информации в случаях формирования активной конвекции с опасными явлениями в дополнение к численным прогнозам для повышения точности штормового предупреждения и прогноза.

*Ключевые слова:* сильные ливни и шквалы, прогноз, теплый период года, модель COSMO-Ru2, радиолокационная информация ДМРЛ-С

## **Conditions for occurrence and forecasting of heavy rains and squalls in the Moscow region: Case Studies for June 2024**

***T.G. Dmitrieva, A.A. Alekseeva***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
tdsin@mecom.ru, antonida\_alekseeva@mail.ru*

The paper presents a comparative analysis of synoptic conditions and the results of numerical forecasts of severe convective events in the Moscow region on June 5–6 and 20, 2024. The forecasts of weather events by the Cosmo-Ru2 mesoscale model assimilating radar data and the forecasts based on the data of the regional model of the Hydrometeorological Center of Russia are used. The DMRL-C Vnukovo weather radar data and the data obtained on the basis of the DMRL-C network in the experimental diagnostic technology complement the pattern of synoptic processes and their features. Recommendations are given on the use of synoptic information in cases of the formation of active convection with severe weather events in addition to numerical forecasts to improve the accuracy of storm warning and forecasting.

*Keywords:* heavy rains and squalls, forecast, warm season, COSMO-Ru2 model, DMRL-C weather radar data

## Введение

Июнь 2024 года в Московском регионе оказался самым дождливым месяцем за всю историю метеонаблюдений, перекрыв месячную сумму осадков по новым климатическим нормам в три раза. Большую часть июня регион находился в малоградиентных полях области пониженного давления: в первую декаду месяца вызванных атлантическими депрессиями, во вторую декаду – выходом циклонов (южного, образовавшегося над Черным морем, и балтийского, образовавшегося на юге Балтийского моря) и связанными с ними активными фронтальными разделами. Поэтому большая часть кратковременных дождей и ливней с грозами наблюдалась на фронтах окклюзий и линиях неустойчивости и имела, соответственно, внутримассовый характер. Грозовые же ливни 20 июня – фронтальные, отмечались при прохождении холодного атмосферного фронта.

Ливневые дожди часто сопровождались шквалистым усилением ветра, в отдельных районах градом, но по характеру выпадения осадков и возникновению шквалистых порывов ветра имели различия. Представляет интерес более подробное рассмотрение этих процессов с целью выявления закономерностей, учет которых поможет при оперативном прогнозе, а также при составлении штормовых предупреждений.

В июне 2024 года по количеству выпавших в Московском регионе осадков наиболее запомнились случаи ливней с грозами, сопровождавшиеся отмеченными наземными наблюдательными станциями (ННС) шквалами: вечер 5 июня и ночь 6 июня (49 мм/ч на МС ВДНХ при шквале 19 м/с); 20 июня (15–39 мм/12ч при шквалистом усилении ветра местами 15–26 м/с). Процессы 20 июня по количеству осадков и порывам ветра воспроизводились близко к фактическим моделями Гидрометцентра России [method.meteoorf.ru], однако внутримассовый характер процесса 5–6 июня модели не спрогнозировали, давая лишь кратковременный дождь (порядка 3–5 мм/12ч) при ветре в градации «слабый/умеренный» (до 8 м/с).

### Сравнение случаев конвективных явлений 5–6 июня и 20 июня 2024 года

В табл. 1 приведены данные о количестве осадков для случаев сильного дождя, сильного ливня и порывов ветра (местами шквалов) ночью 6 июня (после 21 ч МСК) в Московском регионе, включая данные автоматических метеорологических станций (АМС).

В случае 6 июня сильные и очень сильные осадки и шквал имели локальный характер, реализовались только в центре Старой Москвы, в случае 20 июня – прошли по территории всего Московского региона с запада на восток, что было вызвано прохождением холодного контрастного атмосферного фронта (температура воздуха на поверхности 850 гПа понизилась на 5 °С за 12 ч, у земли – на 6–7 °С).

Анализ приземных (рис. 1) и на поверхностях АТ-850 и АТ-500 гПа барических полей за 15 ч МСК (рис. 2 и 3) наглядно показывает различие в синоптических процессах этих случаев. Московский регион 5–6 июня находился у земли в малоградиентном поле давления, в теплой, влажной воздушной массе с постоянным притоком тепла, на высотах – на оси высотного гребня тепла, также в малоградиентном поле при слабом ветре в нижней тропосфере (от 5 до 10 м/с); 20 июня – у земли в градиентном поле давления в зоне активного арктического холодного атмосферного фронта, на высотах – в высотной ложбине, близко к ее оси, где наблюдалась конвергенция ветровых потоков, юго-западные ветры с переходом на северо-западные (в нижней тропосфере скорость ветра до 25 м/с), на границе зоны струйного течения.

**Таблица 1.** Данные о количестве осадков при дождях и ливнях и о максимальных порывах ветра ночью 6.06.2024 и днем 20.06.2024 в Московском регионе  
**Table 1.** Data on the amount of precipitation in rains and showers, maximum gusts of wind on the night on June 6 and during the day on June 20, 2024 in the Moscow region

| Метеостанции      | 6.06.2024   |               |                                    | 20.06.2024  |               |                                    |
|-------------------|-------------|---------------|------------------------------------|-------------|---------------|------------------------------------|
|                   | СЛ,<br>мм/ч | СД,<br>мм/12ч | Порывы<br>ветра при<br>шквале, м/с | СЛ,<br>мм/ч | СД,<br>мм/12ч | Порывы<br>ветра при<br>шквале, м/с |
| МС МГУ            |             | 36            |                                    |             | 19            | 14                                 |
| МС Тушино         |             |               |                                    |             | 16            |                                    |
| АМС ТСХА          | 23          | 27            | 11                                 |             | 15            | 19                                 |
| МС ВДНХ           | 49          | 53            | 19                                 | 15          | 17            |                                    |
| АМСГ Внуково      |             |               |                                    |             |               | 23                                 |
| МС Клин           |             |               |                                    |             | 36            |                                    |
| МС Волоколамск    |             |               |                                    |             | 24            | 14                                 |
| МС Ново-Иерусалим |             |               |                                    | 24          | 30            | 17                                 |
| МС Можайск        |             |               |                                    | 16          | 21            | 16                                 |
| МС П. Посад       |             |               |                                    |             | 15            | 17                                 |
| МС Дмитров        |             |               |                                    | 16          | 24            | 15                                 |
| АМС Мячково       |             |               |                                    |             | 20            | 22                                 |
| АМС Озеры         |             |               |                                    |             |               | 26                                 |
| АМС Рогачево      |             |               |                                    |             | 31            | 13                                 |
| МС Серпухов       |             |               |                                    | 16          |               | 20                                 |
| АМС Солнечногорск |             |               |                                    |             | 39            | 13                                 |
| АМС Чашниково     |             |               |                                    | 18          |               | 15                                 |
| АМС Щекино        |             |               |                                    |             | 32            | 16                                 |
| МС Талдом         |             |               |                                    |             | 36            | 13                                 |

*Примечание.* СЛ – сильный ливень; СД – сильный/очень сильный дождь.

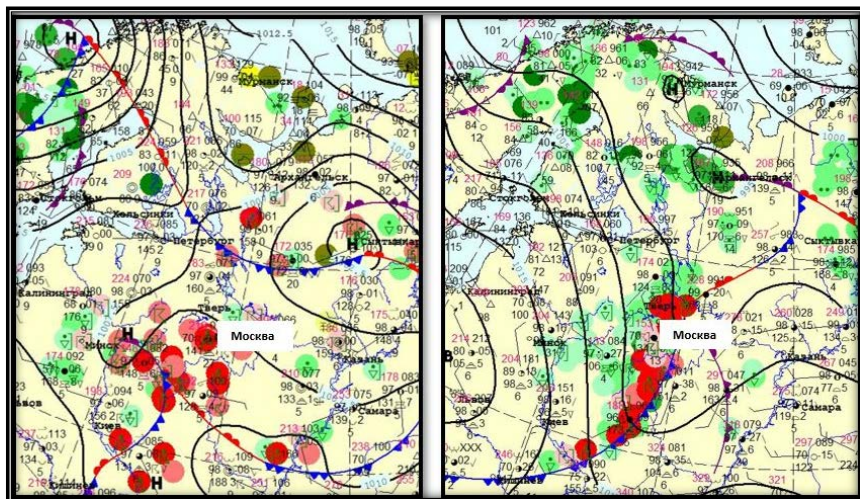


**Рис. 1.** Фрагменты кольцевых карт погоды с приземным анализом атмосферных фронтов: 05.06.2024 за 18 ч МСК (слева) и 20.06.2024 за 15 ч МСК (справа). Линиями показаны: черным цветом – приземные изобары, синим – холодный фронт, красным – теплый фронт, фиолетовым – фронт окклюзии по типу теплового.

**Fig. 1.** Fragments of ring weather maps with surface analysis of atmospheric fronts: on June 05, 2024 for 18 Moscow time (left) and on June 20, 2024 for 15 Moscow time (right). Lines show: black – surface isobars, blue – cold front, red – warm front, purple – occluded front of warm type.

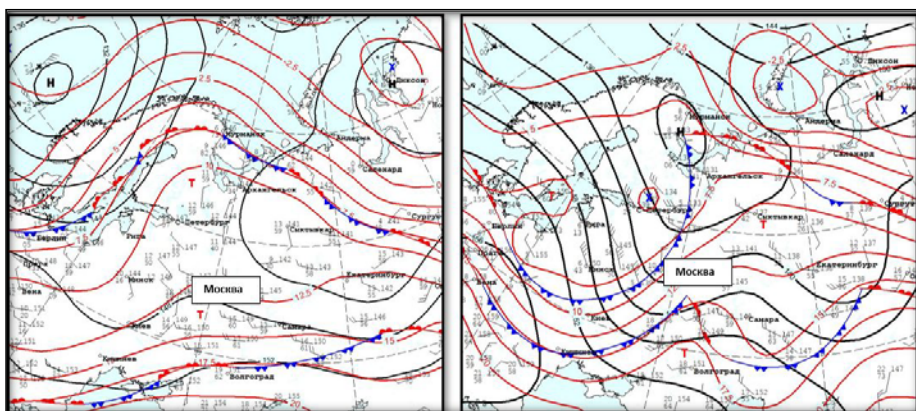


**Рис. 2.** Фрагменты карт AT-850 за 15 ч МСК с фронтальным анализом: 05.06.2024 (слева) и 20.06.2024 (справа). Цветные линии: черные – изогипсы; красные – изотермы; черные стрелки с оперением – скорость ветра, где палочка – 5 м/с, треугольник – 25 м/с; линии атмосферных фронтов: синий цвет – холодный; красный цвет – теплый.

**Fig. 2.** Fragments of AT-850 maps for 15 Moscow time with frontal analysis: on June 05, 2024 (left) and on June 20, 2024 (right). Colored lines: black – isohypses; red – isotherms; black arrows with feathers – wind speed, where 1 stick – 5 mps, triangle – 25 mps; lines of atmospheric fronts: blue – cold; red – warm.

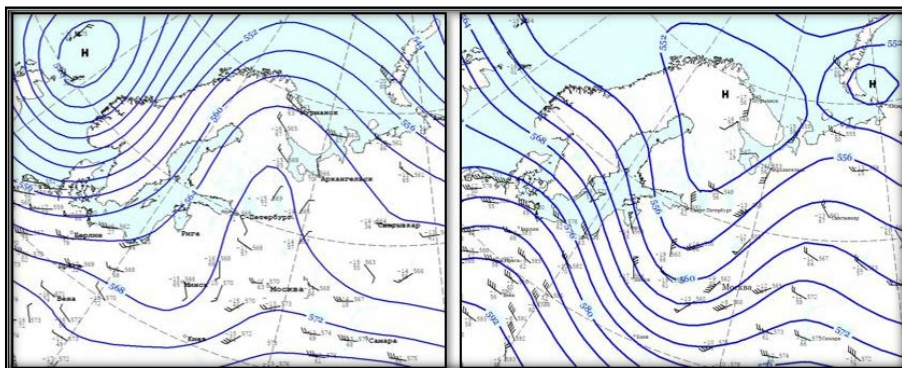


**Рис. 3.** Фрагменты карт АТ-500 за 15 ч МСК: 05.06.2024 (слева) и 20.06.2024 (справа). Синим цветом нанесены изогипсы; черные стрелки с оперением – скорости ветра, где палочка – 5 м/с, треугольник – 25 м/с.

**Fig. 3.** Fragments of AT-500 maps for 15 Moscow time: on June 05, 2024 (left) and on June 20, 2024 (right). Isohypsers are shown in blue; black arrows with feathers are wind speeds, where 1 stick is 5 mps, triangle is 25 mps.

Таким образом, можно сделать вывод, что прогнозирование максимального количества осадков и максимальных порывов ветра, при хорошо выраженных значительных контрастах на атмосферных фронтах в приземных и высотных барических полях, несколько проще, чем при внутримассовых процессах, развивающихся в малоградиентных полях и дополнительно сильно зависящих от местных локальных условий (географических, термических, таких как влияние мегаполиса на процессы развития или диссипации мощной конвективной облачности).

### Численные прогнозы на 5–6 и 20 июня 2024 года

Ниже приведен сравнительный анализ по случаям 5–6 и 20 июня 2024 г. расчетов численных моделей, используемых в Гидрометцентре России для оперативных прогнозов по Московскому региону, в графическом и картографическом представлении по максимальным порывам ветра и суммарным осадкам. Выбраны прогнозы по пунктам с максимальными фактическими порывами ветра по московскому мегаполису (рис. 4). 20 июня порывистый ветер в Московском регионе был хорошо спрогнозирован даже по п. Внуково, где максимальные порывы ветра при неустойчивых синоптических ситуациях (например, прохождение фронтальных разделов) практически всегда завышены относительно московского мегаполиса [12]. По фактическим данным наземных метеостанций, включая автоматические, общий фон порывов ветра был в пределах 13–20 м/с, локально по АМС 22–26 м/с (см. табл. 1). Точнее всех численный прогноз отмечен у модели COSMO-Ru с пространственным разрешением 2 км – до 21 м/с, по комплексному прогнозу Гидрометцентра России – до 18 м/с, по модели ICON-EU7 – до 17 м/с. Время максимальных порывов ветра также

хорошо рассчитано представленными численными прогнозами (середина дня).

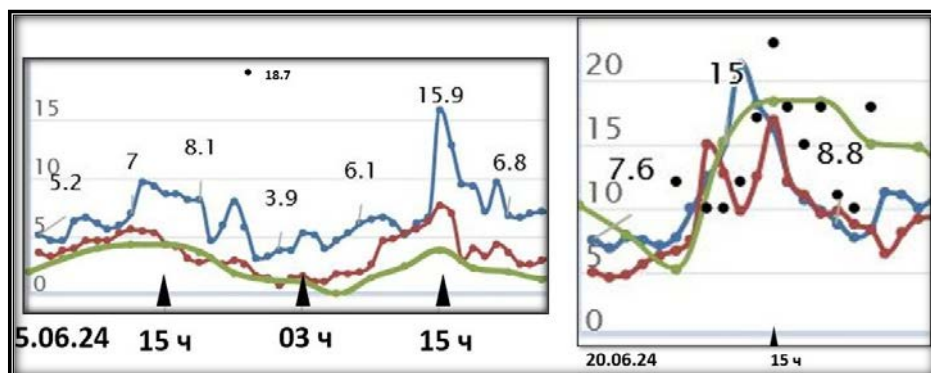


**Рис. 4.** Графическое представление численных расчетов максимальных порывов ветра от счета 03 ч МСК по МС ВДНХ 05–06.06.2024 (слева) и п. Внуково 20.06.2024 (справа): COSMO-Ru2; ICON-EU7; комплексный прогноз. Прогностические порывы ветра: синяя линия – COSMO-Ru2; красная – ICON-EU7; зеленая – комплексный прогноз; «жирные» точки – фактические порывы ветра. Временная шкала дана в МСК.

**Fig. 4.** Graphical representation of numerical calculations of maximum wind gusts of models from the 03 Moscow time count on June 05, 2024 and 20, 2024: COSMO-Ru2; ICON-EU7; comprehensive forecast for the VDNH (left) and Vnu-kovo (right) points. Colored lines are forecast wind gusts: blue – Cosmo-Ru2; red – ICON-EU7; green – comprehensive forecast; "bold" dots are actual wind gusts. The time scale is given in Moscow time.

На рис. 5 представлены для наглядности фрагменты прогностических карт «Линии тока и порывы ветра» модели COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК на 12–15 ч МСК для 20.06.2024, где прослеживается усиление порывов ветра при прохождении холодным атмосферным фронтом Московского региона. Модель правильно отразила фоновый ветер 17–20 м/с, местами до 22 м/с, по области до 25 м/с. Однако время максимальных порывов спрогнозировано на 2 часа раньше, чем они реализовались по факту, что связано, видимо, с ускорением процесса прохождения холодного атмосферного фронта. По картам видно, что наиболее сильные ветры модель спрогнозировала в Центральном федеральном округе, где наблюдались более высокие температуры воздуха (до 32 °С) и, соответственно, при прохождении холодного контрастного атмосферного фронта реализовались более сильные порывы.

На рис. 6 представлены фрагменты прогностических карт «Суммы осадков за 1 час» модели COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК с 12 до 15 ч МСК для 20.06.2024, показывающие изменение часовых сумм осадков по Московскому региону при прохождении холодного атмосферного фронта. Можно также отметить (см. табл. 1), что модель правильно спрогнозировала основную градацию осадков 15–20 мм (в градации «сильные» для

московского мегаполиса), с локальными максимумами по области порядка 30 мм (фактически по данным, включая АМС, до 39 мм/12ч).

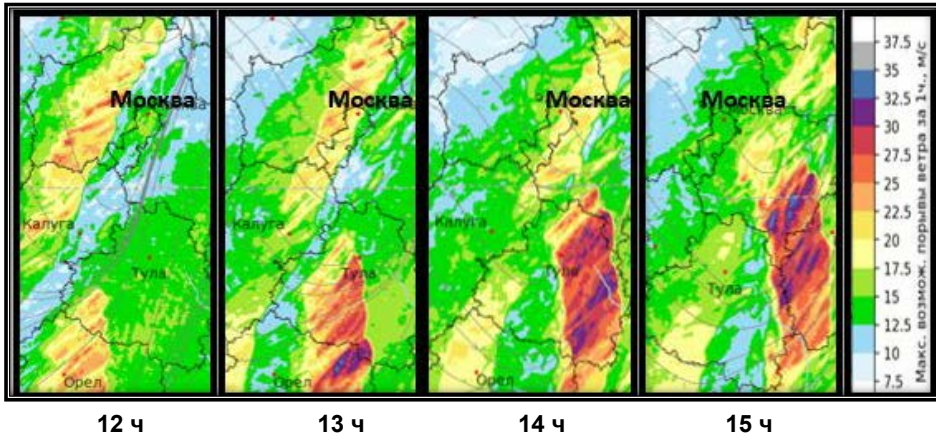


**Рис. 5.** Фрагменты карт «Линии тока и приземные порывы ветра» COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК 20.06.2024 за последовательные ежечасные сроки с 12 до 15 ч МСК. Величина порывов определяется по цветовой шкале.

**Fig. 5.** Fragments of maps of streamlines and surface wind gusts (mps) of the COSMO-Ru2 model from the count of 03:00 Moscow time on June 20, 2024 for successive hourly periods from 12:00 to 15:00 Moscow time. The magnitude of the gusts is determined by the color scale.

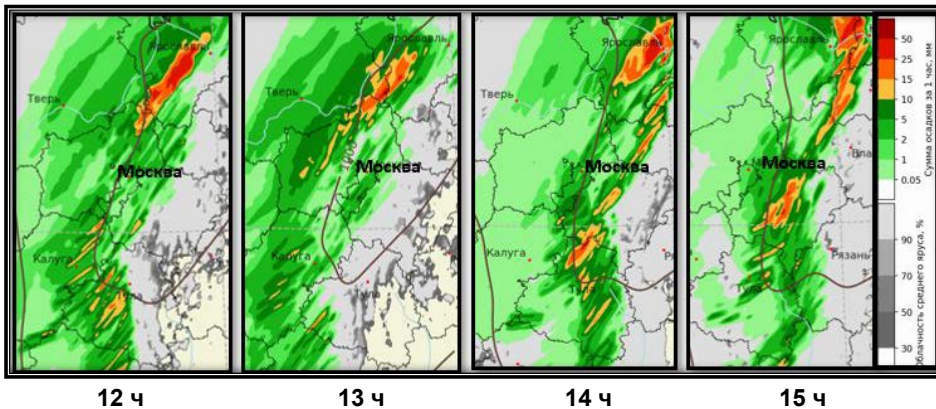


**Рис. 6.** Фрагменты карт «Суммы осадков за 1 час» модели COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК 20.06.2024 за последовательные сроки с 12 до 15 ч МСК. Величина количества осадков определяется по цветовой шкале.

**Fig. 6.** Fragments of hourly precipitation totals (mm) maps of the COSMO-Ru2 model from the count of 03:00 Moscow time on June 20, 2024 for successive periods from 12:00 to 15:00 Moscow time. The amount of precipitation is determined by the color scale.

В случае 5–6 июня из рис. 4 (слева) видно, что все модели «не увидели» локального усиления шквалистого ветра по северу и северо-западу

московского мегаполиса (в районе МС ТСХА и МС ВДНХ), где образовалась мезомасштабная конвективная система [1, 10, 11, 16] с ливнями (23–49 мм/ч) и грозами, вызванная внутримассовой конвекцией, максимально реализовавшейся в начале ночного времени 6 июня. Пространственная локальность этих конвективных процессов не позволила моделям их спрогнозировать. По графикам рис. 4 (слева) видно усиление ветра в районе 15 ч МСК днем 6 июня, что, видимо, связано с вхождением Московского региона в предфронтальную зону холодного атмосферного фронта, влияние которого начало сказываться в постепенном понижении температуры воздуха, что очевидно для моделей. Оперативная практика использования численных прогнозов также подтверждает, что прогноз метеопараметров при процессах фронтального характера в устоявшийся период (холодный/теплый) более понятен и моделям, и синоптикам по порядку их экстремальных величин.

#### **Случай очень сильного дождя, ливня и шквала 5–6 июня 2024 г. в московском мегаполисе (МС ВДНХ)**

Рассмотрим случай 5–6 июня более подробно с привлечение прогнозов конвективных явлений, реализованных на основе данных региональной модели Гидрометцентра России, рассчитывающихся в оперативном режиме и передающихся на прогностическую сеть Центрального федерального округа. Рассмотрим радиолокационные данные, позволяющие уточнить прогноз.

После продолжительной жаркой погоды (с 29 мая по 1 июня 2024 г. максимальная температура воздуха достигала 30–31 °С) и кратковременных дождей, местами с грозами, вечером 5 июня и ночью 6 июня в московском мегаполисе (в районе Старой Москвы) наблюдались сильные и очень сильные дожди и ливни: 27–36 мм, локально «тропический» ливень на МС ВДНХ (49 мм/ч), сопровождавшийся шквалом (19 м/с), и по суммарным осадкам очень сильный дождь (53 мм/12ч). Значительная локализация выпадения этих осадков, как уже указывалось, не позволила моделям спрогнозировать их с суточной заблаговременностью. Карта же суммарных полусуточных осадков (ночь 06.06.2024) по ДМРЛ-С «Внуково» (рис. 7) хорошо отражает «пятнистый» характер выпавших осадков, как по месту выпадения, так и по их количеству: местами по Московскому региону дожди не отмечались совсем, локально диагностировались осадки количеством до 90 мм/12ч (официально ННС отмечены максимумы 27–53 мм/12ч).

Разница в количестве диагностированных осадков объясняется тем, что локатор для расчета интенсивностей и суммарных осадков измеряет радиолокационную отражаемость на высоте 600 м над уровнем установки ДМРЛ-С [13], поэтому сумма диагностированных, достигших земной поверхности осадков может отличаться в сторону уменьшения/завышения в зависимости от удаленности места выпадения осадков от локатора. Кроме

того, ливневые осадки могут вылиться мимо станционного ведра для измерения осадков. Такой разброс в распределении осадков характерен для внутримассовой конвекции, не связанной с активными фронтальными разделениями (рис. 7).

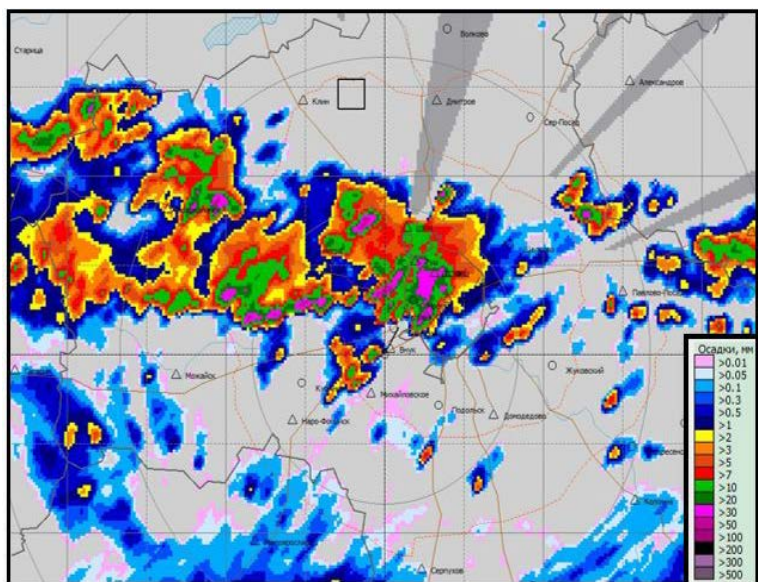


**Рис. 7.** Карта суммарных осадков ДМРЛ-С «Внуково» за ночной период 06.06.2024.

**Fig. 7.** Map of total precipitation DMRL-S "Vnukovo" for the night period on June 06, 2024.

Случай сильного ливня на МС ВДНХ интересен еще и тем, что сопровождался шквалом 19 м/с, необычность возникновения которого заключалась в отсутствии для реализации шквала привычных условий по приземным и высотным барическим полям. Исходя из синоптических условий, давление у земли и в нижней тропосфере представляло малоградиентное поле, на поверхности АТ-500 гПа – высотный гребень. Шквал был отмечен при сильном ливне (рис. 8), диагностированном локатором в момент его максимальной интенсивности (>50 мм/ч в 21 ч 40 мин МСК).

Интересно проследить зарождение «суперячейки», реализовавшей данные явления. По картам явлений и высоты облачности ДМРЛ-С «Внуково» можно проследить характер образования этих явлений, называемый «взрывным». До 17.20 ч МСК по локатору между н/п Истра и н/п Шереметьево (в районе Зеленоградского административного округа Москвы) облачности не наблюдалось; в 17.30 ч МСК появилось быстрорастущее облако высотой до 6 км (за 10 мин высота его вершины достигла 6 км) и длиной не более 3 км; в 17.40 ч МСК оно достигло, по данным локатора,

стадии грозового с вероятностью грозы 70–90 % (что соответствует установленному необходимому признаку грозового облака: вертикальная протяженность облака превышает 4 км и достигнут уровень с температурой  $-22^{\circ}\text{C}$ ) [15, с. 436]. В 19.00 ч МСК облако оформилось в ливне-грозо-градовую ячейку с высотой вершин 11,4 км, протяженностью до 8 км и максимальной отражаемостью  $Z_{\max} = 58 \text{ dBZ}$  на высоте 4–5 км, что теоретически подтвердило значительную мощность кучево-дождевой облачности присутствием «столба» высокой радиолокационной отражаемости (с высоты 2 км и до 6 км максимальная отражаемость по слоям составляла от 55 до 58 dBZ, с максимумом на высоте 5 км) [15, с. 453]. Значит, в данной «суперячейке» присутствовало значительное количество частиц больших размеров, учитывая низкую температуру в облаке, не только в переохлажденном виде, но и в кристаллическом.

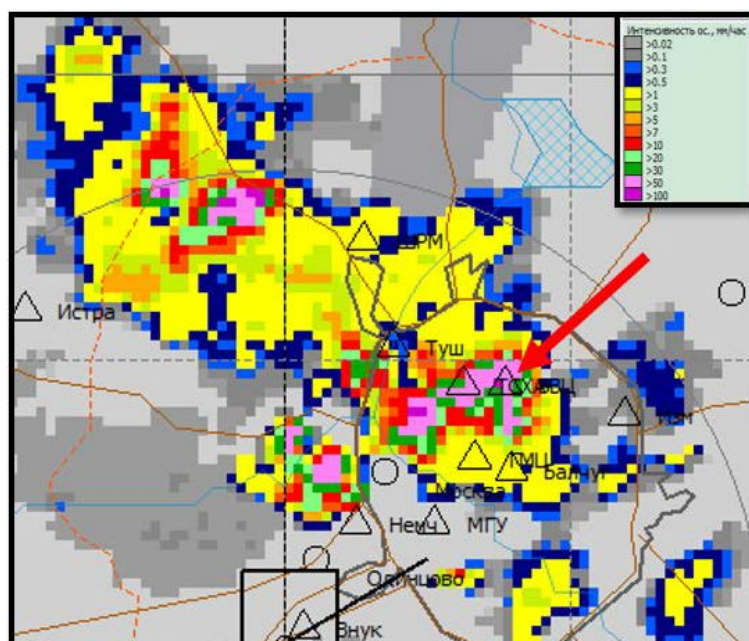


**Рис. 8.** Карта интенсивности осадков ДМРЛ-С «Внуково» 05.06.2024 г. в 21.40 ч МСК.

**Fig. 8.** Precipitation intensity map DMRL-S "Vnukovo" on June 06, 2024 at 21:40 Moscow time.

Далее ячейка, продолжая разрастаться в размерах, в 20.40 ч МСК объединилась с соседними ячейками в единый массив под одной «наковальной» (Si inc.) и к моменту (21.30 ч МСК) реализации сильных ливней (рис. 9) в северной части московского мегаполиса образовалась одна мезомасштабная конвективная система протяженностью около 200 км [1, 10, 11,

16]. Эпицентр сильного ливня пришелся именно на МС ВДНХ, где по произведенным измерениям за один час выпало 49 мм дождя в сопровождении шквалистых порывов ветра 19 м/с.

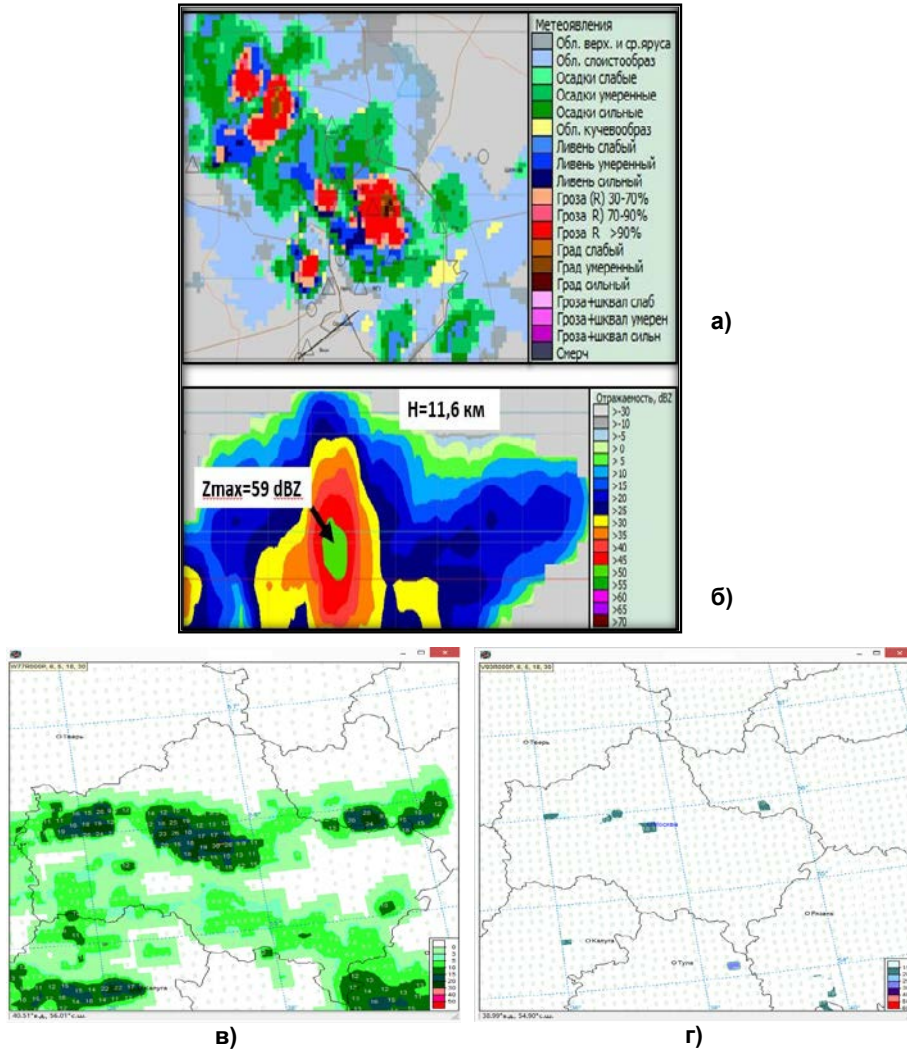


**Рис. 9.** Фрагменты карт 05.06.2024 за 21.30 ч МСК: явлений (а) и вертикальный разрез «супер-ячейки» (б) по данным ДМРЛ-С «Внуково»; диагноза максимальной конвективной скорости, м/с (в) и скорости ветра, м/с, (г) при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования в рамках экспериментальной технологии Гидрометцентра России.

**Fig. 9.** Fragments maps on June 05, 2024 at 21:30 Moscow time: phenomena (a); vertical section of the "super-cell" (б) of the DMRL-S Vnukovo; diagnosis of maximum convective velocity, mps (в) and wind speed, mps, (г) during a squall based on the DMRL-S network data and numerical modeling within the framework of the experimental technology of the Hydrometeorological Center of Russia.

На рис. 9в приведены фрагменты карт диагноза максимальной конвективной скорости [9], на рис. 9г – скорости ветра при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования, полученные в рамках экспериментальной технологии Гидрометцентра России. Как видим, конвективные скорости в зоне активной конвекции в районе МС ВДНХ составляли 28 м/с, а южнее – больше 30 м/с. Кроме того, диагностировался шквал, порывы ветра которого достигали 18–20 м/с.

Исходя из механизма возникновения шквалов [15, с. 527–588], можно предположить, что происходит изменение метеопараметров при формировании шквала, что наглядно показано на рис. 10 (резкое падение давления перед шквалом, резкий его рост при прохождении шквала и падение после прекращения шквала и ливня, обычно сопровождающего шквал).

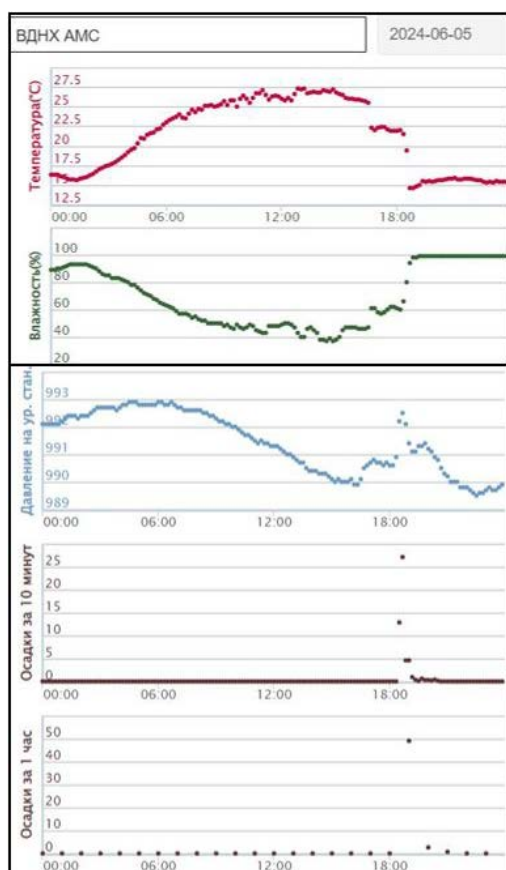


**Рис. 10.** Изменение метеопараметров при формировании шквала 05.06.2024, АМС ВДНХ: температуры воздуха, относительной влажности воздуха, давления на уровне станции, количества осадков за 10 минут и за 1 час.

**Fig. 10.** Fragment of the VDNH AMS data on June 05, 2024 in graphical form: air temperature, relative air humidity, pressure at the station level, amount of precipitation for 10 minutes and for 1 hour.

Это говорит о том, что на МСВДНХ пришлась наиболее интенсивная центральная часть кучево-дождевого облака, аккумулировавшего в себе большую массу воды, при движении которой вниз при прохождении ливневого облака и возникло резкое усиление ветра (шквал).

В районе МСВДНХ около 21.30 ч МСК наблюдалась максимальная высота кучево-дождевой облачности (11,6 км), что превышало тропопаузу (11 км) на 600 м и, соответственно, по радиолокационным критериям [13, с. 93–105] могло идентифицироваться ДМРЛ-С «Внуково» как шквал, но на карте явлений локатора видим только диагностированные сильный град и грозу вероятностью 90 % (рис. 9а). Хотя из практических наблюдений, подтверждаемых Руководством [15, с. 527–588], известно, что сильные нисходящие движения воздуха, вызванные ливневыми осадками из кучево-дождевых облаков, особенно при выпадении града, сопровождаются резким усилением ветра – шквалом. И, как указывалось выше, в рамках экспериментальной технологии диагностики опасных конвективных явлений шквал диагностирован, порывы ветра составляли 18–20 м/с.

Теперь рассмотрим, как были спрогнозированы экстремальные значения осадков на основе данных региональной модели Гидрометцентра России методом, рекомендованным к внедрению в практику решением ЦМКП Росгидромета [3, 8]. На настоящее время пространственное разрешение модели (75 км) значительно проигрывает современным мезомасштабным моделям, но на ее основе ранее был разработан метод прогноза максимального количества осадков, рекомендованный к внедрению. До сих пор прогнозы в оперативном режиме передаются на сеть в летний период года и записываются в базу данных.

Прогнозы визуализированы пакетом визуализации Изограф. По фрагменту карты (рис. 11, слева) прогноза максимального количества осадков от 03 ч МСК на текущий день (до 21 ч МСК) видно, что Московский регион находился между двумя спрогнозированными полями очень сильных осадков, т. е. зон активной конвекции, которые могут реализовывать конвективные явления вплоть до интенсивности ОЯ. В таких случаях синоптику необходимо усиливать бдительность и привлекать для анализа дополнительную информацию (радиолокационную, спутниковую, расчетные конвективные индексы и т. п.).

Здесь надо учитывать, что при данном разрешении прогнозов для уточнения места и интенсивности конвективных явлений нужно переходить к рассмотрению прогнозов на более мелкой сетке, например, на сетке модели COSMO-Ru2 (что будет показано ниже). При рассмотрении результатов прогноза видна правильная тенденция расчета прогноза, выраженная в числовых результатах узлов сетки; с заблаговременностью 30 ч (на ночь 6 июня) спрогнозированы осадки: западный узел – 21 мм/12ч; юго-западный – 33 мм/12ч; южный – 25 мм/12ч (рис. 11, верхняя панель справа). Прогноз со срока 15 ч МСК с заблаговременностью 18 ч (на ночь 6 июня) также подтверждал предыдущий прогноз:

в двух узлах севернее Москвы прогнозировались осадки 11 и 16 мм/12ч, южнее Москвы – 66 и 17 мм/12ч (рис. 11, нижняя панель).

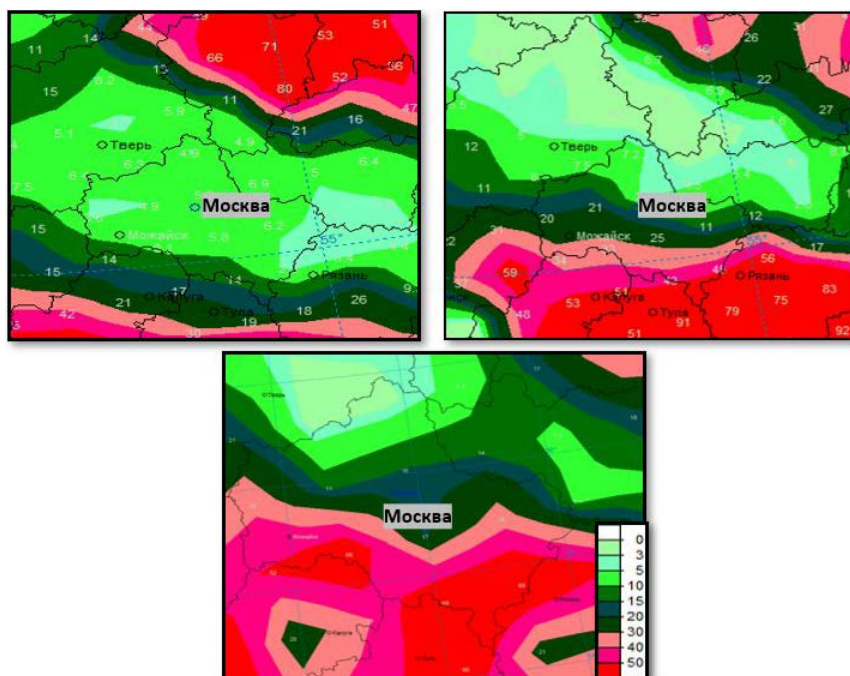


**Рис. 11.** Фрагменты карт максимального количества полусуточных осадков (мм/12ч) оперативного прогноза на основе данных региональной модели Гидрометцентра России от счета 03 ч МСК (верхняя панель) 05.06.2024: на день с заблаговременностью 18 ч (слева) и ночь (06.06.24) с заблаговременностью 30 ч (справа), а также от счета 15 ч МСК на ночь (06.06.24) с заблаговременностью 18 ч (нижняя панель).  
**Fig. 11.** Fragments of maps of the maximum amount of semi-daily precipitation (mm/12h) of the operational forecast based on the data of the regional model of the Hydrometeorological Center of Russia from the count of 03:00 Moscow time (upper panel) on June 05, 2024: for the day with a lead time of 18 hours (left) and night (06.06.24) with a lead time of 30 hours (right), as well as from the count of 15:00 Moscow time for the night (06.06.24) with a lead time of 18 hours (lower panel).

Анализ карт накопленных осадков за 1 час по экспериментальной технологии диагноза параметров конвекции, явлений и их интенсивности на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования, разработанной в Гидрометцентре России [9], показывает, что, начиная со срока 19.00 ч МСК рядом с Москвой образовались зоны повышенных ежечасных осадков, в срок 20.00 ч МСК зона практически в Москве. Карты интенсивности осадков с детализацией 10 минут также показывают, что в 20.10 ч МСК зона юго-восточнее Москвы достигала интенсивности осадков 12 мм/ч,

в 20.40 ч МСК зона на северо-западе достигла интенсивности 15–25 мм/ч. Интенсивность осадков, как и подобает согласно физике развития конвективного процесса, пульсировала, то ослабляясь, то возрастая. В 21.20 ч МСК зона практически накрыла Москву, интенсивность осадков составила 18–19 мм/ч, в 21.30 ч МСК – уже 20–24 мм/ч, в 21.40 ч МСК – опять снизилась до 18–19 мм/ч. На рис. 12 представлены фрагменты карт интенсивности осадков за срок 21.40 ч МСК и накопленных ежечасных осадков за период от 21 до 22 ч МСК.

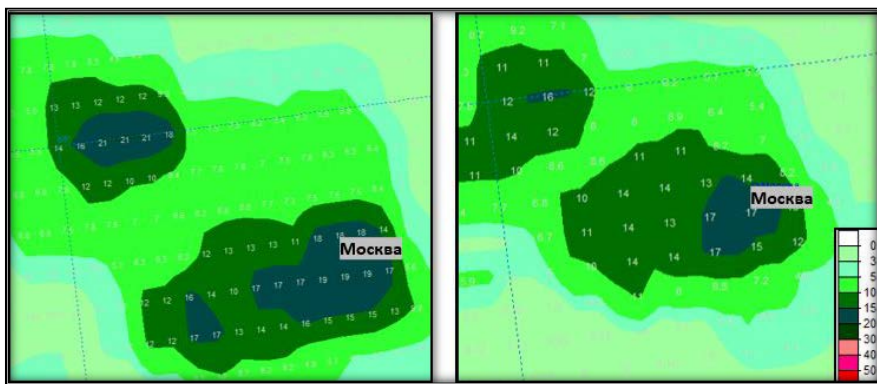


**Рис. 12.** Фрагменты карт осадков по радиолокационному диагнозу в рамках экспериментальной технологии Гидрометцентра России от 05.06.2024: в 21:40 ч МСК интенсивности осадков, мм/ч, (слева) и в 22 ч МСК накопленных ежечасных осадков, мм/ч (справа). Количество и интенсивность осадков даны в цветовой шкале и цифровых значениях.

**Fig. 12.** Fragments of precipitation maps based on radar diagnosis within the framework of the experimental technology of the Hydrometeorological Center of Russia from on June 05, 2024: at 21.40 Moscow time intensity (left) and at 22:00 Moscow time accumulated hourly (right). The amount and intensity of precipitation are given in a color scale and digital values.

Последовательный анализ карт, представленных в статье выборочно по срокам, близким к реализации фактического экстремального значения осадков на МС ВДНХ (в период 21.30 – 22 ч МСК) в количестве 49 мм/ч, показывает образование зоны интенсивных осадков (до 20–24 мм/ч, срок 21.30 ч МСК) и повышенных накопленных ежечасных осадков рядом с Москвой начиная со срока 20 ч МСК и до 22 ч МСК и дальнейшим снижением интенсивности осадков.

Анализ карт шквалов, включая карты максимальных порывов ветра при шквалах, полученных также по радиолокационному диагнозу в рамках экспериментальной технологии [4–6], показывает, что в период 21.20 – 21.40 ч МСК в Москве и на ближайшем расстоянии от нее диагностированы шквалы с порывами ветра 18 м/с. В 21.50 ч МСК зона с выявленными шквалами резко сократилась, а в 22.00 ч МСК уже не диагностировалась, что еще раз подтвердило локальность процесса в Москве. На рис. 13 представлены зоны со шквалами за сроки от 21.40 до 22.00 ч МСК. Таким

образом, зоны со шквалами, диагностированные по экспериментальной технологии, показали близкие по величине порывы ветра при шквале в сравнении со сроком реализации фактического шквала 19 м/с на МСВДНХ в 21.40 ч МСК. После 22.00 ч МСК зона, уменьшившись в размерах, отошла от Москвы.

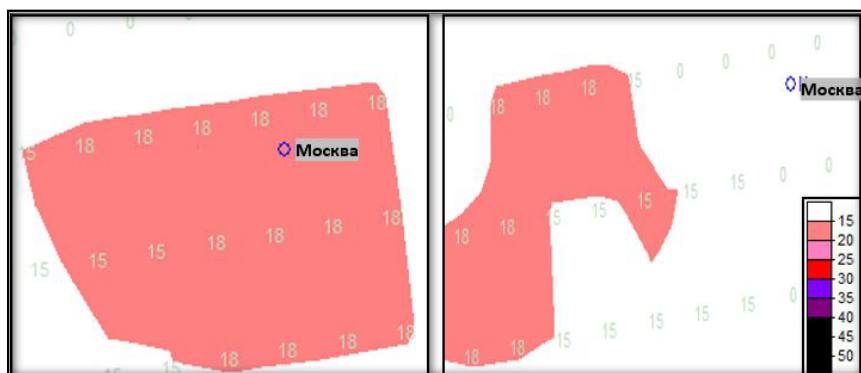


**Рис. 13.** Фрагменты карт скорости порывов ветра при шквалах (м/с) по радиолокационному диагнозу на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования в рамках экспериментальной технологии от 05.06.2024: 21.40 ч МСК (слева) и 22.00 ч МСК (справа). Численные значения максимальных порывов ветра при шквалах даны по цветовой шкале и в цифровых значениях.

**Fig. 13.** Fragments of speed maps (m/s) of wind gusts during squalls according to radar diagnosis based on DMRL-S network data and numerical modeling within the framework of experimental technology on June 05, 2024: at 21:40 Moscow time (left) and at 22:00 Moscow time (right). Numerical values of maximum wind gusts during squalls are given on a color scale and in digital values.

Исходя из представленных выше результатов можно сделать вывод, что оперативный прогноз максимального количества ливневых осадков на основе данных региональной модели Гидрометцентра России, несмотря на довольно грубое пространственное разрешение на сегодняшний день, правильно ориентировал на прогноз зон активной конвекции с интенсивными осадками и шквалами. Радиолокационный диагноз как осадков, так и шквалов в рамках экспериментальной технологии хорошо обнаруживает экстремальные значения осадков и порывов ветра. Результаты исследований еще раз показали, что в случаях сложности прогнозирования локальной конвекции рекомендуется в обязательном порядке переходить к мониторингу явлений и их интенсивности как по ближайшему к точке прогноза локатору, так и по радиолокационному диагнозу в рамках экспериментальной технологии. При возникновении угрозы возникновения опасных конвективных явлений необходимо разрабатывать штормовое предупреждение по зоне ответственности прогноза с учетом данных локаторов.

Хочется еще показать, как правильно использовать численную продукцию модели высокого разрешения COSMO-Ru2 при прогнозе конвективных явлений в летний период, особенно при угрозе возникновения явлений в градации ОЯ. Необходимо обязательно просматривать картографическую продукцию модели в случае, когда при грозовой деятельности спрогнозировано конвективное явление незначительной интенсивности (порывы ветра, интенсивность осадков). При этом следует проанализировать другие спрогнозированные сопутствующие факторы, например, наличие и значение конвективных индексов (молниевое потенциала, STP, SDI и т. п.) на картах в зоне ответственности прогноза, даже если при их интерпретации нельзя сказать о возникновении интенсивных конвективных явлений, так как может существовать вероятность повышения интенсивности конвективного явления при учете дополнительных факторов. Приведенный пример прогностической картографической продукции модели COSMO-Ru2 по количеству осадков и величине порывов ветра для 6 июня (рис. 14) наглядно показывает, что даже такая незначительная локализация конвективных явлений (слабых и умеренных) может привести к развитию интенсивных конвективных явлений в градации ОЯ.

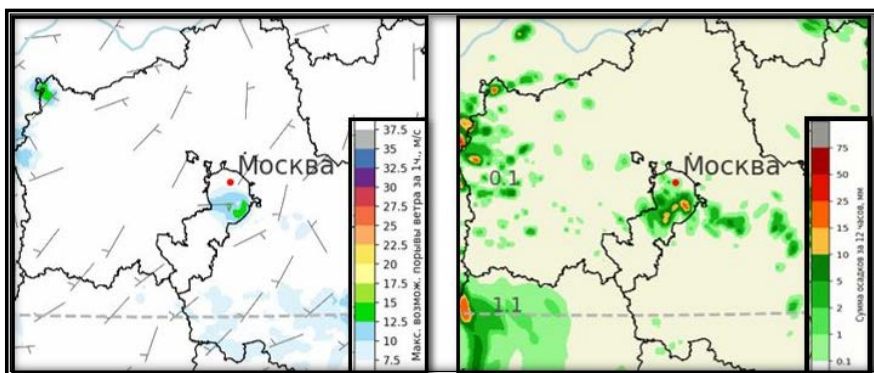


**Рис. 14.** Фрагменты прогностических карт модели COSMO-Ru2.2 от 03 ч МСК 05.06.2024: приземных порывов ветра, м/с, в 20 ч МСК (слева) и суммарного количества осадков, мм/12ч, в 21 ч МСК (справа). Выбраны сроки с прогнозируемыми максимальными значениями параметров, близкие к фактическому сроку реализации явлений.

**Fig. 14.** Fragments of forecast maps of the COSMO-Ru2.2 model from 03:00 Moscow time on June 05, 2024: surface wind gusts (mps) at 20:00 Moscow time (left) and total precipitation (mm/12h) at 21:00 Moscow time (right). The periods with predicted maximum values of parameters, close to the actual time of the phenomena, were selected.

В данном случае модель спрогнозировала вероятность количества осадков и максимальных порывов ветра в градации «сильные» (до 15 мм/12ч и 15 м/с) с некоторыми отклонениями: по расстоянию не более 30 км и по времени не более 1.5 ч, что для использования в оперативном прогнозе вполне приемлемо. В примере (рис. 14) приведены фрагменты



прогнозируется многими моделями, сложности могут быть лишь в определении количества осадков в градации ОЯ («очень сильные») и максимальных порывов ветра, имеющих локальный характер, вызванный местными условиями (чаще всего географического характера). Для COSMO-Ru2, ICON-EU7 и комплексного прогноза Гидрометцентра России по п. Внуково (см. рис. 4 справа) не было трудности прогноза такого процесса. Не составило трудности спрогнозировать процесс и методами прогноза сильных ливней и шквалов на основе данных региональной модели Гидрометцентра России [2, 6, 7] с уже не отвечающим современным требованиям пространственным разрешением. Прогнозы представлены на рис. 15. Видим, что с большей заблаговременностью прогнозировались ливни и шквалы большей интенсивности.

На рис. 16 и 17 представлены карты и фрагменты карт радиолокационного мониторинга в рамках экспериментальной технологии диагностики опасных конвективных явлений погоды в летний период года. Карты наглядно показывают возможности технологии на примере случая 20.06.2024: максимальные конвективные скорости (м/с) за срок 10.30 ч ВСВ и количество осадков за дневной период (мм/12ч) 20.06.2024, диагностированные также в рамках экспериментальной технологии (рис. 16); карты скорости порывов ветра при шквалах по ЕТР, поступающие синоптикам в оперативном режиме, и фрагменты карт скорости порывов ветра с уточнением максимальной скорости порывов ветра по Московскому региону, визуализированные пакетом Изограф, для наглядности за сроки 09.30 и 10.30 ч ВСВ, близкие к моменту фактических шквалов представлены на рис. 17.

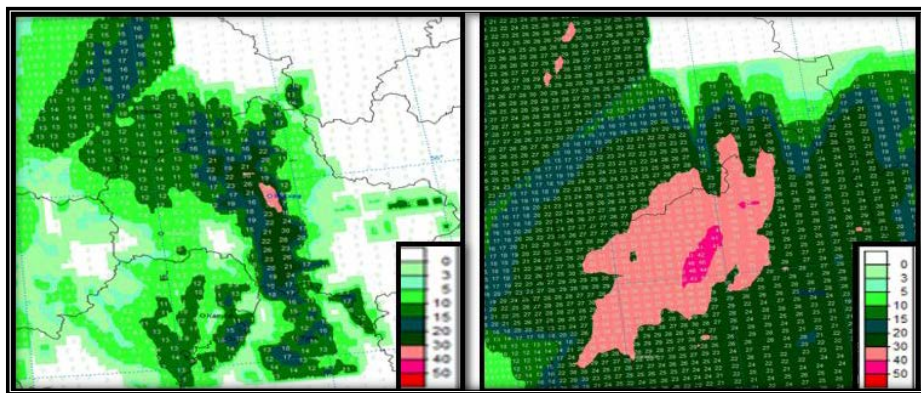


**Рис. 16.** Фрагменты карт 20.06.2024: максимальной конвективной скорости, м/с (слева); количества осадков, мм/12ч, за дневной период 09–21 ч МСК (справа).

**Fig. 16.** Fragments of maps on June 20, 2024: maximum convective velocity (mps) on the left and precipitation amount (mm/12h) for the daytime period 09–21 Moscow time (on the right).

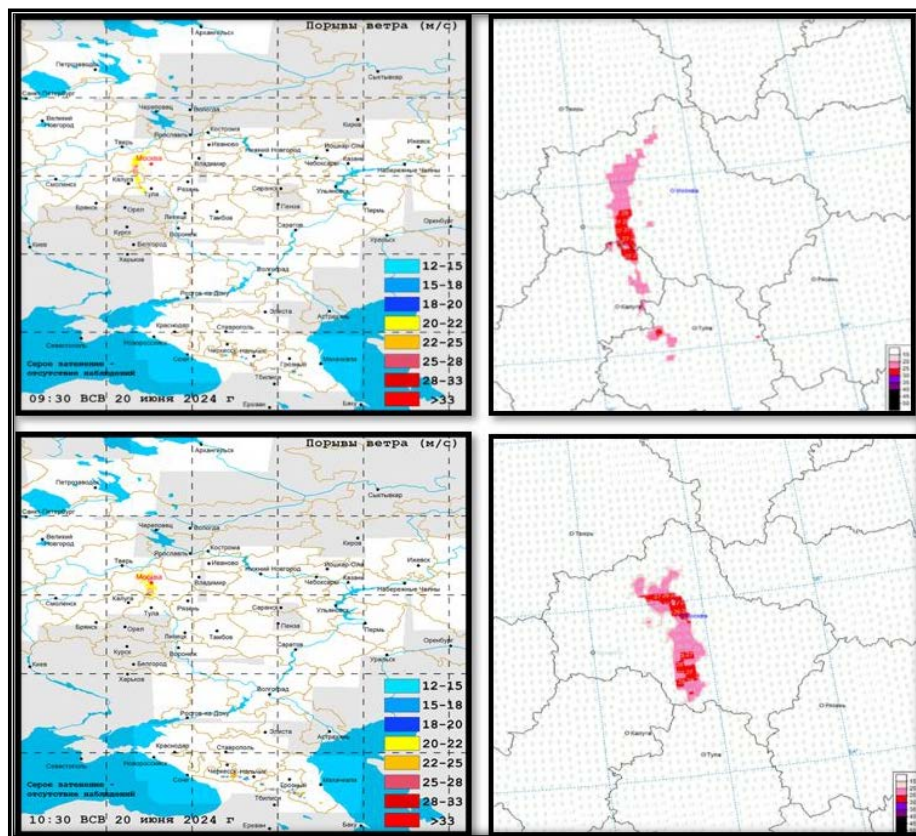


**Рис. 17.** Карты по ЕТР и фрагменты карт по Московскому региону диагностики скорости порывов ветра при шквале 20.06.2024: поступающие в оперативном режиме (слева), визуализированные пакетом Изограф (справа) за сроки 09.30 и 10.30 ч ВСВ, близкие к фактическим шквалам.

**Fig. 17.** Maps for the ETR and fragments of maps for the Moscow region of diagnostics of wind gust speed during the squall on June 20, 2024: on the left, received in real time, on the right, visualized by the Izograf package, for the periods of 09:30 and 10:30 UTC, close to the actual squalls.

## Выводы

Анализ процессов и результатов расчетов численных прогнозов моделей по представленным в сравнении случаям опасных конвективных явлений 5–6.06.2024 и 20.06.2024 показал сложность прогноза 5–6 июня, связанную с локальностью порождающих их процессов, как по площади охвата, так и во временном масштабе. Опасные конвективные явления (ливни и шквалы) при подобных процессах могут быть спрогнозированы в первом приближении по результатам автоматизированных прогнозов на основе данных региональной модели Гидрометцентра России несмотря на недостаточное на данное время разрешение. Следует заметить, что и

фронтальные случаи этими методами прогнозируются с достаточной точностью. Методы прошли оперативные испытания и были рекомендованы к внедрению решениями ЦМКП Росгидромета. Вероятность возникновения этих явлений для прогноза по своей зоне ответственности нужно уточнять с использованием мезомасштабных моделей, при наличии – лучше COSMO-Ru2, усваивающей данные радиолокаторов. Для выпуска штормового предупреждения о ливнях и шквалах, особенно вызванных процессами внутримассового характера, следует переходить к мониторингу радиолокационной информации с использованием радиолокационного диагноза как ближайшего локатора, так и экспериментальной технологии диагностики параметров конвекции, сильных конвективных явлений (ливней, шквалов и града) и их интенсивности, включая градацию ОЯ.

Нужно учитывать, что подобное штормовое предупреждение при внутримассовом конвективном процессе может быть выпущено не более чем за 1–3 часа до реализации максимальной интенсивности явления. При этом нужно обращать внимание на скорость «созревания» такой зоны активной конвекции или суперячейки, при этом, соответственно, анализировать высоту и водность облака, интенсивность осадков и возможность их дальнейшего роста, использовать возможности анимации диагностированных продуктов экспериментальной технологии диагностики за последние 2 часа. По наблюдениям за конвективными процессами на практике и учету эмпирической зависимости [14] известно, что если в течение последующих 10 минут от момента наблюдения высота кучево-дождевого облака увеличивается, то, соответственно, увеличивается мощность процесса и усиливается интенсивность явлений, сопутствующих ему. Только учитывая всю совокупность классических общепринятых подходов и современного инструментария, прогнозов численных моделей и методов, радиолокационного мониторинга отдельных локаторов и сети ДМРЛ-С возможен достаточно точный прогноз и выдача своевременных штормовых предупреждений об опасных конвективных явлениях.

### Список литературы

1. Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем // Метеорология и гидрология. 2009. № 5. С. 34-44.
2. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
3. Алексеева А.А. Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2007. Информационный сборник № 34. С. 49-69.
4. Алексеева А.А., Бухаров В.М. Идентификация порывов ветра при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 2 (392). С. 25-50.
5. Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 6-23.

6. Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров В.М. Прогноз сильных шквалов на Европейской территории России и их идентификация доплеровскими радиолокаторами // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 47-64.
7. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С.127-143.
8. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 43-63.
9. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.
10. Вельтицев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 126 с.
11. Вельтицев Н.Ф. Теория мезомасштабных конвективных систем в атмосфере, наблюдаемых с искусственных спутников Земли: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр СССР, 1979.
12. Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Васильев А.А. Особенности прогноза максимальных порывов ветра у земли в холодный период года на примере московского региона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 2 (392). С. 51-63.
13. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М.: Росгидромет, 2019. 126 с.
14. Песков Б.Е. Расчет максимальной высоты верхней границы кучево-дождевых облаков с учетом вовлечения в различных синоптических условиях // Труды ВГИ. 1968. Вып. 11. С. 109-119.
15. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 704 с.
16. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды: Учебное пособие. СПб.: Изд. РГГМИ, 1996. 306 с.

## References

1. Abdullaev, S.M., Zhelnin, A.A., Lenskaya, O.Y. Life cycle of mesoscale convective systems. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2009, vol. 34, pp. 285-292. DOI: 10.3103/S1068373909050033.
2. Alekseeva A.A. A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.
3. Alekseeva A.A. Metody prognoza maksimal'nogo kolichstva osadkov v zonah aktivnoy konveksii i al'ternativnogo prognoza sil'nykh livney i shkvalov. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. 2007. Informatsionnyy sbornik № 34, pp. 49-69 [in Russ.].
4. Alekseeva A.A., Bukharov V.M. Identification of wind gusts during a squall from the DMRL-C network and numerical modeling data. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 392, no.2, pp. 25-50 [in Russ.].
5. Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M. Diagnosis of severe squalls based on the data of DMRL-C Doppler weather radars and numerical modeling. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no. 3, pp. 6-23 [in Russ.].
6. Alekseeva A.A., Vasil'ev E.V., Bukharov V.M. Forecast of severe squalls in the European part of Russia and their identification by Doppler weather radars. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 47-64 [in Russ.].
7. Alekseeva A.A., Losev V.M. Forecast of severe convective weather events in summer. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 127-143 [in Russ.].

8. Alekseeva A.A., Losev V.M. Forecast of heavy summer precipitation based on the output of a regional model of the Hydrometcenter of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 43-63 [in Russ.].

9. Alekseeva A.A., Peskov B.E. Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].

10. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. Mezometeorologicheskie protsessy: Uchebnoe posobie. Moscow, Geograficheskiy fakul'tet MGU, 2007, 126 p. [in Russ.].

11. Vel'tishchev N.F. Teoriya mezomasshtabnykh konvektivnykh sistem v atmosfere, nablyudaemykh s iskusstvennykh sputnikov Zemli: Diss. ... d-ra fiz.-mat. nauk. Moscow, Gidromettsentr SSSR, 1979 [in Russ.].

12. Dmitrieva T.G., Smirnov A.V., Vasil'ev E.V. Peculiarities of forecasting maximum surface wind gusts in the cold season: A case study for the Moscow region. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 392, no. 2, pp. 51-63 [in Russ.].

13. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike. Tret'ya redakciya, Moscow, 2019, 126 p. [in Russ.].

14. Peskov B.E. Raschet maksimal'noy vysoty verkhney granitsy kuchevo-dozhdevykh oblakov s uchetom вовлечения в различных sinopticheskikh usloviyakh. *Trudy VGI*, 1968, Vyp. 11, pp. 109-119 [in Russ.].

15. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' I. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

16. Rusin I.N., Tarakanov G.G. Sverhkratosrochnye prognozy pogody: Uchebnoe posobie. SPb.: Izd. RGGMI, 1996, 306 p. [in Russ.].

*Поступила 28.10.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 28.10.2024; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-118-130>

УДК 551.466.31

## **Анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива (Охотское море)**

**С.А. Мысленков<sup>1,2,3,4</sup>, В.М. Пищальник<sup>5</sup>, А.А. Кондрашов<sup>6</sup>,  
О.В. Купцова<sup>2</sup>, В.С. Архипкин<sup>1,2</sup>, Е.М. Латковская<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия;

<sup>3</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;

<sup>4</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской академии наук, г. Москва, Россия;

<sup>5</sup> Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения РАН, Южно-Сахалинск, Россия;

<sup>6</sup> Институт океанологии имени П.П. Шириова  
Российской академии наук, Атлантическое отделение, г. Калининград, Россия  
[stasocean@gmail.com](mailto:stasocean@gmail.com)

Представлен анализ измерений уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива, выполненных при помощи датчиков гидростатического давления в июне–августе 2023 года на заякоренных станциях на глубинах 10 и 15 м. Данные гидростатического давления при анализе ветровых волн корректировались с учетом теории линейного затухания колебаний с глубиной. Общий размах колебаний уровня моря составил 1.63 м в сизигию и 0.3 м в квадратуру. Максимальная высота значительных волн составила 1.73 м, а максимальная высота индивидуальной волны – 2.82 м. Обнаружено присутствие аномальных волн с индексом аномальности более 2. При сопоставлении высоты волн по результатам моделирования с данными измерений получено, что коэффициент корреляции составляет 0.84, а среднеквадратическая ошибка 0.17 м.

**Ключевые слова:** измерения уровня моря, измерение высоты волн, Охотское море, залив Анива, ветровое волнение, аномальные волны

## **Analysis of sea level measurements and wind wave parameters in Aniva Bay (Sea of Okhotsk)**

**S.A. Myslenkov<sup>1,2,3,4</sup>, V.M. Pishchalnik<sup>5</sup>, A.A. Kondrashov<sup>6</sup>,  
O.V. Kuptsova<sup>2</sup>, V.S. Arkhipkin<sup>1,2</sup>, E.M. Latkovskaya<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

<sup>2</sup> Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;

<sup>3</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

<sup>4</sup> A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

<sup>5</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch  
Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;

<sup>6</sup> Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Atlantic Branch,  
Kaliningrad, Russia  
[stasocean@gmail.com](mailto:stasocean@gmail.com)

The paper presents an analysis of measurements of sea level and parameters of wind waves in Aniva Bay, performed using hydrostatic pressure sensors in June–August 2023. Measurements were carried out at mooring stations at depths of 10 and 15 m. Hydrostatic pressure data in the analysis of wind waves were adjusted taking into account the linear theory. The total range of sea level fluctuations was 1.63 m in syzygy and 0.3 m in quadrature. The maximum of significant wave height was 1.73 m, and the maximum height of an individual wave was 2.82 m. The presence of anomalous waves with an anomaly index of more than 2 has been detected. When comparing the wave height according to the simulation results with the measurement data, it was found that the correlation coefficient is 0.84, and the RMS error is 0.17 m.

*Ключевые слова:* sea level measurements, wind wave measurement, Sea of Okhotsk, Aniva Bay, wind waves, abnormal waves

## Введение

Залив Анива расположен в южной части острова Сахалин и является северной частью пролива Лаперуза. В проливе происходит взаимодействие вод Охотского и Японского морей. Залив Анива имеет важное экономическое, транспортное и рыбохозяйственное значение, также здесь расположены различные гидротехнические сооружения, такие как морской порт Корсаков и терминал по отгрузке нефти и сжиженного природного газа в порту Пригородное [15]. Также залив Анива является перспективной акваторией для развития марикультуры [18]. С 2022 года в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по созданию карбоновых полигонов в Сахалинской области функционирует карбоновый полигон «Сахалин». На полигоне проводятся исследования потоков парниковых газов. Карбоновый полигон имеет морские площадки, которые расположены в заливе Анива. При воздействии ветрового волнения в прибрежной зоне Охотского моря нередко наблюдаются выбросы макрофитов, что в свою очередь должно учитываться при оценках ежегодного объема поступающего биоматериала, скорости его утилизации и эмиссии парниковых газов. Некоторые результаты по анализу гидрохимической структуры вод и объемов штормовых выбросов макрофитов в заливе Анива приведены в [2, 12, 23].

Ветровое волнение во многом определяет интенсивность перемешивания верхнего слоя вод, энергетический и газовый обмен между океаном и атмосферой, поэтому данные о параметрах волнения в заливе Анива необходимы также для расчетов, связанных с оценками суммарного потока парниковых газов, в том числе при использовании гидродинамических и биогеохимических моделей.

Подробный анализ параметров ветровых волн в заливе Анива по данным прибрежных станций Корсаков и Новиково приведен в работе [16]. Описание ветрового волнения по данным моделирования представлено в работе [22]. Существуют работы, посвященные исследованию ветровых волн в других районах Сахалинской области на основе данных измерений

датчиками гидростатического давления [8, 10], часть работ описывает проявление волн-убийц [11, 17]. Ветровое волнение также необходимо учитывать при моделировании штормовых нагонов в Охотском море, которые периодически наблюдаются в заливе Анива [4, 6] и являются угрозой для гидротехнических сооружений.

Залив Анива имеет размеры приблизительно 100 на 100 км и длину береговой линии около 230 км (рис. 1). Глубины в северной части залива составляют 20–50 м, в южной части до 100 м. В северо-восточной части залива в июне 2023 года были установлены три заякоренные станции (рис. 1).

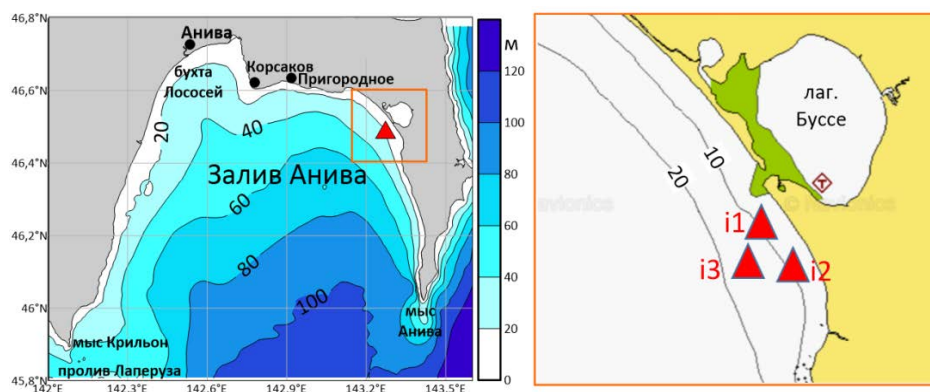


**Рис. 1.** Район исследования. Измерения уровня моря и ветрового волнения выполнены в точках i1, i2, i3.

**Fig. 1.** The research area. Measurements of sea level and wind waves were performed at points i1, i2, and i3.

В последние годы исследования ветрового волнения выполняются в основном на основе спектральных волновых моделей, однако результаты моделирования необходимо валидировать по данным натурных измерений.

В данной работе представлены результаты измерения уровня моря и параметров ветровых волн в заливе Анива при помощи датчика гидростатического давления в июне–августе 2023 года. По данным измерений выполнены оценки качества результатов моделирования ветрового волнения на основе модели WAVEWATCH III.

### Данные и методы

Измерения уровня моря и параметров ветрового волнения в рамках мониторинга условий среды производились в заливе Анива в районе лагуны Буссе на рыбоводном участке индустриального партнера (см. рис. 1). Данный район является перспективным для промышленного выращивания марикультуры [14]. Измерения выполнены при помощи высокочувствительного датчика гидростатического давления, который входит в состав

модернизированного инклинометрического измерителя скорости и направления течений, созданного на основе измерителя конструкции АО ИО РАН [9, 13]. В приборе используется тензопреобразователь абсолютного гидростатического давления с диапазоном 0–2.5 Бар производства фирмы Sendo Sensors (Китай), а также измерительная схема, в основе которой применен 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) ADS122C04 производства фирмы Texas Instruments. Конструктивно тензопреобразователь встроен в нижнюю крышку инклинометрического измерителя, что минимизирует влияние наклона прибора на его показания. Для компенсации температурного дрейфа тензопреобразователя давления в схему введен интегральный датчик температуры TMP117 (производства Texas Instruments), обеспечивающий измерение температуры с точностью 0.1 °C. Выбор АЦП обусловлен избыточной разрядностью, наличием встроенного программируемого усилителя, а также наличием интерфейса I2C, как и для датчика температуры, что облегчило модернизацию отработанной электрической схемы инклинометрического измерителя. В модернизированной версии прибора пользователь может задавать режимы работы с разной частотой опроса датчиков (в диапазоне 1–10 Гц).

Градуировка тензопреобразователей давления выполнялась на грузопоршневом манометре MTU-60 (класс точности 0.05) при температуре в диапазоне от ~0 до 30 °C для учета термокомпенсации в последующих расчетах. Проведенные процедуры позволили достичь погрешности измерения давления в 0.25 % от рабочего диапазона 1–2.5 Бар, что примерно соответствует погрешности определения глубины в  $\pm 1.9$  см.

Измерения производились каждые 30 минут с продолжительностью серии 15 минут и частотой 10 Гц. Две станции были установлены на глубине 10 м, а одна на глубине 15 м. В результате были получены данные за периоды: с 20 июня до 15 августа 2023 года для первой станции, с 20 июня до 26 июля 2023 года на второй и с 20 июня до 25 августа 2023 года на третьей.

Известно, что для ветровых волн амплитуда колебаний гидростатического давления уменьшается с глубиной. Поэтому при использовании датчиков давления для анализа параметров ветровых волн необходимо вводить поправку, учитывающую линейное затухание амплитуды волн с разным периодом. В нашей работе использовался следующий алгоритм: сначала данные датчика гидростатического давления разбивались на отрезки длиной 8192 значений (старт отрезков от 00 или от 30 минут, длина отрезков около 13 минут), на отрезках удалялся линейный тренд, далее производилось прямое преобразование Фурье, спектр корректировался при помощи передаточной функции, затем производилось обратное преобразование Фурье. Коэффициенты усиления для передаточной функции были вычислены в соответствии с рекомендациями [7]. Для станции на глубине 10 м передаточная функция представлена на рис. 2.

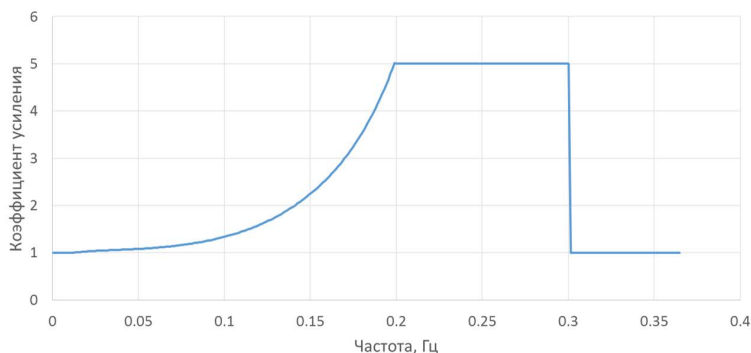


**Рис. 2.** Коэффициент усиления в зависимости от частоты колебаний.

**Fig. 2.** Gain coefficient depending on the frequency.

На рис. 3а представлена запись гидростатического давления на отрезке 13 минут. Максимальный размах колебаний составляет 0.45 дбар при периоде около 3.5 сек.

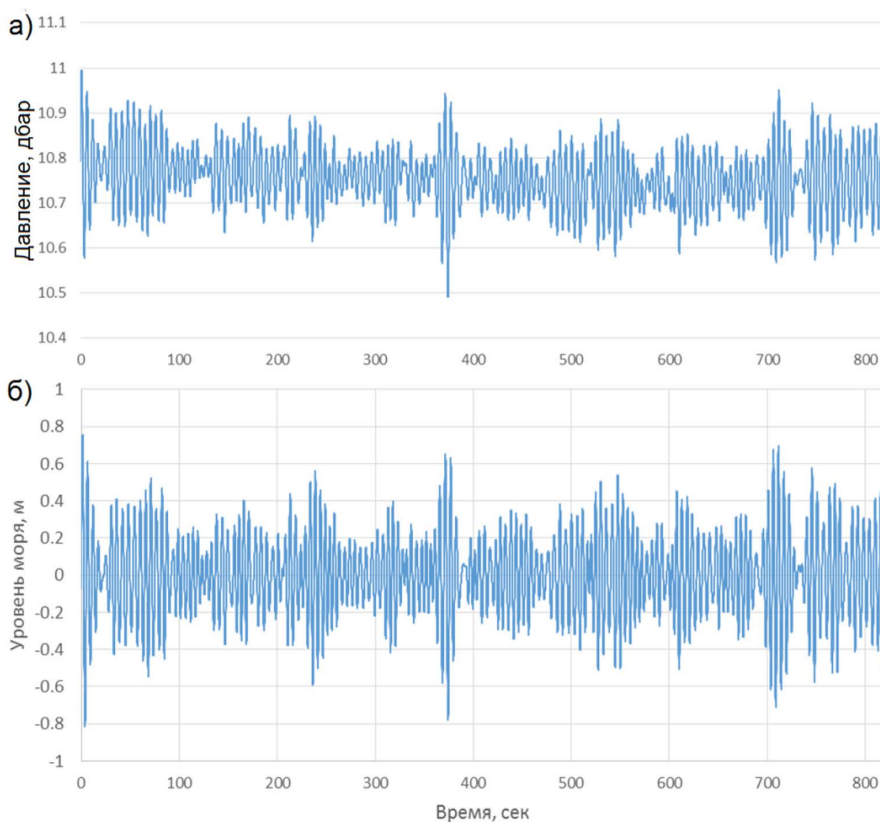


**Рис. 3.** Запись гидростатического давления (а) и скорректированный уровень моря (б).

**Fig. 3.** Hydrostatic pressure record (а) and adjusted sea level (б).

Скорректированный уровень моря показан на рис. 3б, где размах колебаний составляет уже 1.4 м. По каждому отрезку (13 минут) скорректированных данных вычислялась высота значительных волн, период  $T_{zero\ crossing}$  (вычисляется через переход среднего уровня) и максимальная высота волн.

Также в данной работе выполнена валидация данных моделирования волнения. Моделирование волнения выполнено на основе волновой модели WAVEWATCH III. Сведения о ветре получены из реанализа NCEP/CFSR/CFSv2. Вычисления проводились на неструктурной сетке, включающей акваторию Японского, Охотского и Берингова морей, а также всю северную часть Тихого океана. В заливе Анива шаг сетки составляет около ~4 км в открытой части и ~1 км в прибрежной зоне. Более подробное описание конфигурации модели и особенности проведения экспериментов изложены в работах [20, 21].

## Результаты

Анализ уровня моря выполнен по данным с 1-минутным и 15-минутным осреднением исходных данных. Так как прибор включался каждые 30 минут с продолжительностью серии 15 минут, то при 1-минутном осреднении мы имеем 15 значений и далее 15 минут данных нет. Это несколько затрудняет анализ, однако некоторые важные сведения о колебаниях уровня могут быть полезны. Уровень моря на первой станции на глубине 10 м представлен на рис. 4. Максимальный размах колебаний по данным с 1-минутным осреднением составляет 1.63 м. Хорошо видны приливные колебания, сизигия и квадратура, а также месячное неравенство приливов. При использовании 15-минутного осреднения пики уровня немного сглаживаются и максимальный размах меньше на 3–6 см.

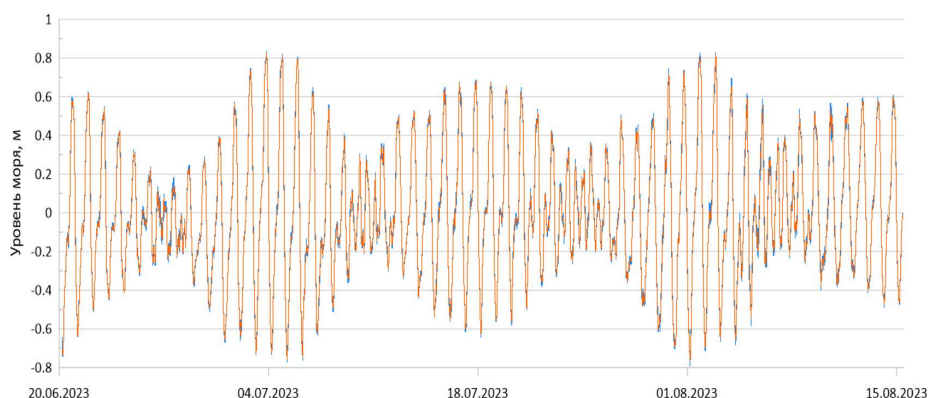


**Рис. 4.** Уровень моря на первой станции на глубине 10 м с 20 июня по 15 августа 2023 года. Синяя линия – 1-минутное осреднение, оранжевая – 15-минутное.

**Fig. 4.** Sea level at the first station at a depth of 10 m from June 20 to August 15, 2023. The blue line is a 1-minute average, the orange line is a 15-minute average.

Анализ уровня моря на третьей станции на глубине 15 м показал, что в целом колебания уровня мало отличаются от первой станции (рис. 5). Однако максимальный размах колебаний меньше, чем на первой, и составляет 1.58 м. Так как третья станция расположена дальше от берега, то для данного района можно утверждать, что размах колебаний уменьшается при удалении от берега. Так как мы рассматриваем суммарный уровень, то помимо приливов на уровень могут влиять сейши и нагоны, амплитуда которых также может меняться при удалении от берега.

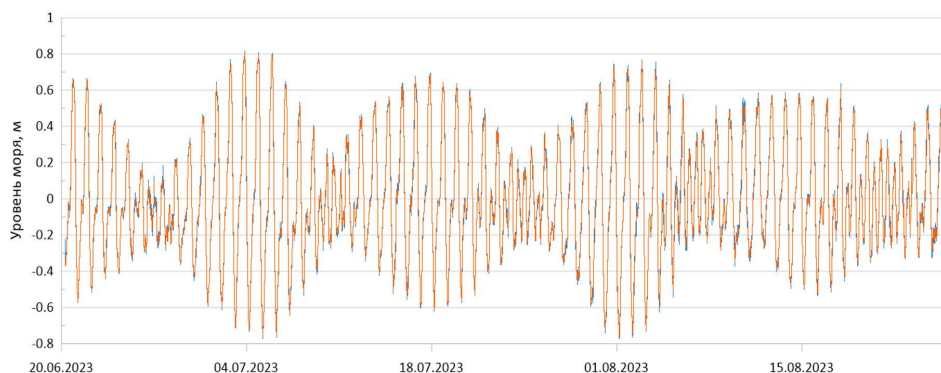


**Рис. 5.** Уровень моря на третьей станции на глубине 15 м с 20 июня по 26 августа 2023 года. Синяя линия — 1-минутное осреднение, оранжевая — 15-минутное.

**Fig. 5.** Sea level at the third station at a depth of 15 m from June 20 to August 26, 2023. The blue line is a 1-minute average, the orange line is a 15-minute average.

Далее рассмотрим параметры ветрового волнения. Так как все станции располагались близко друг от друга, то параметры ветровых волн практически одинаковы на всех станциях. Разная глубина также не повлияла на параметры волн: максимальная высота значительных волн не превышала 1.8 м, поэтому для таких волн влияние донного трения на глубине 10–15 м небольшое. На рис. 6 представлены графики высоты значительных волн, периода и максимальной высоты волн на первой станции на глубине 10 м. За весь период измерений максимальная высота значительных волн составила 1.73 м. Всего зарегистрировано три события, когда высота волны превышала 1 м.

Средний период составляет около 5.3 сек. Наблюдаются случаи увеличения периода до 7–8 сек, однако это наблюдается при высоте волн менее 0.2 м. После двух событий в начале августа с высотой волн в 1.3 и 1.73 м, на стадии затухания наблюдается период 6 и 6.5 сек соответственно.

Максимальная высота волн достигает 2.82 м (при значительной высоте 1.73 м). Среднее соотношение максимальной высоты волн к значительной составляет около 1.63 (как и указано в рекомендациях для пересчета волн

разной обеспеченности [1]). В работе [3] указано, что если индекс аномальности волн (отношение максимальной высоты волны к высоте значительных волн) составляет более 2, то волну можно считать аномальной. В нашем случае индекс аномальности достигал 2.4–2.5, но в основном при высоте значительных волн не более 0.2 м. Всего был зарегистрирован 91 случай аномальных волн по формальному превышению индекса аномальности, однако при высоте значительных волн более 0.5 м было всего 6 случаев аномальных волн. Один из примеров проявления аномальной волны был зарегистрирован 3 августа.

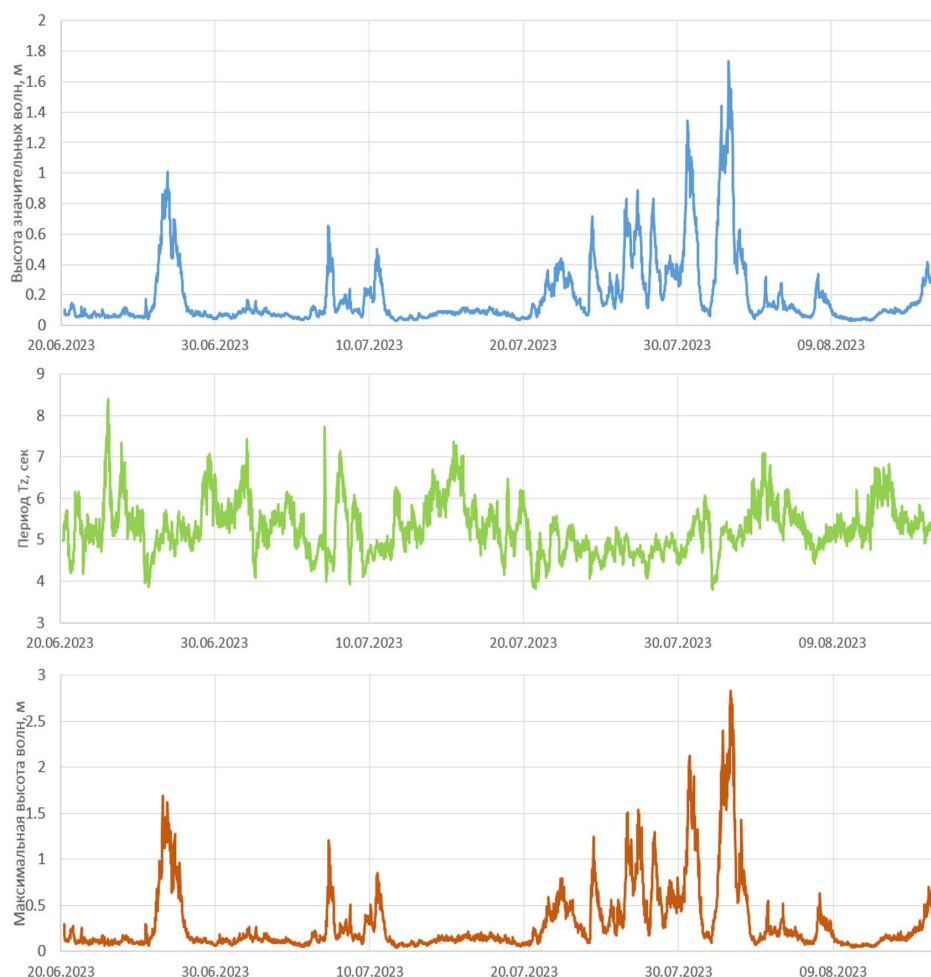


**Рис. 6.** Высота значительных волн, период волн и максимальная высота волн по данным измерений на первой станции на глубине 10 м с 20 июня по 15 августа 2023 года.

**Fig. 6.** The significant wave height, the wave period and the maximum wave height according to measurements at the first station at a depth of 10 m from June 20 to August 15, 2023.

На рис. 7 представлен отрезок записи датчика гидростатического давления (без корректировки), когда была зарегистрирована аномальная волна 3 августа 2024 года. В это время высота значительных волн составляла 0.58 м, максимальная высота волны 1.42 м, а индекс аномальности 2.43. Наши оценки в принципе согласуются с результатами анализа аномальных волн по данным измерений в заливе Анива в 2009 году из работы [5].

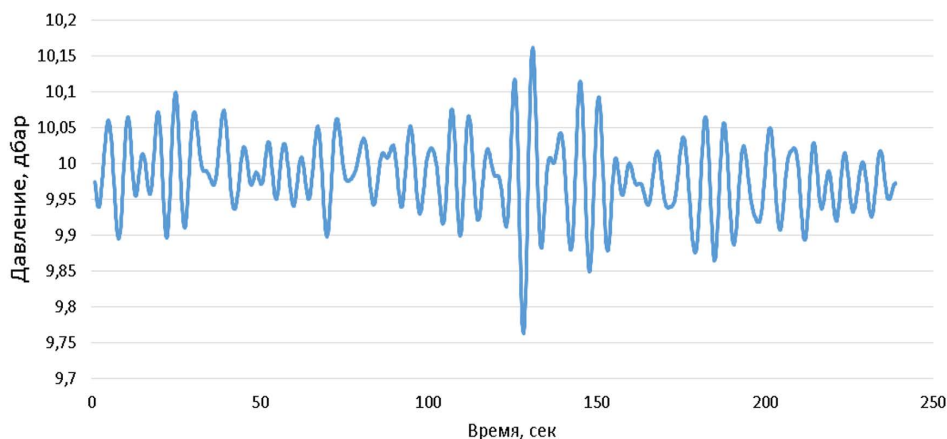


**Рис. 7.** Пример проявления аномальной волны по данным измерения уровня моря в 01.36 ч ВСВ 3 августа 2024 года.

**Fig. 7.** An example of the manifestation of an abnormal wave according to sea level measurement data at 01:36 on August 3, 2024.

Далее на основе результатов измерения высоты волн была выполнена оценка качества волновой модели. На рис. 8 представлен график сопоставления высоты значительных волн по данным моделирования и измерений. В целом модель воспроизводит наблюдавшиеся события с увеличением высоты волн более 1 м. При высоте волн менее 0.2 м модель систематически завышает результат, однако при почти штилевых условиях это нормально для волновой модели. При измеренной высоте волн в 1.73 м модель показала 1.2 м, что говорит о занижении пиковых значений. Коэффициент корреляции Пирсона составляет 0.84, систематическая ошибка 0.11 м, среднеквадратическая ошибка 1.17 м. К сожалению, ряд для сравнения слишком короткий и статистически корректный результат получить сложно. Также следует учитывать, что измерения выполнены в прибрежной зоне, где поля ветра из реанализа могут содержать ошибки, особенно это проявляется при слабом ветре. Но, с другой стороны, видно, что модель корректно воспроизводит время наступления событий, следовательно, при отладке модели все выполнено правильно и технических ошибок при реализации модели нет. Похожие результаты были получены при оценках качества волновой модели в Черном море в летний период [19].

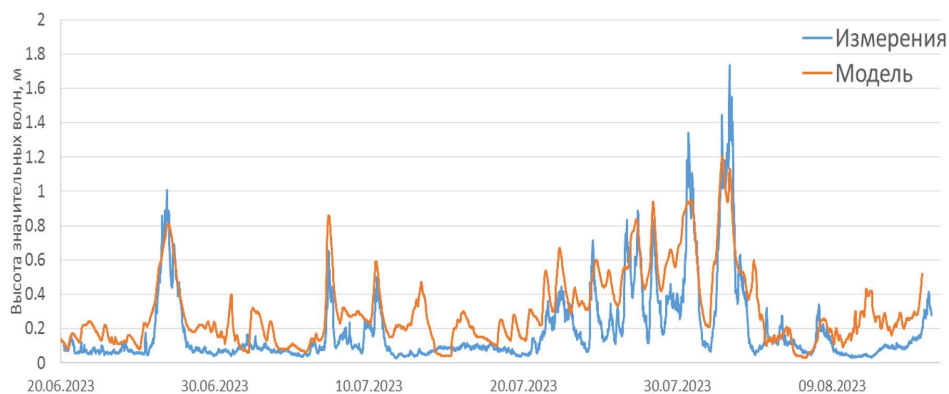


**Рис. 8.** Сопоставление высоты значительных волн по данным моделирования и измерений на первой станции на глубине 10 м с 20 июня по 15 августа 2023 года.

**Fig. 8.** Comparison of significant wave height according to modeling and measurements data at the first station at a depth of 10 m from June 20 to August 15, 2023.

### Заключение

На основе данных заякоренных инклинометров, оснащенных датчиками гидростатического давления, выполнены измерения уровня моря и параметров ветрового волнения в заливе Анива. Получены ряды данных на глубинах 10 и 15 м с интервалом 30 мин за июнь–август 2023 года.

Проведена корректировка данных гидростатического давления с учетом передаточной функции. Максимальная высота значительных волн составила 1.73 м, а максимальная высота индивидуальной волны – 2.82 м. Средний период волн за время измерений 5.3 сек.

Зарегистрирован 91 случай аномальных волн с индексом аномальности более 2. Однако из них наблюдалось только 6 случаев аномальных волн при высоте значительных волн более 0.5 м.

Выполнено сопоставление высоты значительных волн по результатам моделирования с данными измерений: коэффициент корреляции составляет 0.84, систематическая ошибка 0.11 м, а среднеквадратическая ошибка 0.17 м.

Выполнен анализ суммарных колебаний уровня с различным периодом осреднения. Максимальный размах колебаний уровня моря составил 1.63 м в сизигию и 0.3 м в квадратуру. Размах колебаний уровня на глубине 15 м меньше на 0.05 м, чем на глубине 10 м.

### Благодарность

Работа Пищальника В.М и Купцовой О.В. выполнена за счет гранта РНФ (проект № 24-27-20088). Работа Мысленкова С.А. и Архипкина В.С.

выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СахГУ» FEFF 2024-0004». Работа Кондрашова А.А. выполнена в рамках государственного задания ИО РАН "FMWE 2024-0025". Работа Латковской Е.М. выполнена за счет средств программы Сахалинского государственного университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

### Список литературы

1. Грузинов В.М., Борисов Е.В., Григорьев А.В. и др. Прикладная океанография / Под ред. В.М. Грузинова. М.: Артифекс, 2012. 382 с.
2. Завьялов Р.В., Латковская Е.М., Карамышев В.В., Репина М.А. Оценка возможных объемов штормовых выбросов макрофитов на побережье зал. Анива (Охотское море) // Уральский научный вестник. 2023. Т. 6, № 7. С. 16-23.
3. Запезалов А. С., Гармашов А. В. Соотношение глубины впадины и высоты гребня поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 78-86.
4. Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 4. Р. 35-42.
5. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Доган Д., Ялченир Б., Ялченир А., Куркин А.А., Москвитин А.А. Численное моделирование штормового нагона 15 ноября 2019 года на юге острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 396-406.
6. Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 41-49.
7. Кантарджи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения // Magazine of Civil Engineering. 2014. № 4 С. 49-62. DOI: 10.5862/MCE.48.6.
8. Ковалев, Д.П. Ковалев П.Д., Хузеева М.О. Особенности морского волнения у юго-восточного побережья Сахалина при перемещении циклонов над районом наблюдений // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3, № 3. С. 296-303.
9. Кондрашов А.А., Корж А.О. Обеспечение непрерывной продолжительной регистрации течений и волнения в море // XXIX Береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования, Калининград, 18–24 апреля 2022 года. С. 222-224.
10. Кузнецов К.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ковалев П.Д. Особенности характеристик ветрового волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по измерениям придонного давления // Известия РАН. ФАО. 2014. Т. 50, № 2. С. 242.
11. Кузнецов К. И., Зайцев А. И., Костенко И. С. Наблюдения волн-убийц в прибрежной зоне о. Сахалин // Экологические системы и приборы. 2014. № 2. С. 33-39.
12. Леонов А. В., Архипкин, В. С., Пицальник, В. М., Латковская, Е. М. Моделирование динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива (Охотское море) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. № 6. С. 77-85.
13. Пака В.Т., Набатов В.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Подуфалов А.П., Облеухов С.Д., Голенко М.Н., Шука С.А. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 2. С. 220-229.
14. Романюк В.А., Пицальник В.М., Шумилов И.В. Особенности ледового режима зал. Анива (Охотское море) как фактор риска при планировании марикультурных хозяйств // Процессы в геосредах. 2022. № 4(34). С. 1821-1828.
15. Филобокова, Л. Ю., Жданкина А. Ю. Нефтегазовый комплекс Сахалинской области: состояние, проблемы, вектор стратегического управления // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2020. № 4(32). С. 29-35.
16. Хузеева М.О., Като Э. Характеристики ветрового волнения на побережье о. Сахалин по данным наблюдений береговых гидрометеорологических станций //

Мореходство и морские науки: избранные доклады III Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. 2011. С. 194-204.

17. Didenkulova, E., Didenkulova, I., and Medvedev, I. Freak wave events in 2005–2021: statistics and analysis of favourable wave and wind conditions // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2023. Vol. 23. P. 1653-1663. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1653-2023>.

18. Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints // *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*. Sapporo: Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008. P. 89-125.

19. Myslenkov S.; Zelenko A.; Resnyanski, Y.; Arkhipkin V.; Silvestrova K. Quality of the Wind Wave Forecast in the Black Sea Including StormWave Analysis // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 13099.

20. Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., Kiseleva S., Arkhipkin V. Wind waves web atlas of the Russian seas // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 11. P. 2036.

21. Myslenkov S., Kruglova E. E., Medvedeva A. Y., Silvestrova K. P., Arkhipkin V. S., Akpinar A., Dobrolyubov S. A. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23, no. 3. P. ES3002.

22. Myslenkov S. A., Pishchal'nik V. M., Arkhipkin V. S., Latkovskaya E.M. Analysis of Wind Waves in Aniva Bay // *Russian journal of Earth Science*, 2025 (in print).

23. Pishchalnik, V., Myslenkov, S., Latkovskaya, E., and Arkhipkin, V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site 'carbon-sakhalin' (aniva bay, sea of Okhotsk) // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 7. P. 3031.

## References

1. Gruzinov V.M., Borisov E.V., Grigor'ev A.V. i dr. *Prikladnaya okeanografiya*: Pod red. V.M. Gruzinova. Moscow, Artifeks publ., 2012, 382 p. [in Russ.].

2. Zav'yalov R.V., Latkovskaya E.M., Karamyshev V.V., Repina M.A. Ocenka vozmozhnykh ob'emov shtormovykh vybrosov makrofitov na poberezh'e zal. Aniva (Ohotskoe more). *Ural'skiy nauchnyy vestnik*, 2023, vol. 6, no 7, pp. 16-23 [in Russ.].

3. Zapevalov, A.S. and Garmashov, A.V., 2024. Ratio between Trough and Crest of Surface Waves in the Coastal Zone of the Black Sea. *Physical Oceanography*, vol. 31, no. 1, pp. 71-78.

4. Zaitsev A., Malashenko A., Pelinovsky E. Abnormal Big Waves Near the Southern Coast of Sakhalin Island. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 35-42 [in Russ.].

5. Zaytsev, A.I., Pelinovsky, E.N., Dogan, D., Yalciner, B., Yalciner, A., Kurkin, A.A. and Moskvitin A.A., Numerical Simulation of the Storm Surge at the Sakhalin Island Southern Part on November 15, 2019. *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 364-373. DOI:10.22449/1573-160X-2020-4-364-373.

6. Ivanova A.A., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A., Shevchenko G.V. Modeling of storm surges in the coastal zone of the Sakhalin Island. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2015, no. 3, pp. 41-49 [in Russ.].

7. Kantardgi I. G., Kuznetsov K. I. Field measurement of waves for defining loads on marine hydraulic structures. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, no. 4, pp. 49-62. DOI: 10.5862/MCE.48.6 [in Russ.].

8. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Khuzeeva M.O. Osobennosti morskogo volneniya u yugovostochnogo poberezh'ya Sahalina pri peremeshchenii ciklonov nad rayonom nablyudeniya [Peculiarities of sea waves near the Southeastern coast of Sakhalin Island during cyclones moving above the observation area]. *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 296-303 [in Russ.].

9. Kondrashov A.A., Korzh A.O. Obespechenie nepreryvnoy prodolzhitel'noy regi-stracii techeniy i volneniya v more. XXIX Beregovaya konferenciya: naturnye i teoreticheskie issledovaniya – v praktiku beregopol'zovaniya, Kaliningrad, 18–24 aprelya 2022 goda, pp. 222-224 [in Russ.].

10. Kuznetsov K.I., Kovalev P.D., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N. Features of wind waves at the Southeastern of Sakhalin according to bottom-pressure measurements. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 213-220. DOI: 10.1134/S0001433814020066.
11. Kuznecov K. I., Zaycev A. I., Kostenko I. S. Nablyudeniya voln-ubiyev v pribrezhnoy zone o. Sahalin. *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2014, no. 2, pp. 33-39 [in Russ.].
12. Leonov A.V., Arkhipkin V.S., Pishchalnik V.M., Latkovskaya E.M. Modeling the dynamics of dissolved oxygen concentration in waters of the Aniva bay (the Sea of Okhotsk). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2023, no. 6, pp. 77-85 [in Russ.]. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.7>.
13. Paka V. T., Nabatov V. N., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Podufalov A. P., Obukhov S. D., Golenko M. N., Shchuka S. A. On the improvement of the tilting bottom current meter. *Okeanologicheskie issledovaniya [Journal of Oceanological Research]*, 2019, vol. 47, no. 2, pp 220-229 [in Russ.].
14. Romanyuk, V.A., Pishchalnik V.M., Shumilov I.V. Features of the ice regime of Aniva Bay (Sea of Okhotsk) as a risk factor in the planning of mariculture farms. *Process. GeoMedia*, 2022, no. 4, pp. 1820–1826 [in Russ.].
15. Filobokova L. Yu., Zhdankina A. Yu. Oil and gas complex of the Sakhalin Region: State, problems, vector of strategic management. *Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie [National Security and Strategic Planning]*, 2020, vol. 32, no. 4, pp. 29-35. [in Russ.].
16. Huzeeva M.O., Kato E. Harakteristiki vetrovogo volneniya na poberezh'e o. Sahalin po dannym nablyudeniya beregovykh gidrometeorologicheskikh stanciy. *Morekhodstvo i morskoe nauki: izbrannyye doklady III Sahalinskoy regional'noy morskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. 2011, pp. 194-204 [in Russ.].
17. Didenkulova, E., Didenkulova, I., and Medvedev, I. Freak wave events in 2005–2021: statistics and analysis of favourable wave and wind conditions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2023, Vol. 23, pp. 1653-1663. DOI: 10.5194/nhess-23-1653-2023.
18. Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints // *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*. Sapporo: Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008, pp. 89-125.
19. Myslenkov S.; Zelenko A.; Resnyanski, Y.; Arkhipkin V.; Silvestrova K. Quality of the Wind Wave Forecast in the Black Sea Including StormWave Analysis. *Sustainability*, 2021, Vol. 13, pp. 13099.
20. Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., Kiseleva S., Arkhipkin V. Wind waves web atlas of the Russian seas. *Water*, 2023, Vol. 15, no. 11, p. 2036.
21. Myslenkov S., Kruglova E. E., Medvedeva A. Y., Silvestrova K. P., Arkhipkin V. S., Akpinar A., Dobrolyubov S. A. Number of storms in several Russian seas: Trends and connection to large-scale atmospheric indices. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, Vol. 23, no. 3, p. ES3002.
22. Myslenkov S. A., Pishchal'nik V. M., Arkhipkin V. S., Latkovskaya E.M. Analysis of Wind Waves in Aniva Bay. *Russian journal of Earth Science*, 2025 (in print).
23. Pishchalnik, V., Myslenkov, S., Latkovskaya, E., and Arkhipkin, V. Assessment of the hydrochemical characteristics of the carbon observational site 'carbon-sakhalin' (aniva bay, sea of Okhotsk). *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 7, p. 3031.

*Поступила 20.11.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 20.11.2024; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-131-148>

УДК 556.06

## **Прогнозирование притока воды в Ириклинское водохранилище**

***О.Н. Арефьева<sup>1</sup>, Н.Е. Голоднюк<sup>2</sup>, Ю.А. Симонов<sup>1</sup>,  
А.В. Христофоров<sup>1</sup>, Н.М. Юмина<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup> Приволжское управление по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды, г. Самара, Россия  
simonov@mecom.ru, khristoforov\_a@mail.ru, yuminanm@mail.ru*

Предложена система методик прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище на реке Урал. Система включает методики получения ежегодно выпускаемого 5 марта долгосрочного прогноза объема притока за период весеннего половодья и за второй квартал, а также методики получения ежегодно выпускаемого в январе и феврале предварительного долгосрочного прогноза этих величин. В этих методиках используются линейные зависимости притока воды в водохранилище от максимального запаса воды в снеге и от показателя предзимнего увлажнения водосбора. На основе метода экстраполяции гидрографа разработаны схемы ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования притока в водохранилище за 1, 3, 5, 7 и 10 суток. Проверка по данным за период с 2003 по 2024 год показала удовлетворительное качество предлагаемых методик, что позволяет рекомендовать их к применению в целях повышения эффективности использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища.

*Ключевые слова:* водохранилище, объем притока, методика, линейные зависимости, экстраполяция гидрографа, проверка, качество прогнозов

## **Forecasting water inflow into the Iriklienskoe Reservoir**

***O.N. Arefyeva<sup>1</sup>, N.E. Golodnyuk<sup>2</sup>, Yu.A. Simonov<sup>1</sup>,  
A.V. Khristoforov<sup>1</sup>, N.M. Yumina<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup> Privolzhskoe Administration for Hydrometeorology and Environmental  
Monitoring, Samara, Russia  
simonov@mecom.ru, khristoforov\_a@mail.ru, yuminanm@mail.ru*

A system of methods for forecasting the water inflow into the Iriklienskoe Reservoir on the Ural River are proposed. The system includes the long-term forecast of the inflow volume over the spring flood period and the second quarter, which is annually released on March 5, as well as methods for the preliminary long-term forecast of these quantities, which is annually released in January and February. These methods are based on linear dependences of the forecasted water inflow on the maximum snow water equivalent and on the pre-winter moisture index of the reservoir's catchment area. Based on the hydrograph

extrapolation method, techniques for daily short- and medium-term forecasting of the inflow to the reservoir for 1, 3, 5, 7 and 10 days have been developed. A verification using the data for the period from 2003 to 2024 showed satisfactory quality of all proposed methods, which allows recommending them for application in order to improve the efficiency of using water resources of the Iriklienskoe Reservoir.

**Keywords:** reservoir, inflow volume, methodology, linear dependences, hydrograph extrapolation, verification, forecast quality

## Введение

Заполненное в 1966 году Ириклинское водохранилище на реке Урал предназначено для борьбы с наводнениями в нижнем бьефе и обеспечения нужд водоснабжения, судоходства и энергетики. Плотина водохранилища расположена в 83 км выше г. Орска. Длина водохранилища 73 км, наибольшая ширина 10 км, наибольшая глубина у плотины 36 м, площадь зеркала 260 км<sup>2</sup>, объем 3,3 км<sup>3</sup>. Площадь водосбора 36900 км<sup>2</sup>. Полезная емкость 2,7 км<sup>3</sup> вдвое превышает средний объем годового притока, что позволяет осуществлять глубокое многолетнее регулирование стока реки Урал. Расчет притока воды в Ириклинское водохранилище выполняется в ФГБУ «Приволжское УГМС» с учетом расходов воды реки Урал выше водохранилища и боковых притоков согласно указаниям, содержащимся в Правилах использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на реке Урал [9].

Благодаря своим малым объемам, расположенные выше по течению Магнитогорское и Верхнеуральское водохранилища оказывают незначительное влияние на водный режим притока в Ириклинское водохранилище. Для многолетних колебаний годового притока характерны значительные периоды его относительно низких (до 8 лет) и высоких (до 4 лет) значений. Внутригодовое распределение притока крайне неравномерно. Для большей части года характерны низкие расходы притока до 4 м<sup>3</sup>/с. Вызванное таянием снежного покрова весеннее половодье составляет 70–85 % годового притока. Во второй половине марта – начале апреля оно начинается резким увеличением расходов воды. Пик половодья, как правило, наблюдается в апреле и достигает 2500 м<sup>3</sup>/с. Спад основной волны половодья происходит в мае – первой половине июня. В отдельные годы в летне-осенний период могут наблюдаться дождевые паводки, высота которых значительно ниже весеннего половодья [9, 10].

Специфика водного режима притока в Ириклинское водохранилище вынуждает осуществлять крайне неравномерное многолетнее и внутригодовое регулирование стока реки Урал. В этих условиях эффективный режим наполнения и опорожнения водохранилища особенно нуждается в научном обосновании и, прежде всего, в достаточно надежных и своевременных прогнозах различных гидрологических характеристик.

Гидрометеорологическое обслуживание водохранилища осуществляет ФГБУ «Приволжское УГМС». Как будет показано ниже, некоторые

используемые там методики нуждаются в совершенствовании. Кроме того, в целях повышения эффективности использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища перечень прогнозируемых характеристик нуждается в расширении. Это определяет цели настоящей работы, ее актуальность и практическую значимость.

Современная гидрология располагает достаточно широким арсеналом средств получения методик прогнозирования. Наибольшие надежды возлагаются на использование различных моделей формирования речного стока или притока воды в водохранилища [6, 15–17]. Однако использование этих моделей часто затруднено недостаточной гидрометеорологической изученностью водосборов и пока еще недостаточной точностью метеорологических прогнозов на период заблаговременности гидрологических прогнозов [4, 5]. С учетом данного обстоятельства и в целях экономии времени на составление прогнозов в настоящей работе предлагаются достаточно простые методики прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище.

## **1. Долгосрочное прогнозирование весеннего притока в Ириклинское водохранилище**

### Оценка действующей методики

В настоящее время в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для долгосрочного прогнозирования объема притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья  $W_{пол.}$  км<sup>3</sup> с ежегодным выпуском основного прогноза 5 марта используется методика В.Н. Паршина, разработанная в 1960 году [8]. При разработке методики были использованы данные за период с 1932 по 1960 год.

В качестве предикторов в методике используются две переменные, осредненные по территории водосбора водохранилища: максимальный запас воды в снеге к 1 марта  $S_{max}$  мм и показатель предзимней увлажненности водосбора  $U_{120}$  мм, равный разности между слоем осадков и рассчитанным по методике Б.В. Полякова слоем испарения за 120 дней до установления снежного покрова в предыдущем году. На водосборе Ириклинского водохранилища максимальные запасы воды в снежном покрове могут наблюдаться в середине – конце марта, однако необходимость подготовки водохранилища к весеннему половодью определяет дату выпуска его основного прогноза 5 марта. Это вынуждает ограничиваться сведениями о запасах воды в снежном покрове, известных к 1 марта.

Осредненная по территории водосбора глубина промерзания почвы  $L$  см влияет на потери стока весеннего половодья только в случае, если она не превышает некоторое критическое значение  $L_{кр}$  [11]. Водосбор Ириклинского водохранилища практически целиком расположен в степной зоне с невысокой толщиной снежного покрова и, как правило,

достаточно суровыми зимами [10]. Практически во все годы величина  $L$  превышает критическое значение  $L_{кр}$ , поэтому не используется в качестве предиктора при прогнозировании весеннего притока воды в водохранилище.

В основе методики В.Н. Паршина лежит традиционное для отечественной практики долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья графическое построение [8, 11]. Для различных значений  $U_{120}$  от 20 до 120 мм с шагом 10 мм был построен график зависимости  $W_{пол.}$  от суммы  $S_{max} + X$  мм максимальных запасов воды в снеге и слое осадков  $X$  мм с 1 марта до схода снега. При получении прогноза вместо величины  $S_{max} + X$  мм используется сумма  $S_{max} + \bar{X}$  максимальных запасов воды в снеге и нормы  $\bar{X}$  слоя осадков с 1 марта до схода снега. При этом норма слоя осадков постоянно пересчитывается по мере поступления новых данных.

В настоящее время имеется ряд проверочных прогнозов за период с 1932 по 2024 год. В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] качество методики характеризуется отношением  $S/\sigma$  среднеквадратической погрешности прогнозов  $S$  км<sup>3</sup> к стандартному отклонению прогнозируемой величины  $\sigma$  км<sup>3</sup>, а также оправдываемостью прогнозов. Алгоритм получения этих характеристик изложен ниже.

Ряд проверочных прогнозов за весь период с 1932 по 2024 год характеризуют следующие показатели:

- показатель эффективности прогноза  $S/\sigma = 0,54$ ;
- оправдываемость прогнозов  $P = 81 \%$ .

Таким образом, в целом методика выглядит вполне удовлетворительной с точки зрения требования Наставления по службе прогнозов [7]. Однако начиная с 1990-х годов погрешность прогнозов явно возросла. Это наглядно демонстрирует рис. 1, на котором представлен график многолетних колебаний ошибок прогноза.

В частности, ряд проверочных прогнозов по методике В.Н. Паршина за период с 2003 по 2024 год характеризуют следующие показатели:

- показатель эффективности прогноза  $S/\sigma = 0,93$ ;
- оправдываемость прогнозов  $P = 68 \%$ .

Таким образом, для этого ряда выполняется условие  $S/\sigma > 0,80$ , при котором, согласно Наставлению по службе прогнозов [7], методика относится к категории неудовлетворительных.

В связи с этим в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны новые методики получения прогнозов весеннего притока в Ириклинское водохранилище на основе данных за период с 2003 по 2024 год.

Дополнительным аргументом в пользу этого периода является следующее обстоятельство.

Оценка коэффициента корреляции  $r(W_{пол.}, S_{max})$  между объемом притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья

$W_{пол.}$  км<sup>3</sup> и такой важнейшей характеристикой условий формирования весеннего половодья, как максимальный запас воды в снеге  $S_{max}$  мм, для различных периодов варьирует следующим образом:

- для периода с 1932 по 1960 год  $r(W_{пол.}, S_{max}) = 0,58$ ;
- для периода с 1985 по 2002 год  $r(W_{пол.}, S_{max}) = 0,09$ ;
- для периода с 2003 по 2024 год  $r(W_{пол.}, S_{max}) = 0,41$ .

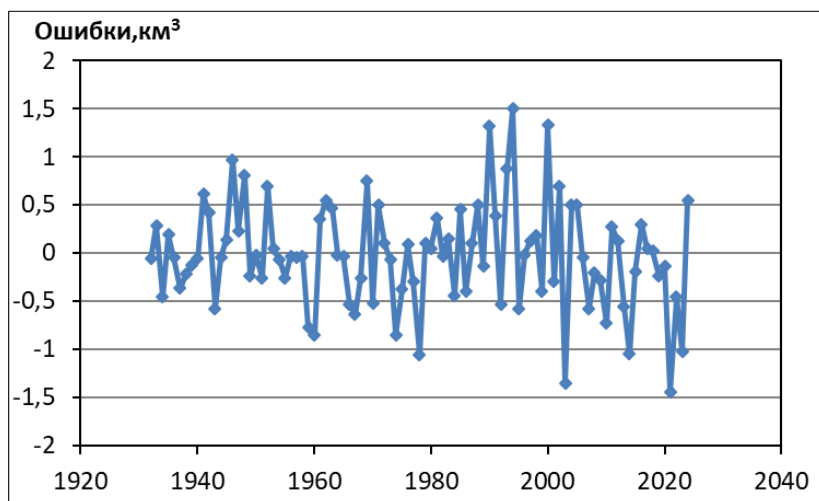


**Рис. 1.** Многолетние колебания ошибок прогноза объема притока в Ириклинское водохранилище за весеннее половодье по методике В.Н. Паршина.

**Fig. 1.** Long-term fluctuations in errors of forecasting the inflow volume into the Iriklienskoye Reservoir for the spring flood according to the methodology of V.N. Parshin.

Вероятной причиной низкого значения коэффициента корреляции  $r(W_{пол.}, S_{max})$  для периода с 1985 по 2002 год является характерное для многих регионов страны существенное сокращение сети снегомерных маршрутов [4]. На водосборе Ириклинского водохранилища с 2003 года сеть снегомерных маршрутов частично восстановлена и действует по настоящее время. Таким образом, практически утраченная в предшествующие десятилетия зависимость объема весеннего притока  $W_{пол.}$  от максимального запаса воды в снеге  $S_{max}$  в период с 2003 по 2024 год вновь восстановилась.

### Предлагаемые методики

При разработке методик долгосрочного прогнозирования весеннего притока в Ириклинское водохранилище использован подготовленный

в ФГБУ «Приволжское УГМС» ряд значений весеннего притока и характеристик условий его формирования за период с 2003 по 2024 год продолжительностью  $n = 22$  года. В качестве предикторов использовались осредненные по территории водосбора водохранилища:

- максимальный запас воды в снеге к 1 марта  $S_{\max}$  мм;
- оказавшийся более эффективным показатель предзимней увлажненности водосбора  $U_{90}$  мм, равный разности между слоем осадков и рассчитанным по методике Б.В. Полякова слоем испарения за 90 дней до установления снежного покрова в предыдущем году.

Несмотря на происходящие климатические изменения, использование в качестве дополнительного предиктора осредненной по территории водосбора глубины промерзания почвы  $L$  см пока не дало повышения точности прогнозов.

В процессе поиска оптимального варианта зависимости  $W_{\text{пол.}}$  от  $S_{\max}$  и  $U_{90}$  были учтены следующие обстоятельства.

В целях повышения эффективности подготовки и выпуска прогнозов и повышения их точности желательно, чтобы используемая формула их получения обладала следующими дополнительными свойствами:

- 1) она должна адекватно описывать зависимость прогнозируемой величины от используемых предикторов в реально наблюдаемом диапазоне их вероятных значений;
- 2) эта зависимость должна быть достаточно тесной;
- 3) содержащиеся в ней параметры должны максимально просто оцениваться по многолетнему ряду гидрометеорологических наблюдений [4, 5].

С учетом данного обстоятельства на основе статистического анализа располагаемых данных была выбрана следующая формула получения прогноза:

$$\tilde{W}_{\text{пол.}} = 0,0117 \cdot S_{\max} + 0,0231 \cdot U_{90} - 0,976. \quad (1)$$

Параметры этой формулы получены методом наименьших квадратов по ряду значений  $W_{\text{пол.}}$ ,  $S_{\max}$  и  $U_{90}$  за период с 2003 по 2024 год. Как будет показано ниже, формула (1) позволяет получать прогнозы с достаточно низким отношением  $S/\sigma$  и с их достаточно высокой оправдываемостью  $P$ .

Вторая из предлагаемых методик основана на том, что между объемом притока за период весеннего половодья  $W_{\text{пол.}}$  км<sup>3</sup> и объемом притока за второй квартал  $W_{2\text{кв.}}$  км<sup>3</sup> имеет место весьма высокая корреляция. Несмотря на это, сроки поступления в водохранилище этих объемов не совпадают. Половодье может начинаться в конце марта, его пик, как правило, проходит в апреле, а заканчиваться оно может в конце мая – начале июня [10]. В частности, полученная для периода с 2003 по 2024 год оценка коэффициента корреляции  $r(W_{\text{пол.}}, W_{2\text{кв.}})$  между этими величинами равна 0,94.

С учетом данного обстоятельства для получения долгосрочного прогноза объема притока в Ириклинское водохранилище за второй квартал предлагается формула:

$$\tilde{W}_{2\text{кв.}} = 0,0086 \cdot S_{\text{max}} + 0,020 \cdot U_{90} - 0,568. \quad (2)$$

Параметры этой формулы получены методом наименьших квадратов по ряду значений  $W_{2\text{кв.}}$ ,  $S_{\text{max}}$ , и  $U_{90}$  за период с 2003 по 2024 год. Как будет показано ниже, формула (2) также позволяет получать прогнозы с удовлетворительным отношением  $S/\sigma$  и оправдываемостью  $P$ .

В преддверии весеннего половодья от гидрологов-прогнозистов требуется выпускать предварительный прогноз весеннего стока или притока в водохранилище в феврале и даже в январе. В общем случае прогнозирование весеннего стока или притока до того, как снежный покров в целом сформирован, невозможно. Однако река Урал представляет приятное исключение.

По данным В.Н. Паршина, для водосбора Ириклинского водохранилища в зависимости от его предзимнего увлажнения коэффициент стока весеннего половодья может варьировать от 0,05 до 0,85 [8, 10]. В таких условиях показатель предзимней увлажненности водосбора становится более важным предиктором, чем еще неизвестный до начала марта максимальный запас воды в снежном покрове. Это хорошо демонстрируют полученные для периода с 2003 по 2024 год оценки коэффициентов корреляции:

$$r(W_{\text{пол.}}, U_{90}) = 0,74; \quad r(W_{\text{пол.}}, S_{\text{max}}) = 0,41;$$

$$r(W_{2\text{кв.}}, U_{90}) = 0,68; \quad r(W_{2\text{кв.}}, S_{\text{max}}) = 0,32.$$

В связи с такой особенностью формирования весеннего притока в Ириклинское водохранилище возникает возможность использования в предварительных прогнозах только одного предиктора – показателя  $U_{90}$  мм предзимней увлажненности водосбора за 90 дней до установления снежного покрова в предыдущем году.

Для получения предварительных прогнозов объема притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья и за второй квартал предлагаются формулы:

$$\tilde{W}_{\text{пол.}} = 0,0231 \cdot U_{90} - 0,032, \quad (3)$$

$$\tilde{W}_{2\text{кв.}} = 0,020 \cdot U_{90} + 0,127. \quad (4)$$

Параметры этих формул получены методом наименьших квадратов по ряду значений  $W_{\text{пол.}}$ ,  $W_{2\text{кв.}}$ , и  $U_{90}$  за период с 2003 по 2024 год. Как будет показано ниже, формулы (3) и (4) позволяют получать прогнозы с удовлетворительным отношением  $S/\sigma$  и оправдываемостью  $P$ . Таким образом, удовлетворительные прогнозы весеннего притока в Ириклинское водохранилище можно выпускать уже в декабре предыдущего года.

### Верификация предлагаемых методик

В целях верификации предлагаемых методик фактические значения прогнозируемой величины  $Z$ , т. е. объема притока за период половодья  $W_{пол.}$  или объема притока за второй квартал  $W_{2кв.}$ , сравнивались с их прогнозами  $\tilde{Z}$  – прогнозом  $\tilde{W}_{пол.}$  по формулам (1) и (3) или  $\tilde{W}_{2кв.}$  по формулам (2) и (4). Анализировался ряд ошибок проверочных прогнозов  $Z_1 - \tilde{Z}_1, \dots, Z_n - \tilde{Z}_n$  за период с 2003 по 2024 год продолжительностью  $n = 22$  года. Для всех предлагаемых методик средние значения ошибок проверочных прогнозов по предлагаемым методикам оказались равными нулю, то есть методики не дают систематических ошибок прогноза.

Согласно Наставлению по службе прогнозов [7], для среднеквадратической погрешности прогноза использована оценка:

$$\hat{S} = \sqrt{\frac{1}{(n-m)} \sum_{j=1}^n (Z_j - \tilde{Z}_j)^2}, \quad (5)$$

где  $m$  – число оцениваемых параметров, равное 3 для формул (1) и (2) и равное 2 для формул (3) и (4).

Полученная на зависимом материале, оценка  $\hat{S}$  систематически занижает погрешность прогноза. В соответствие с рекомендациями [1], данный недостаток устраняется путем перехода к несмещенной оценке:

$$S = \hat{S} \sqrt{\frac{n-1}{n-m-1}}. \quad (6)$$

В целях оценки эффективности предлагаемых методик для каждой из них в качестве альтернативы использован климатический прогноз, который выражается нормой  $\bar{Z}$  прогнозируемой величины, рассчитанной по ряду  $Z_1, \dots, Z_n$ . Погрешность климатического прогноза определяется стандартным отклонением этого ряда:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (Z_j - \bar{Z})^2}. \quad (7)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования основан на соотношении  $S/\sigma$ : методика считается удовлетворительной при  $S/\sigma \leq 0,80$  и неудовлетворительной при  $S/\sigma > 0,80$  [7].

В качестве другого не менее важного показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогнозов  $P$  – частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышают допустимую ошибку, равную  $0,674\sigma$ . Для удовлетворительных прогнозов должно выполняться неравенство  $P \geq 60\%$  [1, 7].

В зарубежной практике прогнозирования речного стока качество прогнозов принято характеризовать показателем Нэша – Сатклиффа, который

для предлагаемых методик равен квадрату коэффициента корреляции  $R$  между фактическими объемами весеннего притока и их прогнозами [1, 16–18].

Для предлагаемых методик рассмотренные показатели качества получаемых прогнозов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Показатели качества прогнозов по предлагаемым методикам прогнозирования объемов весеннего притока в Ириклинское водохранилище  
**Table 1.** Quality indicators of forecasts of the volumes of spring inflow into the Irikliinskoye Reservoir

| Методика       | $R$  | $S$  | $S/\sigma$ | $P$  |
|----------------|------|------|------------|------|
| По формуле (1) | 0,86 | 0,39 | 0,58       | 81 % |
| По формуле (2) | 0,76 | 0,45 | 0,69       | 70 % |
| По формуле (3) | 0,74 | 0,48 | 0,71       | 64 % |
| По формуле (4) | 0,68 | 0,49 | 0,76       | 62 % |

Помещенные в табл. 1 показатели свидетельствуют о том, что согласно Наставлению по службе прогнозов [7] все предлагаемые методики являются удовлетворительными.

## 2. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование притока в Ириклинское водохранилище

### Постановка задачи и метод ее решения

Решалась задача разработать схемы ежедневного получения краткосрочных с заблаговременностью от 1 до 5 суток и среднесрочных с заблаговременностью от 6 до 10 суток прогнозов притока воды в Ириклинское водохранилище за 1, 3, 5, 7 и 10 суток. В качестве исходной информации использован подготовленный ФГБУ «Приволжское УГМС» ряд значений среднесуточных расходов притока за период с 01.01.2012 по 31.12.2024 продолжительностью  $n = 4749$  суток.

Для решения поставленной задачи применен разработанный в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» метод экстраполяции гидрографа, использование которого уже дало положительные результаты для сотен рек практически во всех регионах России [2, 4, 13].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных расходов воды дает возможность экстраполировать его на несколько суток вперед и определять прогноз с заблаговременностью  $\Delta t$  суток в виде обобщенного полинома. Оценка  $k+1$  параметров этого полинома по известным к дате составления прогноза  $t$  среднесуточным расходам воды  $Q(t)$ ,  $Q(t-1)$ , ...,  $Q(t-k)$  приводит

к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

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

Параметры  $a_0(\Delta t)$ ,  $a_1(\Delta t)$ , ...,  $a_k(\Delta t)$ ,  $b(\Delta t)$  и оптимальное значение  $k$  зависят от заблаговременности прогноза  $\Delta t$  и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Определяемые формулой (8) величины  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (8) корректируются путем замены экстремальных значений  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  допустимым минимумом  $\min Q$  или максимумом  $\max Q$ . Окончательный прогноз расхода воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) < \min Q; \\ \hat{Q}(t + \Delta t), & \text{если } \min Q \leq \hat{Q}(t + \Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \hat{Q}(t + \Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (9)$$

Параметры формулы (8) получения прогнозов расходов воды оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных значений среднесуточных расходов притока за период с 01.01.2012 по 31.12.2024. Оптимальные значения параметра  $k$ , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза расходов воды принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формуле (8) при  $k = 5$ .

В качестве оценки минимально допустимого расхода воды в формуле (9) принято округленное в меньшую сторону наименьшее значение члена используемого ряда, равное  $\min Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ . В качестве оценки максимально допустимого расхода воды в формуле (9) принято округленное в большую сторону наибольшее значение члена используемого ряда, равное  $\max Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Формулы (8) и (9) использованы для ежедневного в течение всего года прогнозирования среднесуточных расходов притока в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток. Параметры формулы (8) приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Параметры формулы (8) получения прогноза суточного притока в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток  
**Table 2.** Parameters of formula (8) for obtaining a forecast of the daily inflow into the Irklinskoye Reservoir with a lead time of  $= 1, \dots, 10$  days

| $\Delta t$ | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$  | $a_3$   | $a_4$   | $a_5$ | $b$  |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|------|
| 1          | 1,434  | -0,499 | 0,195  | -0,1982 | -0,030  | 0,053 | 2,94 |
| 2          | 1,555  | -0,511 | 0,0719 | -0,290  | -0,0573 | 0,122 | 7,02 |
| 3          | 1,7177 | -0,700 | 0,009  | -0,3561 | 0,049   | 0,100 | 11,5 |
| 4          | 1,76   | -0,835 | -0,033 | -0,2611 | -0,0367 | 0,149 | 16,4 |
| 5          | 1,683  | -0,887 | 0,059  | -0,327  | -0,067  | 0,206 | 21,3 |
| 6          | 1,524  | -0,768 | -0,012 | -0,369  | 0,067   | 0,150 | 26,0 |
| 7          | 1,412  | -0,747 | -0,095 | -0,177  | -0,061  | 0,195 | 30,2 |
| 8          | 1,272  | -0,774 | 0,075  | -0,281  | -0,015  | 0,191 | 34,0 |
| 9          | 1,045  | -0,532 | -0,059 | -0,202  | -0,029  | 0,193 | 37,3 |
| 10         | 0,961  | -0,555 | -0,022 | -0,177  | -0,004  | 0,170 | 40,1 |

### Верификация прогнозов суточного притока в водохранилище

В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] точность методики прогнозирования определяется среднеквадратической погрешностью прогноза  $S$  м<sup>3</sup>/с, которая рассчитывается для всего ряда ошибок проверочных прогнозов, то есть разностей между фактическими значениями расходов  $Q(t)$  и их прогнозами  $\tilde{Q}(t)$  за  $N = 4749$  суток. Величина определяется формулами (5) и (6) с числом оцениваемых параметров  $m = 9$  при использовании формул (8) и (9) и заменой  $n = 22$  на  $N = 4749$ .

Для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз [1, 7]. При заблаговременности прогноза  $\Delta t$  суток инерционный прогноз  $\tilde{Q}_I(t)$  использует известное на дату его составления  $t - \Delta t$  значение  $Q(t - \Delta t)$  и определяется формулой:

$$\tilde{Q}_I(t) = Q(t - \Delta t) + \bar{\Delta}, \quad (10)$$

где  $\bar{\Delta}$  вычисляется как среднее арифметическое ряда  $\Delta_1, \dots, \Delta_N$ , образованного  $N$  наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (11)$$

Согласно Наставлению по службе прогнозов, методика считается удовлетворительной при  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  [7].

В качестве другого не менее важного показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогнозов  $P$  – частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную  $0,674\sigma_{\Delta}$ . Для удовлетворительных прогнозов должно выполняться неравенство  $P \geq 60\%$  [1, 7].

Дополнительной характеристикой качества прогнозирования является коэффициент корреляции  $R$  между фактическими расходами и их прогнозами.

Для прогнозов среднесуточного расхода притока в Ириклинское водохранилище с различной заблаговременностью рассмотренные показатели их качества приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Показатели качества прогнозов суточного притока в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток

**Table 3.** Quality indicators of forecasts of the daily inflow into the Iriklikskoye Reservoir with a lead time of  $= 1, \dots, 10$  days

| $\Delta t$ | $R$  | $S$  | $S/\sigma_{\Delta}$ | $P$  |
|------------|------|------|---------------------|------|
| 1          | 0,98 | 34,5 | 0,84                | 97 % |
| 2          | 0,94 | 60,5 | 0,86                | 97 % |
| 3          | 0,88 | 80,9 | 0,85                | 96 % |
| 4          | 0,82 | 100  | 0,85                | 96 % |
| 5          | 0,74 | 117  | 0,85                | 96%  |
| 6          | 0,66 | 131  | 0,85                | 96 % |
| 7          | 0,58 | 141  | 0,84                | 96 % |
| 8          | 0,51 | 149  | 0,83                | 96 % |
| 9          | 0,45 | 155  | 0,83                | 96 % |
| 10         | 0,39 | 159  | 0,81                | 96 % |

Приведенные в табл. 3 показатели демонстрируют вполне ожидаемое и закономерное снижение коэффициента корреляции  $R$  и рост среднеквадратической погрешности  $S$  прогнозов с увеличением их заблаговременности  $\Delta t$ . В то же время обращает на себя внимание несоответствие между неудовлетворительно большими значениями показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  и, наоборот, очень высокой оправдываемостью прогнозов  $P$ .

Причина такого несоответствия обусловлена тем, что для притока в Ириклинское водохранилище характерно очень резкое увеличение расходов воды в начале основной фазы весеннего половодья [10, 11]. В такой ситуации прогноз методом экстраполяции гидрографа дает весьма

большие ошибки. До и после этого кратковременного периода ошибки прогноза значительно меньше. В результате количество неоправдавшихся прогнозов с абсолютным значением их ошибки, превышающим допустимую ошибку прогноза  $0,674\sigma_{\Delta}$ , относительно невелико, но размер этих ошибок может быть весьма значительным. Ошибки прогноза начальной фазы весеннего половодья дают большой вклад в среднеквадратическую погрешность  $S$  и, следовательно, в показатель  $S/\sigma_{\Delta}$ , но в масштабах всего года продолжительность этой фазы невелика, поэтому оправдываемость всех прогнозов  $P$  очень высокая.

Следует отметить, что неудовлетворительно большие значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  отнюдь не означают низкую точность прогноза. В качестве примера можно привести прогноз среднесуточных расходов притока воды в Ириклинское водохранилище с заблаговременностью  $\Delta t = 3$  суток. Показатель  $S/\sigma_{\Delta}$  равен 0,85, то есть в соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] такие прогнозы оказались неудовлетворительными. В то же время связь между фактическими и прогнозируемыми расходами притока весьма тесная и характеризуется коэффициентом корреляции  $R = 0,88$ . Такой достаточно высокой корреляции соответствует вполне неплохое совпадение фактического и спрогнозированного хода расхода воды, которое демонстрирует рис. 2.

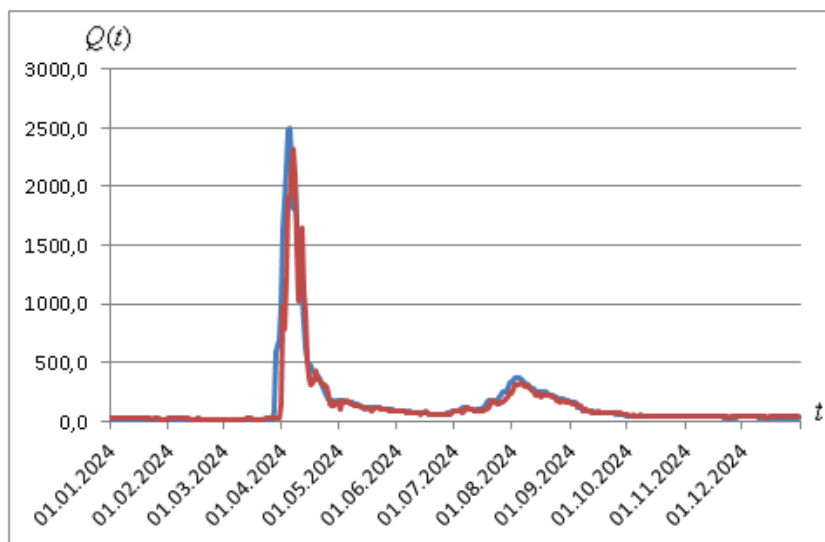


**Рис. 2.** Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью  $\Delta t = 3$  суток (красным) ход среднесуточных расходов притока воды в Ириклинское водохранилище в 2024 году.

**Fig. 2.** Observed (blue) and forecasted with a lead time of 3 days (red) of average daily water inflow into the Iriklienskoye Reservoir in 2024.

Прогноз притока в водохранилище за различные периоды

Метод экстраполяции гидрографа может быть также применен для получения прогноза притока воды в Ириклинское водохранилище за период продолжительностью  $T = 3, 5, 7, 10$  суток. Этим методом подобная задача была уже успешно решена при прогнозировании притока в Цимлянское водохранилище [3].

В данном случае при дате составления прогноза  $t$  прогнозируемой величиной является  $Q_T(t)$  – средний расход притока воды за  $T$  суток, равный среднему арифметическому расходов  $Q(t+1), \dots, Q(t+T)$ .

При использовании метода экстраполяции гидрографа в качестве предикторов фигурируют те же среднесуточные расходы притока воды  $Q(t), Q(t-1), \dots, Q(t-k)$  за дату составления прогноза  $t$  и за 5 предыдущих суток. Ежедневно выпускаемый в течение всего года прогноз этой величины  $\tilde{Q}_T(t)$ , получаемый методом экстраполяции гидрографа, определяется формулами (8) и (9) при  $k = 5$ ,  $\min Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $\max Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Заблаговременность такого прогноза  $\Delta t$  равна продолжительности периода осреднения  $T$  суток.

Соответствующие каждому значению продолжительности рассматриваемого периода  $T = 3, 5, 7, 10$  суток параметры  $a_0(T), a_1(T), \dots, a_5(T), b(T)$  формулы (8) получены методом наименьших квадратов по ряду ежедневных значений среднесуточных расходов притока за период с 01.01.2012 по 31.12.2024. Их значения помещены в табл. 4.

**Таблица 4.** Параметры формулы (8) получения прогноза притока в Ириклинское водохранилище за различные периоды

**Table 4.** Parameters of formula (8) for obtaining the forecast of inflow into the Irliklinskoye reservoir for different periods

| Период | 3 суток | 5 суток | 7 суток | 10 суток |
|--------|---------|---------|---------|----------|
| $a_0$  | 1,569   | 1,630   | 1,584   | 1,436    |
| $a_1$  | -0,570  | -0,686  | -0,707  | -0,681   |
| $a_2$  | 0,092   | 0,060   | 0,028   | 0,019    |
| $a_3$  | -0,282  | -0,287  | -0,283  | -0,264   |
| $a_4$  | -0,013  | -0,028  | -0,019  | -0,018   |
| $a_5$  | 0,091   | 0,126   | 0,139   | 0,153    |
| $b$    | 7,17    | 11,84   | 16,49   | 22,68    |
| $C_T$  | 259,2   | 432,0   | 604,8   | 864,0    |

Для получения прогноза  $\tilde{W}_T(t)$  объема притока за  $T$  суток в тысячах  $\text{м}^3$  прогноз среднего расхода притока за этот период  $\tilde{Q}_T(t)$  следует умножать на коэффициент  $C_T$ , приведенный в табл. 4.

Показатели качества прогнозов среднего расхода притока в Ириклинское водохранилище за различные периоды продолжительностью  $T$  суток приведены в табл. 5. Для получения среднеквадратической погрешности прогнозов объема притока за  $T$  суток величину  $S$  следует умножать на коэффициент  $C_T$ , помещенный в предыдущей таблице.

**Таблица 5.** Показатели качества прогнозов среднего расхода притока в Ириклинское водохранилище за различные периоды  
**Table 5.** Indicators of the quality of forecasts of the average inflow into the Iriklinskoye reservoir for different periods

| Период   | $R$  | $S$  | $S / \sigma_{\Delta}$ | $P$  |
|----------|------|------|-----------------------|------|
| 3 суток  | 0,95 | 55,1 | 0,63                  | 97 % |
| 5 суток  | 0,90 | 72,9 | 0,61                  | 97 % |
| 7 суток  | 0,85 | 86,7 | 0,62                  | 96 % |
| 10 суток | 0,77 | 100  | 0,65                  | 96 % |

Приведенные в табл. 5 показатели также демонстрируют закономерное снижение коэффициента корреляции  $R$  и рост среднеквадратической погрешности  $S$  прогнозов с увеличением их заблаговременности  $\Delta t = T$ . Достаточно низкие значения показателя  $S / \sigma_{\Delta}$  и высокая оправдываемость прогнозов  $P$  свидетельствуют о том, что эти прогнозы можно считать вполне удовлетворительными.

**Заключение**

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана система методик прогнозирования притока воды в Ириклинское водохранилище на реке Урал. Для получения и проверки предлагаемых методик использована гидрометеорологическая информация за период с 2003 по 2024 год, подготовленная в ФГБУ «Приволжское УГМС».

Для получения ежегодно выпускаемых 5 марта долгосрочных прогнозов объема притока за период весеннего половодья и за второй квартал предложены линейные зависимости этих величин от известного к дате составления прогноза максимального запаса воды в снеге  $S_{\text{max}}$  мм и предложенного В.Н. Паршиным показателя предзимней увлажненности водосбора  $U_{90}$  мм в предыдущем году.

Для получения ежегодно выпускаемых в январе и в феврале предварительных долгосрочных прогнозов объема притока за период весеннего половодья и за второй квартал предложены линейные зависимости этих величин от показателя предзимней увлажненности водосбора  $U_{90}$  мм. Возможность использования этих зависимостей обусловлена тем, что объем весеннего притока в Ириклинское водохранилище в гораздо большей степени зависит от предзимней увлажненности его водосбора, чем от запасов воды в снежном покрове.

Схемы ежедневного получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов притока в водохранилище за 1, 3, 5, 7 и 10 суток получены на основе уже хорошо зарекомендовавшего себя метода экстраполяции гидрографа. В качестве предикторов использованы среднесуточные расходы притока в водохранилище за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Заблаговременность таких прогнозов варьирует от 1 до 10 суток.

Предлагаемые схемы получения краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов притока воды в Ириклинское водохранилище являются достаточно простыми. Они могут без особых затрат времени использоваться в оперативной прогностической практике, а в перспективе – в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов, а также своевременного их доведения до всех заинтересованных потребителей.

Проверка этих методик показала, что согласно требованиям Наставления по службе прогнозов [7] получаемые с их помощью прогнозы относятся к категории удовлетворительных. Это позволяет рекомендовать их к применению в целях повышения эффективности использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища и, в частности, повышения научной обоснованности режима его наполнения и опорожнения.

#### Список литературы

1. *Бориц С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
2. *Бориц С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
3. *Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 47-63.
4. *Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
5. *Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117.
6. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Российской академии наук, 2019. 300 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 193 с.
8. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – М.: Гидрометеиздат, 1963. 394 с.

9. Правила использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на реке Урал. М.: Министерство мелиорации и водных ресурсов РСФСР, 1973. 19 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 515 с.
11. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 356 с.
12. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 245 с.
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. Flood forecasting: a global perspective / ed. by T.E. Adams, III, T.C. Pagano. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2016. P. 421-433.
15. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. Geneva, Switzerland, 2009. 302 p.
16. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) / Technical Reports in Hydrology and Water Resources, no. 55. Geneva: HWR, 1994. 23 p.
17. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. Geneva, Switzerland, 2011. 138 p.
18. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. 1970. Vol. 10. P. 282-290.

## 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., Yumina N.M. Forecasting of water inflow into the Tsimlyansk Reservoir. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, no. 4, pp. 47-63 [in Russ.].
4. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Prognozirovanie stoka rek Rossii. Moscow, Gidrometcentr Rossii publ., 2023, 200 p. [in Russ.].
5. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Selection of methods for streamflow forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 391, no. 1, pp. 71-117 [in Russ.].
6. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh basseynov. Moscow, Izd-vo RAN, 2018, 300 p. [in Russ.].
7. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Part 1. Prognozy rezhima vod sushi. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962, 193 p. [in Russ.].
8. Popov E.G. Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1963. 394 p. [in Russ.].
9. Pravila ispol'zovaniya vodnyh resursov Iriklinского водохранилища на r. Urale. Moscow, Ministerstvo melioratsii i vodnyh resursov RSFSR, 1973, 19 p. [in Russ.].
10. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Tom 12. Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyy Kazahstan, Vyp. 2, Uralo-Embinskiy rayon. Leningrad., Gidrometeoizdat publ., 1970, 515 p. [in Russ.].
11. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 356 p. [in Russ.].

12. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
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. Flood forecasting: a global perspective / ed. by T.E. Adams, III, T.C. Pagano. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2016, pp. 421-433.
15. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168. WMO, Geneva, 2009, 302 p.
16. Lambert A.O. Development and Use of the Management Overview of Flood Forecasting Systems (MOFFS) / Technical Reports in Hydrology and Water Resources, no. 55. Geneva: HWR, 1994, 23 p.
17. Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. WMO, Geneva, Switzerland, 2011, 138 p.
18. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, pp. 282-290.

*Поступила 04.02.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 04.02.2025; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-149-164>

УДК 551.583:551.524(479.24)

## Современные особенности температуры воздуха в Прикаспийском регионе Азербайджана

*Дж.С. Гусейнов<sup>1</sup>, Н.Н. Исмаилова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ЗАО «Азербайджан Хава Йоллары», УВД «Азераэронавигация»,  
г. Баку, Азербайджан;

<sup>2</sup> Министерство экологии и природных ресурсов Азербайджана,  
Национальная Гидрометеорологическая Служба, г. Баку, Азербайджан  
*camal\_huseynov\_88@mail.ru, naile\_ismayilova40@mail.ru*

Изучены современные особенности распределения показателей температуры воздуха в Прикаспийском регионе Азербайджана с использованием первичных данных 27 гидрометеорологических станций Национальной гидрометеорологической службы Азербайджана, расположенных в Прикаспийском регионе, за период с 1961 по 2023 год. Уточнена статистическая значимость временных рядов, определены математические средние показатели и особенности их распределения. Показано, что 90 % самых теплых лет наблюдались после 2005 года, самые холодные – до 1993 года, что является наглядным доказательством резкого потепления в регионе. В период 1991–2023 гг. среднегодовые значения температуры воздуха увеличились на 0,9 °С (наибольший рост показателей в августе – на 1,5 °С). Изменение климата в Прикаспийском регионе усиливает процессы опустынивания, засоления и эрозии почвы. Рекомендуется учитывать эти данные при решении задач строительства, энергетики и выработки политики по смягчению последствий изменения климата.

*Ключевые слова:* температура воздуха, глобальное потепление, климатическая норма, аномалия, цифровая модель рельефа, тренд температуры воздуха

## Modern features of air temperature in the Caspian region of Azerbaijan

*J.S. Huseynov<sup>1</sup>, N.N. Ismailova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> "Azerbaijan Airlines" Closed Joint-Stock Company,  
Azeraeronavigation Air Traffic Control, Baku, Azerbaijan;

<sup>2</sup> Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan,  
National Hydrometeorological Service, Baku, Azerbaijan  
*camal\_huseynov\_88@mail.ru, naile\_ismayilova40@mail.ru*

The study examines the modern features of the air temperature distribution in the Caspian region of Azerbaijan using initial data from 27 hydrometeorological stations of the National Hydrometeorological Service of Azerbaijan located in the Caspian region over the period from 1961 to 2023. The statistical significance of the time series was estimated, and mathematical averages as well as the features of their distribution were determined. It is shown that 90 % of the warmest years in the series occurred after 2005, while the coldest years were recorded before 1993, which is a clear evidence of dramatic warming in the region. In 1991–2023, the average annual air temperature in the region increased by 0.9 °C (the highest increase was observed in August – by 1.5 °C). Climate changes in the Caspian

region are exacerbating processes of desertification, salinization, and erosion. It is recommended to consider these findings when solving construction and energy production problems and elaborating policy on mitigation strategies.

*Keywords:* air temperature, global warming, climatic norm, anomaly, DEM (Digital Elevation Model), air temperature trend

## Введение

Поверхностный покров (почва, вода, лед, растительность и. т. д.) обуславливает различное распределение температуры воздуха на сложном рельефе земной поверхности [4]. Увеличение температурных различий между регионами на рассматриваемой территории приводит к изменению метеорологических элементов (давление, температура и. т. д.) и провоцирует атмосферные возмущения. Атмосфера Земли постоянно изменяет свои физические свойства, создавая движение воздушных масс, что выделяется как на локальном, так и на глобальном масштабах [2, 5]. Повторение таких процессов в любом месте в течение многолетнего периода формирует местный климатический режим. Хотя метеорологические элементы распределяются во времени и пространстве по-разному, режим температуры воздуха и осадков практически не имеет резких отклонений в течение многолетнего периода [7].

Как и во всех регионах, за последние 30 лет изменение климата расширяет свое влияние и в Прикаспийском регионе Азербайджана. Уже всем известно, что современные изменения климата наблюдаются в виде «потепления» [9, 15]. Глобальное потепление усиливает повторяемость во времени и пространстве таких опасных природных явлений, как засухи, наводнения, оползни, опустынивание и т. д. [13]. Увеличение частоты наблюдений со временем делает возможным проведение новых исследований в этом направлении. Прикаспийский регион Азербайджана отличается своими физическими характеристиками от других регионов страны. Его физико-географическое положение и сложный рельеф формируют климатические условия. Так, на севере меридиональное протяжение Большого Кавказского хребта и его гипсометрические особенности способствуют деформации воздушных масс, приходящих с севера, и частому повторению сильных ветров в направлении Апшеронского полуострова. На прибрежных территориях Апшеронского полуострова и Кура-Аразской низменности наблюдаются высокие показатели тепловых ресурсов в течение всего года. На юге параллельное протяжение Талышских горных хребтов способствует увеличению осадков и формированию обильных запасов влаги. Одним словом, различные особенности орографии требуют изучения территорий с похожими характеристиками рельефа по отдельности [1–3, 10].

В данной работе выявлены современные особенности температуры воздуха в четырех физико-географических районах, составляющих Прикаспийский регион Азербайджана: северо-восточная часть Большого Кавказа и Гобустан-Апшеронский физико-географический район, Кура-Аразский район Куринской межгорной впадины, Ленкоранский район.

В исследованиях, проведенных в различные периоды такими учеными, как Э.М. Шыхлинский, Э.А. Мамедзаде, С.Г. Сафаров, Р.Н. Махмудов, Р.М. Мамедов, Н.Ш. Гусейнов, Ф.А. Иманов, З.С. Аллахвердиев, Г.Л. Набиев, У.Р. Тагиева, Дж.С. Гусейнов и др., изучались месячные, сезонные и многолетние изменения температуры воздуха. Однако увеличение временных рядов и резкое изменение климатического режима требуют нового современного анализа климатических компонентов в этом регионе.

**Материалы и методы.** Исследование проведено на основе первичных данных 27 гидрометеорологических станций Национальной гидрометеорологической службы Азербайджана в Прикаспийском регионе, охватывающих период с 1961 по 2023 год (табл. 1).

В статье использованы математические, статистические и картографические методы, рассчитаны среднемесячные, сезонные, многолетние и зональные характеристики распределения температуры воздуха, а также ее временные изменения. Многолетний период (1961–2023 гг.) был разделен на десятилетия для определения тенденций температуры воздуха и сравнения ее средних показателей за период 1991–2023 гг. с соответствующими показателями за 1961–1990 гг., которые рекомендованы Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в качестве нормы [14, 16]. Результаты анализа представлены в виде таблиц, гистограмм, графиков в Microsoft Excel, а электронные карты визуализированы с использованием программного обеспечения ArcGIS.

**Цель исследования.** Основная цель исследования заключается в определении современных особенностей распределения температуры воздуха во времени и пространстве на территории Прикаспийского региона Азербайджана, а также в анализе ее изменений по сравнению с периодом 1961–1990 гг. В рамках исследования изучались месячное, сезонное, годовое и территориальное распределение температуры воздуха. Изменения средних значений температуры воздуха за период с 1991 по 2023 год сравнивались с нормативными показателями (1961–1990 гг.).

**Обсуждение результатов исследования.** Распределение средней месячной температуры в Прикаспийском регионе отличается особенностями в течение года. Так, на северо-восточном склоне Большого Кавказа самыми холодными месяцами являются январь ( $-1.8^{\circ}\text{C}$ ) и февраль ( $-1.3^{\circ}\text{C}$ ). С марта ( $2.0^{\circ}\text{C}$ ) температура воздуха в регионе становится положительной. На северной части прикаспийской зоны с апреля ( $7.2^{\circ}\text{C}$ ) температура воздуха начинает повышаться. С мая ( $12.2^{\circ}\text{C}$ ) становится жарче, а самыми теплыми месяцами считаются июль ( $19.2^{\circ}\text{C}$ ) и август ( $18.9^{\circ}\text{C}$ ). С сентября ( $14.8^{\circ}\text{C}$ ) температура начинает снижаться, и в октябре ( $9.6^{\circ}\text{C}$ ) и ноябре

(4.2 °C) она продолжает падать. С приходом зимы снова наступает похолодание, и в декабре средняя месячная температура составляет 0.5 °C. Среднегодовая температура региона составляет 8.5 °C.

**Таблица 1.** Основные характеристики гидрометеорологических станций  
**Table 1.** The main characteristics of hydrometeorological stations

| Станция                                                 | Высота, км | Используемые периоды наблюдений, годы | Климатические нормы по температуре воздуха (1961-1990), °C. |
|---------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Северо-восточная часть Большого Кавказа</b>          |            |                                       |                                                             |
| Шахдаг                                                  | 2712       | 2010-2020, 2022                       | -                                                           |
| Кырыз                                                   | 2071       | 1961-2022                             | 4.6                                                         |
| Хыналыг                                                 | 2049       | 1991-2021                             | -                                                           |
| Халтан                                                  | 1104       | 1986-2022                             | 8.3                                                         |
| Алтыгадж                                                | 1099       | 1961-2022                             | 9.0                                                         |
| Куба                                                    | 550        | 1961-2022                             | 10.2                                                        |
| Хачмаз                                                  | 27         | 1961-2022                             | 12.5                                                        |
| Набрань                                                 | 14         | 1998-2021                             | -                                                           |
| <b>Гобустан-Апшеронский физико-географический район</b> |            |                                       |                                                             |
| Маштага                                                 | 27         | 1961-2023                             | 14.0                                                        |
| Баку                                                    | 2          | 1961-2023                             | 14.6                                                        |
| Чиллов                                                  | -17        | 1961-2023                             | 14.3                                                        |
| Нефтяные Камни                                          | -17        | 1961-2023                             | 14.4                                                        |
| Алят                                                    | -18        | 1961-2023                             | 14.8                                                        |
| Сумгаит                                                 | -20        | 1961-2023                             | 14.3                                                        |
| Пираллахи                                               | -25        | 1961-2023                             | 14.4                                                        |
| <b>Кура-Аразский район</b>                              |            |                                       |                                                             |
| Билясувар                                               | 75         | 1961-2023                             | 14.6                                                        |
| Гаджигабул                                              | -7         | 1961-2023                             | 15.0                                                        |
| Джафархан                                               | -16        | 1961-1966, 1968-1985, 1987-2023       | 14.4                                                        |
| Сальян                                                  | -21        | 1965-2023                             | 14.7                                                        |
| Нефтчала                                                | -23        | 1961-2023                             | 14.7                                                        |
| <b>Ленкоранский район</b>                               |            |                                       |                                                             |
| Калвез                                                  | 1567       | 1984-2020                             | 8.2                                                         |
| Лерик                                                   | 1115       | 1961-1990, 2005-2023                  | 10.1                                                        |
| Ярдымлы                                                 | 730        | 1961-2023                             | 12.0                                                        |
| Гейтепе                                                 | 2          | 1961-1991, 1993-2021                  | 14.4                                                        |
| Ленкорань                                               | -20        | 1961-2023                             | 14.1                                                        |
| Астара                                                  | -23        | 1961-1990, 1993-2023                  | 14.6                                                        |

В Апшеронской акватории Хазарского региона распределение средне-месячных температур в течение года имеет свои особенности. Январь (5.4 °С) и февраль (5.2 °С) – самые холодные месяцы года. С марта (7.5 °С) по апрель температура воздуха повышается до 11.8 °С. Резкий рост начинается в мае (17.6 °С), а в июне достигает 23.1 °С. Самые теплые месяцы – июль (26.1 °С) и август (26.7 °С). С сентября (22.6 °С) температура воздуха начинает снижаться, в октябре составляет 17.3 °С, в ноябре – 11.5 °С. В декабре этот показатель уменьшается до 7.4 °С. Среднегодовая температура акватории составляет 15.2 °С.

Средняя месячная температура в Кура-Аразской низменности в январе (4.2 °С) и феврале (5.3 °С) считается самой низкой в году. В этой области средняя температура в марте (8.6 °С) на всех станциях уже имеет положительные показатели, а с апреля (13.7 °С) температура начинает повышаться. Средняя месячная температура в июле (27.4 °С) и августе (27.2 °С) достигает самых высоких значений, являясь самыми жаркими месяцами года. В прикаспийской части Кура-Аразской низменности в сентябре (22.8 °С) и октябре (17.0 °С) температура начинает снижаться и в ноябре достигает 10.4 °С. В декабре наступают холода, и средняя температура падает до 5.8 °С. Среднегодовая температура в прикаспийской части низменности составляет 15.6 °С.

В Ленкоранском районе, расположенном в прибрежной части Каспийского моря, распределение среднедневных температур в разные месяцы года различно. Январь (3.1 °С) и февраль (3.7 °С) – самые холодные месяцы в году. В марте температура воздуха уже имеет положительные значения (6.9 °С). С апреля (11.4 °С) температура начинает повышаться. Средняя температура воздуха в мае составляет 16.5 °С, а в июне – 21.3 °С. В июле и августе она достигает своего максимума (23.6 °С). В сентябре (19.4 °С) и октябре (14.5 °С) температура начинает снижаться и в ноябре опускается до 8.7 °С. В декабре холодает, и средняя температура составляет 4.9 °С. В целом, средние месячные температуры снижаются с прибрежных равнин в сторону высокогорных районов. Среднегодовая температура в районе составляет 13.1 °С.

Среднемесячные температуры в регионах распределены неравномерно. В прибрежной зоне Каспийского моря январь (2.7 °С) и февраль (3.2 °С) считаются самыми холодными месяцами. Средняя температура начинает повышаться в марте (6.2 °С) и апреле (11.0 °С). Самые высокие температуры наблюдаются в июле и августе (24.1 °С). В сентябре (19.9 °С) и октябре (14.6 °С) температура воздуха начинает снижаться, а в ноябре достигает 8.7 °С. В декабре холода усиливаются, и средняя температура составляет около 4.7 °С. Среднегодовая температура в регионе составляет 13.1 °С (табл. 2).

На прибрежных территориях Каспийского моря среднемесячные экстремальные показатели температуры воздуха в течение года отличаются своими особенностями. Так, на северо-восточном склоне Большого Кавказского хребта многолетний (1961–2023 гг.) минимальный среднемесячный

максимум температуры наблюдался в феврале (2.7 °C), а более высокие показатели начинаются с июня (20.9 °C) и приходятся на июль (23.0 °C) и август (22.6 °C). Среднегодовой максимальный показатель температуры в этом регионе составляет около 10.3 °C.

**Таблица 2.** Распределение температуры воздуха по месяцам в Прикаспийском регионе (1991–2023 гг.)

**Table 2.** The monthly distribution of air temperature in the Caspian region (1991–2023)

| I                                                       | II   | III | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII | Год  |
|---------------------------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| <b>Северо-восточная часть Большого Кавказа</b>          |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| -1.8                                                    | -1.3 | 2.0 | 7.2  | 12.2 | 16.6 | 19.2 | 18.9 | 14.8 | 9.6  | 4.2  | 0.5 | 8.5  |
| <b>Гобустан-Апшеронский физико-географический район</b> |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| 5.4                                                     | 5.2  | 7.5 | 11.8 | 17.6 | 23.1 | 26.1 | 26.7 | 22.6 | 17.3 | 11.5 | 7.4 | 15.2 |
| <b>Кура-Аразский район</b>                              |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| 4.2                                                     | 5.3  | 8.6 | 13.7 | 19.6 | 25.0 | 27.4 | 27.2 | 22.8 | 17.0 | 10.4 | 5.8 | 15.6 |
| <b>Ленкоранский район</b>                               |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| 3.1                                                     | 3.7  | 6.9 | 11.4 | 16.5 | 21.3 | 23.6 | 23.6 | 19.4 | 14.5 | 8.7  | 4.9 | 13.1 |
| <b>Прикаспийский регион</b>                             |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |
| 2.7                                                     | 3.2  | 6.2 | 11.0 | 16.5 | 21.5 | 24.1 | 24.1 | 19.9 | 14.6 | 8.7  | 4.7 | 13.1 |

На акватории Апшерона за последние 63 года минимальный показатель максимальной температуры наблюдался в январе (7.8 °C). Максимальная среднемесячная температура начинает расти с мая (20.9 °C) и достигает наивысшего уровня в июле (29.0 °C) и августе (28.8 °C). Максимальный среднегодовой показатель температуры на акватории составляет 16.6 °C.

Распределение экстремальных показателей температуры воздуха в течение года в Кура-Аразской низменности также имеет важное значение. В этом районе минимальный показатель максимальной температуры наблюдается в январе (7.2 °C). Средняя максимальная месячная температура начинает повышаться с мая (22.9 °C) и достигает наивысшего уровня в июле (30.0 °C) и августе (29.2 °C). Средний годовой показатель максимальной температуры в природной области Куринской межгорной впадины составляет около 16.8 °C.

Экстремальные показатели температурного режима в Ленкоранском районе также имеют своеобразное распределение. В этом регионе средний месячный максимальный показатель в феврале (7.1 °C) является самым низким по сравнению с другими месяцами. Более высокие средние месячные максимальные температуры наблюдаются начиная с июня (24.6 °C), а также в июле (26.9 °C) и августе (26.1 °C). В Ленкоранском природном регионе максимальный показатель среднегодовой температуры составляет 14.5 °C.

В целом, в регионе, прилегающем к Каспийскому морю, многолетние (1961–2023 гг.) среднемесячные максимальные температуры достигают своего минимального уровня в январе ( $6.2^{\circ}\text{C}$ ). Максимальная среднегодовая температура в регионе наблюдается в июле ( $27.2^{\circ}\text{C}$ ) и августе ( $26.7^{\circ}\text{C}$ ). Максимальные показатели среднегодовой температуры в регионе распределяются в интервале от  $10.3$  до  $16.8^{\circ}\text{C}$ . В этом регионе абсолютный многолетний максимум температуры был зафиксирован на минимальном уровне в январе ( $7.8^{\circ}\text{C}$ ). На территориях, прилегающих к Каспийскому морю, самый высокий абсолютный максимум температуры за многолетний период был зарегистрирован в июле ( $30.0^{\circ}\text{C}$ ) (табл. 3).

Были проанализированы также минимальные экстремальные значения средних месячных температур за многолетний период в прибрежных районах Каспийского моря. Установлено, что в северо-западной части региона, окружающего Каспий, минимальная средняя месячная температура в январе является самой низкой. Минимальные средние месячные температуры изменяются в зависимости от месяца. Самое низкое значение за год наблюдается в январе ( $-7.9^{\circ}\text{C}$ ), когда температура опускается ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . Минимальные средние температуры достигают своего максимума в мае ( $12.8^{\circ}\text{C}$ ), а затем в июле ( $15.7^{\circ}\text{C}$ ) и августе ( $14.7^{\circ}\text{C}$ ). Для северо-восточной части Большого Кавказа минимальная средняя годовая температура составляет  $6.7^{\circ}\text{C}$ . В этот период минимальная средняя температура на акватории Апшеронского полуострова также была зафиксирована в январе ( $0.0^{\circ}\text{C}$ ). В мае ( $14.1^{\circ}\text{C}$ ) минимальная средняя температура на акватории достигла своего максимума, а в июле ( $23.3^{\circ}\text{C}$ ) и августе ( $24.0^{\circ}\text{C}$ ) показатели продолжили расти. Средняя минимальная температура в этом районе колеблется в пределах  $13.1^{\circ}\text{C}$ . В прибрежных районах Куру-Аразской низменности минимальная средняя месячная температура была самой низкой в январе ( $-2.3^{\circ}\text{C}$ ), когда температура опускалась ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . С мая ( $14.1^{\circ}\text{C}$ ) минимальная средняя температура достигала своего максимума в июле ( $24.6^{\circ}\text{C}$ ) и августе ( $24.1^{\circ}\text{C}$ ). Средняя минимальная температура в низменности составила  $13.2^{\circ}\text{C}$ . В Ленкоранском районе также наблюдается различное распределение минимальных средних месячных температур. Самая низкая минимальная температура года была зафиксирована в январе ( $-3.3^{\circ}\text{C}$ ). Минимальная средняя температура постепенно повышалась с мая ( $12.6^{\circ}\text{C}$ ) до августа ( $20.3^{\circ}\text{C}$ ). Средняя минимальная температура в прибрежной части Ленкоранского района составила  $10.8^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, были рассмотрены минимальные экстремумы, зафиксированные в различных месяцах на протяжении многолетнего периода для территорий, расположенных в этом регионе. Этот показатель был зафиксирован в январе ( $-3.4^{\circ}\text{C}$ ) как самая низкая температура региона. Минимальная среднегодовая температура в регионе начинается с мая ( $12.1^{\circ}\text{C}$ ) и повышается до  $20.8^{\circ}\text{C}$  в июле и августе. Минимальные значения среднегодовой температуры в районе вокруг Каспийского моря варьируются в интервале от  $6.7$  до  $13.2^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 3.** Средние месячные максимальные и минимальные температуры воздуха в прикаспийском регионе за период с 1961 по 2023 г.

**Table 3.** Monthly mean maximum and minimum temperatures in the Caspian region over the period from 1961 to 2023

| T, °C              | Район                                            | I           | II          | III         | IV          | V           | VI          | VII         | VIII        | IX          | X           | XI          | XII         | Год         |
|--------------------|--------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Т <sub>макс.</sub> | Северо-восточная часть Большого Кавказа          | 2.8         | 2.7         | 6.7         | 11.2        | 15.3        | 20.9        | 23.0        | 22.6        | 18.6        | 14.1        | 8.9         | 6.5         | 10.3        |
|                    | Гобустан-Апшеронский физико-географический район | 7.8         | 8.3         | 10.2        | 14.8        | 20.9        | 26.5        | 29.0        | 28.8        | 24.6        | 20.3        | 15.6        | 11.7        | 16.6        |
|                    | Кура-Аразский район                              | 7.2         | 8.3         | 12.2        | 16.8        | 22.9        | 28.1        | 30.0        | 29.2        | 25.2        | 20.8        | 14.0        | 9.3         | 16.8        |
|                    | Ленкоранский район                               | 7.2         | 7.1         | 11.4        | 15.1        | 19.5        | 24.6        | 26.9        | 26.1        | 22.4        | 18.6        | 13.2        | 9.1         | 14.5        |
|                    | <b>Прикаспийский регион</b>                      | <b>6.2</b>  | <b>6.6</b>  | <b>10.1</b> | <b>14.5</b> | <b>19.6</b> | <b>25.0</b> | <b>27.2</b> | <b>26.7</b> | <b>22.7</b> | <b>18.5</b> | <b>12.9</b> | <b>9.2</b>  | <b>14.5</b> |
|                    | <b>Абсолютный максимум</b>                       | <b>7.8</b>  | <b>8.3</b>  | <b>12.2</b> | <b>16.8</b> | <b>22.9</b> | <b>28.1</b> | <b>30.0</b> | <b>29.2</b> | <b>25.2</b> | <b>20.8</b> | <b>15.6</b> | <b>11.7</b> | <b>16.8</b> |
| Т <sub>мин.</sub>  | Северо-восточная часть Большого Кавказа          | -7.9        | -6.9        | -2.5        | 3.1         | 7.6         | 12.8        | 15.7        | 14.7        | 11.8        | 4.6         | -2.6        | -4.9        | 6.7         |
|                    | Гобустан-Апшеронский физико-географический район | 0,0         | 0.5         | 3.8         | 8.4         | 14.1        | 19.7        | 23.3        | 24.0        | 19.3        | 12.6        | 6.2         | 3.0         | 13.1        |
|                    | Кура-Аразский район                              | -2.3        | -2.1        | 4.8         | 10.4        | 14.1        | 21.2        | 24.6        | 24.1        | 19.3        | 12.3        | 3.7         | 1.0         | 13.2        |
|                    | Ленкоранский район                               | -3.3        | -3.1        | 1.8         | 7.3         | 12.6        | 16.9        | 19.7        | 20.3        | 16.1        | 9.3         | 3.2         | -0.8        | 10.8        |
|                    | <b>Прикаспийский регион</b>                      | <b>-3.4</b> | <b>-2.9</b> | <b>2.0</b>  | <b>7.3</b>  | <b>12.1</b> | <b>17.6</b> | <b>20.8</b> | <b>20.8</b> | <b>16.6</b> | <b>9.7</b>  | <b>2.6</b>  | <b>-0.4</b> | <b>10.9</b> |
|                    | <b>Абсолютный минимум</b>                        | <b>-7.9</b> | <b>-6.9</b> | <b>-2.5</b> | <b>3.1</b>  | <b>7.6</b>  | <b>12.8</b> | <b>15.7</b> | <b>14.7</b> | <b>11.8</b> | <b>4.6</b>  | <b>-2.6</b> | <b>-4.9</b> | <b>6.7</b>  |

Анализ экстремальных показателей показывает, что в течение много-летнего периода самая высокая средняя максимальная температура воздуха наблюдалась в основном на территории Кура-Аразская низменность, Апшеронского полуострова и в Ленкоранском районе, а самый низкий минимальный показатель чаще всего фиксировался в северо-восточной части-Большого Кавказа.

Апшеронский полуостров, Кура-Аразская низменность и Ленкоранский район не демонстрируют заметных изменений в среднесезонных и сезонных показателях, однако на севере региона эти показатели имеют несколько иные значения. В Прикаспийском регионе Азербайджана средние сезонные температуры колеблются зимой от 4 до 6 °С, весной от 11 до 14 °С, летом от 23 до 27 °С, осенью от 15 до 17 °С. Самый теплый сезон – лето, а самый холодный – зима. В северной части региона средние сезонные температурные показатели ниже, чем в других районах. Так, здесь средние сезонные температуры составляют зимой -0.9 °С, весной 7.1 °С, летом 18.2 °С, осенью 9.5 °С (рис. 1).

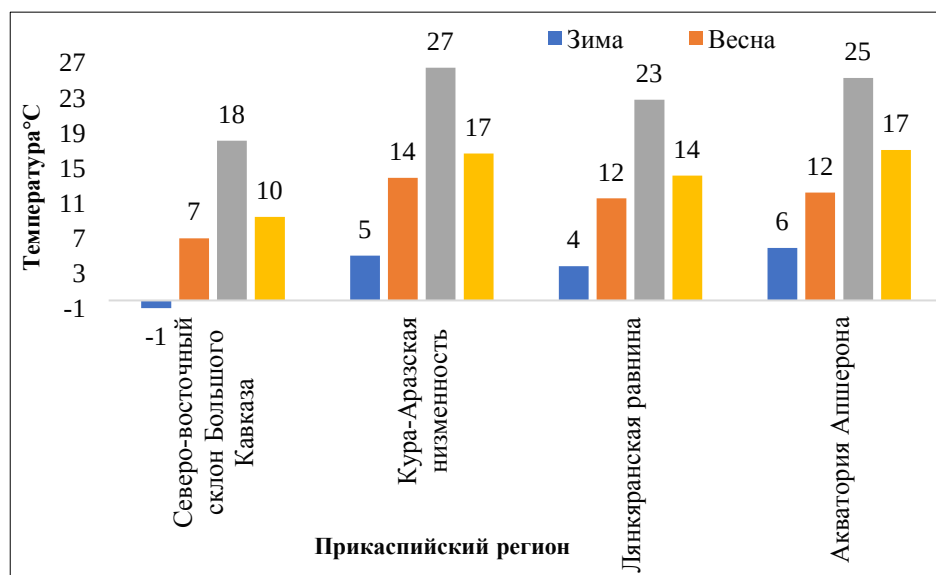


**Рис. 1.** Распределение температуры воздуха по сезонам (1991–2023).

**Fig. 1.** The seasonal distribution of air temperature (1991–2023).

На основе первичных данных гидрометеорологических станций Прикаспийского региона была составлена электронная карта в программе ArcGIS, отражающая современное распределение среднегодовых температурных показателей по территории, а также определены показатели для районов, где отсутствуют данные наблюдений. Карта была создана с использованием цифровой модели рельефа (DEM), полученной путем

дешифрирования спутниковых снимков (satellite data), с точной классификацией высот [4]. На трехмерной карте, отражающей реальные координаты и гипсометрические показатели территории, точность составляет менее 30 м по вертикали и 10 м по горизонтали, с минимальной вероятностью смещения.

Если взглянуть на карту, то в первую очередь можно заметить, что среднегодовая температура на равнинных территориях выше по сравнению с северными и южными горными районами. На всех участках региона с высотой менее 500 м среднегодовая температура колеблется в пределах 13–16 °С. Эти участки составляют 71.2 % от общей площади. По мере продвижения на запад региона сначала появляются предгорья, а затем низкогорные и высокогорные участки восточной части Большого Кавказа и Талышских гор сменяют друг друга.

Участки гор на западе региона с высотами 501–1000 м составляют 14.3 % от общей площади, где среднегодовая температура воздуха составляет около 11–13 °С. В среднегорных районах на высотах 1001–1500 м (7.4 % территории) этот показатель находится в пределах 9–11 °С. Здесь зона высот 1501–2000 м занимает 4.8 % от общей площади, а среднегодовая температура колеблется в пределах 7–9 °С. Участки с более высокими высотами составляют 2.5 % территории, и по мере увеличения высоты среднегодовая температура снижается. Так, на высотах выше 3500 м среднегодовая температура не превышает 1.0 °С (рис. 2).

Для определения динамики изменения среднегодовой температуры воздуха в регионе за период с 1961 по 2023 год был построен график (рис. 3). Согласно графику, несмотря на колебания температуры в отдельные годы, наблюдается положительный тренд по всем прибрежным территориям в течение всего периода.

Как видно на рисунке, 1966, 1998, 2010, 2012, 2018–2023 годы ряда определены как самые теплые, а 1964, 1969, 1972, 1973, 1976, 1977, 1982, 1984, 1992, 1993 гг. – как самые холодные за последние 10 лет. Анализ показывает, что 90 % самых теплых лет ряда наблюдались после 1998 года, самые холодные – до 1993 года. Это сравнение также является доказательством резкого потепления в регионе.

Региональные климатические изменения в последние десятилетия быстро расширяют свои зоны влияния. В Прикаспийском регионе частота опасных природных явлений и риски для безопасности человека увеличиваются [8, 11, 12]. В исследовании сравнивались средние месячные показатели температуры воздуха за период 1961–1990 гг. с соответствующими показателями за 1991–2023 годы (рис. 4).

Анализы показывают, что по сравнению с 1961–1990 гг. среднегодовая температура воздуха в регионе в 1991–2023 гг. повысилась во все месяцы. Среднегодовое значение положительной аномалии температуры составляет 0.9 °С. Увеличение среднего месячного значения температуры наблюдается в январе и июне (1.0 °С), в феврале, марте и ноябре (1.2–1.3 °С),

в апреле и декабре ( $0.4^{\circ}\text{C}$ ), в мае, июле и сентябре ( $0.6\text{--}0.8^{\circ}\text{C}$ ), в августе ( $1.5^{\circ}\text{C}$ ) и в октябре ( $1.3^{\circ}\text{C}$ ). В ноябре зафиксировано самое низкое среднее месячное повышение температуры ( $0.1^{\circ}\text{C}$ ).

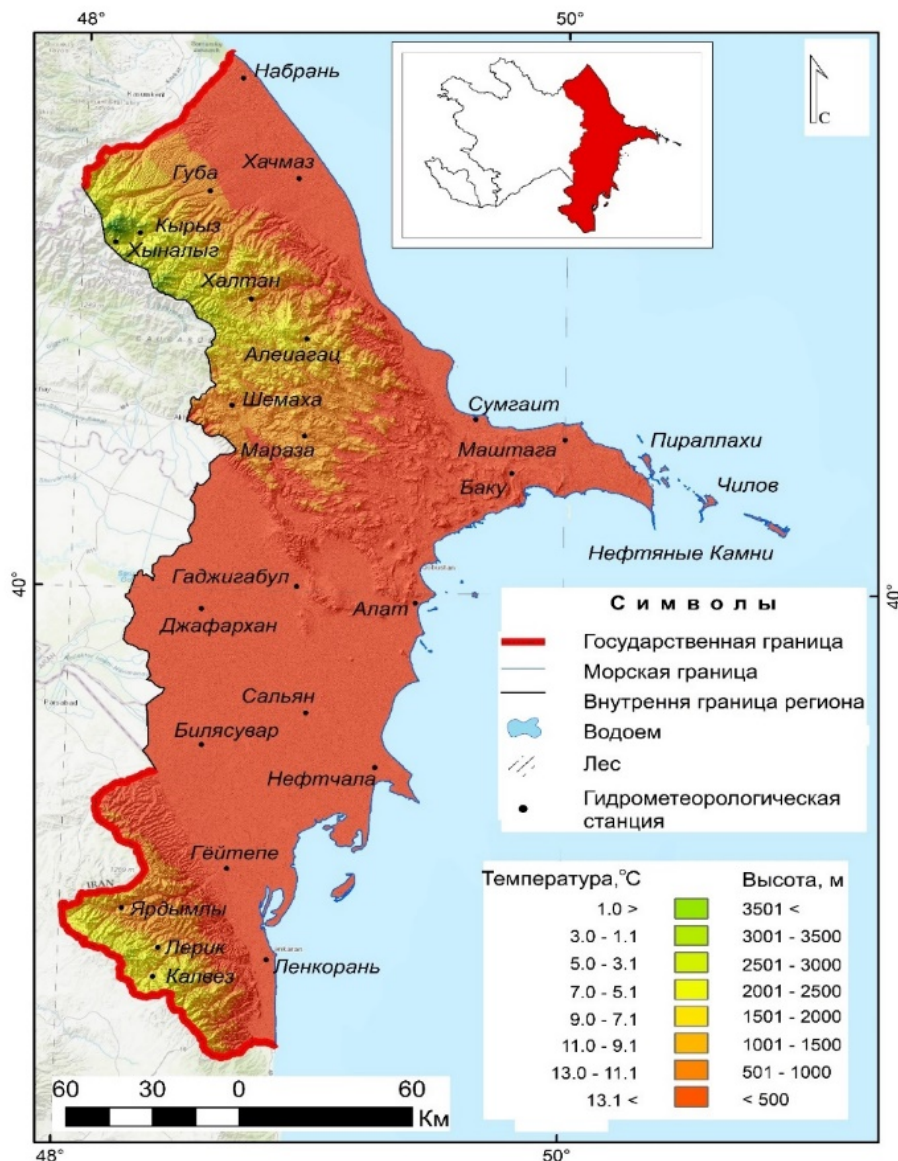


**Рис. 2.** Среднегодовые показатели температуры воздуха (1991-2023).

**Fig. 2.** The average annual parameters of air temperature (1991–2023).

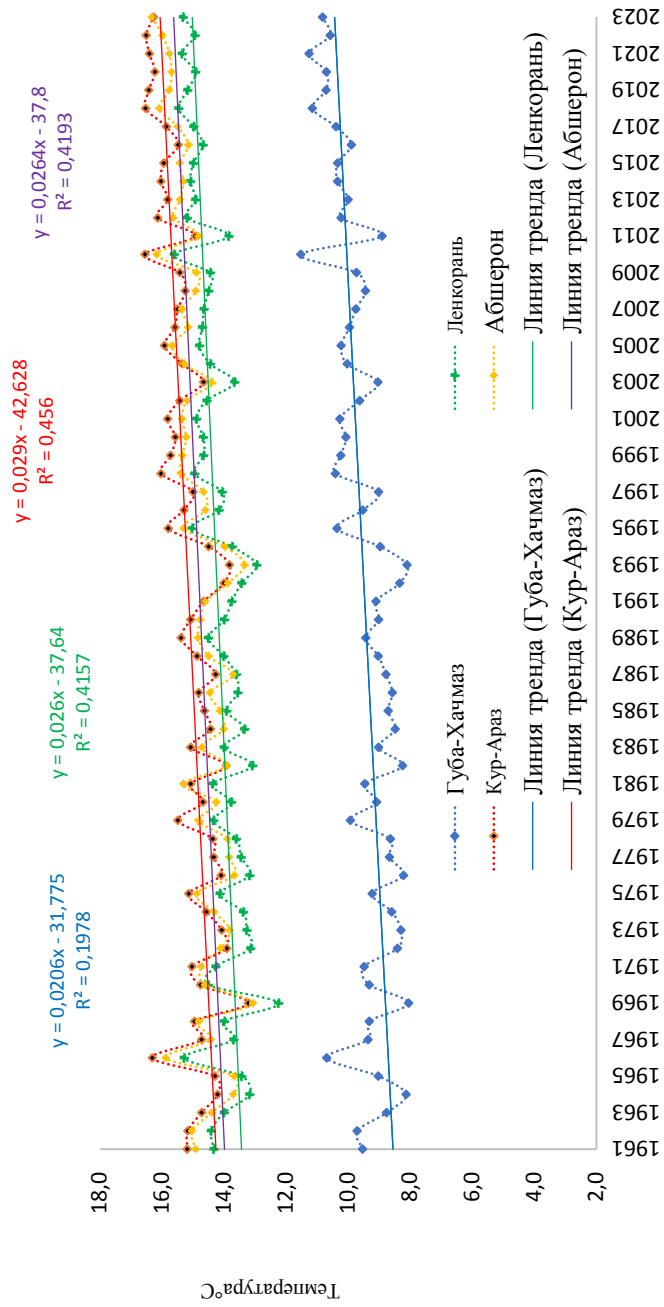


**Рис. 3.** Динамика средней годовой температуры воздуха на гидрометеорологических станциях.  
**Fig. 3.** The dynamics of average annual air temperature at hydrometeorological stations.

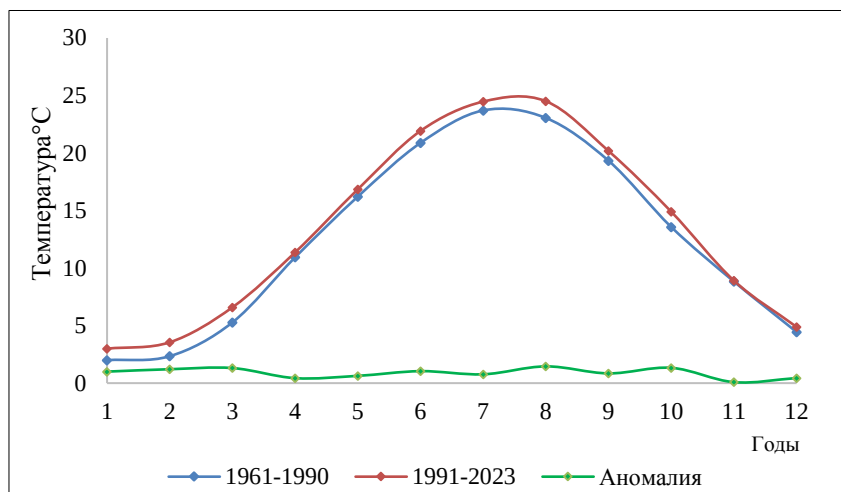


**Рис. 4.** Средняя месячная температуры воздуха в период с 1991 по 2023 г. по сравнению с 1961–1990 гг. в Прикаспийском регионе.

**Fig. 4.** Monthly mean air temperature in the Caspian region during 1991–2023 as compared to 1961–1990.

Исследования показали, что по сравнению с 1961–1990 гг. среднегодовая температура воздуха в регионе в 1991–2023 гг. повысилась во все месяцы. Среднегодовое значение положительной аномалии температуры составляет 0.9 °C. Увеличение среднего месячного значения температуры наблюдается в январе и июне (1.0 °C), в феврале, марте и ноябре (1.2–1.3 °C), в апреле и декабре (0.4 °C), в мае, июле и сентябре (0.6–0.8 °C), в августе (1.5 °C) и в октябре (1.3 °C). В ноябре зафиксировано самое низкое среднее месячное повышение температуры (0.1 °C).

На рис. 5 представлены изменения средних десятилетних показателей годовой температуры воздуха на территориях, расположенных в Прикаспийском регионе, за период с 1961 по 2023 год. Сравнение средних годовых температур показывает, что в каждом последующем десятилетии температура изменялась по сравнению с предыдущим. Результаты анализа показывают, что средняя годовая температура в период 1971–1980 гг. снизилась на 0.3 °C. Однако начиная с 1981–1990 гг. в каждом последующем десятилетии наблюдался рост температуры: на 0.2 °C в 1981–1990 гг., 0.2 °C в 1991–2000 гг., 0.5 °C в 2001–2010 гг., 0.3 °C в 2011–2020 гг., 0.5 °C в 2020–2023 гг. Сравнение самого холодного периода многолетнего цикла (1971–1980 гг.) с периодом 2011–2020 гг. показывает разницу в 1.3 °C, т. е. начиная с 1981 года наблюдается постоянный рост температуры. Если продолжить этот ряд, используя моделирование тренда и сезонности методом экспоненциального сглаживания (метод Хольта-Винтерса), можно прогнозировать, что среднегодовая температура района в 2100 году составит 19.2 °C [11, 12].

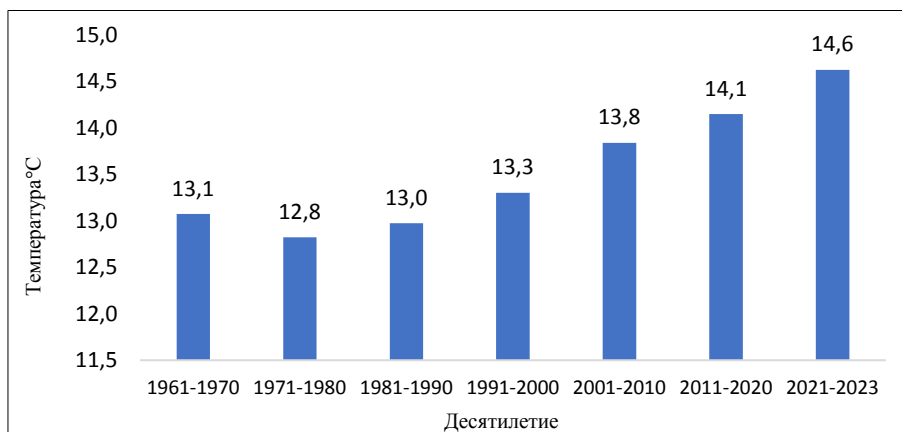


**Рис. 5.** Динамика изменения температуры воздуха по десятилетиям в Прикаспийском регионе.

**Fig. 5.** The decadal dynamics of air temperature in the Caspian region.

**Выводы.** В исследовании, проведенном на основе исходных данных о температуре воздуха в Прикаспийском регионе Азербайджана за период с 1961 по 2023 год, были получены следующие результаты.

1. В регионе среднемесячные показатели температуры воздуха за период с 1991 по 2023 год показали минимальное значение в январе ( $2.7^{\circ}\text{C}$ ), максимальное значение наблюдалось в июле и августе ( $24.1^{\circ}\text{C}$ ). Разница температур между самым холодным и самым теплым месяцами составляет  $21,4^{\circ}\text{C}$ .

2. В Прикаспийском регионе Азербайджана средняя сезонная температура изменяется следующим образом: зимой  $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$ , весной  $12\text{--}14^{\circ}\text{C}$ , летом  $23\text{--}27^{\circ}\text{C}$ , осенью  $14\text{--}17^{\circ}\text{C}$ . На севере региона средняя сезонная температура ниже и составляет: зимой  $-0.9^{\circ}\text{C}$ , весной  $7.1^{\circ}\text{C}$ , летом  $18.2^{\circ}\text{C}$ , осенью  $9.5^{\circ}\text{C}$ .

3. Среднегодовая температура в Прикаспийском регионе Азербайджана на высоте 3501 м над уровнем моря составляет менее  $1.0^{\circ}\text{C}$ . Этот показатель на высоте 500 м и ниже превышает  $13.0^{\circ}\text{C}$ .

4. В Прикаспийском регионе среднегодовая температура за период с 1991 по 2023 год увеличилась на  $0.9^{\circ}\text{C}$  по сравнению с 1961–1990 гг. Максимальное повышение температуры наблюдается в августе ( $1.5^{\circ}\text{C}$ ), марте и октябре ( $1.3^{\circ}\text{C}$ ). В будущем в прибрежных районах Азербайджанской Республики ожидается повышение температуры воздуха и, как следствие, расширение воздействия климатических изменений. Этот процесс затрагивает весь Каспийский регион, и это приведет к увеличению испарения на поверхности моря и в прибрежных районах. С увеличением температуры и испарения также ожидается некоторое увеличение количества осадков. Однако, из-за отсутствия баланса между испарением и количеством осадков,

с течением времени возможно истощение запасов пресной воды. Для решения этой проблемы важно опреснение воды Каспийского моря. С другой стороны, Ленкоранский район, расположенный в этом регионе, считается одной из мер смягчения последствий из-за процесса инфильтрации и накопления дождевых вод. Изменение климата в регионе ведет к расширению процессов опустынивания, засоления и эрозии. Результаты исследовательской работы рекомендуется учитывать при решении всех вышеупомянутых проблем.

### Список литературы

1. Гаджиев А.Х. Анализ температурного режима вегетационного периода на Кура-Араксинской низменности / Материалы Азербайджанского Географического Общества. Баку, 2015. Том XVII. С. 225-228 [на азербайджанском].
2. Гасанов З.Ю. Изменение температуры и периоды осадков на территориях с высокой вероятностью опустынивания в Азербайджане // Материалы Азербайджанского географического общества. Баку, 2008. Том XIII. С. 259-267 [на азербайджанском].
3. Гусейнов Дж.С. Особенности распределения многолетнего температурного режима на территории Азербайджана // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 110-116.
4. Гусейнов Н.Ш. Синоптическая метеорология. Баку: Сада, 2011. 316 с. [на азербайджанском].
5. Гусейнов Дж.С. Особенности долгосрочных изменений температуры на южном и юго-восточном склонах Большого Кавказа // Научные труды НАНА. Баку, 2019. с.76-78. [на азербайджанском].
6. Гусейнов Дж.С. Современные особенности изменения климата в северо-восточной части Большого Кавказского региона // Материалы международной научной конференции на тему «Актуальные проблемы современных естественных и экономических наук». Гянджа, 13-14 июня 2022 г. С. 33-37 [на азербайджанском].
7. Гусейнов Дж.С. Оценка влияния изменений климата на режим осадков Апшеронского полуострова // Труды Азербайджанского географического общества. География и природные ресурсы. Баку, 2022. № 2 (17). С. 17-23 [на азербайджанском].
8. Иманов Ф.А. Статистические методы в гидрометеорологии. Баку: MBM, 2011. 272 с. [на азербайджанском].
9. Исмаилова Н.Н. Влияние изменений климата на температурный режим Апшеронского полуострова и его акватории // Труды Азербайджанского географического общества. География и природные ресурсы. Баку, 2023. №1 (19). С. 25-29 [на азербайджанском].
10. Махмудов Р.Н. Современные изменения климата и опасные гидрометеорологические явления. Баку: Национальная Академия Авиации, 2018. 232 с. [на азербайджанском].
11. Махмудов Р.Н., Мамедова В.И., Дадашова Ф.С. Современные изменения климата и анализ гидрометеорологических условий Азербайджана в последние годы (2021-2022) // Труды Азербайджанского географического общества. География и природные ресурсы. Баку, 2023. №1 (19). С. 3-9 [на азербайджанском].
12. Национальный атлас Азербайджанской Республики. Баку: Государственный комитет по земельным ресурсам и картографии, 2014. 444 с. [на азербайджанском].
13. Танрвердиев Х.К., Хелилов Х.А., Хелилов М.Я. и др. География Азербайджанской Республики. Физическая география. Том I. Баку: Европа, 2015. 530 с. [на азербайджанском].
14. Mammadov R.M., Safarov E.S., Safarov S.H. Study of the surface temperature regime in the Caspian Sea using drifters // ANAS Proceedings. The Sciences of Earth. 2012. №. 1. С. 55-59.
15. Safarov S., Valizadeh K.Kh., Ismayilov V., Safarov E. Detection of upwelling events in the Caspian Sea using thermal satellite image processing // International Journal of Engineering and Geosciences. 2024. Vol. 9, no. 2. P. 247-255.

16. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals // WMO-No. 1203. Geneva, Switzerland, 2017. 29 p.

### References

1. *Gadzhiev A.Kh.* Analysis of the Temperature Regime of the Vegetation Period in the Kura-Araz Lowland / Materials of the Azerbaijani Geographical Society, 2015, Volume XVII, pp. 225-228 [in Azerbaijani].
2. *Gasanov Z.Yu.* Changes in Temperature and Precipitation Periods in Areas with High Probability of Desertification in Azerbaijan. Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, Baku, 2008. XIII, pp. 259-267 [in Azerbaijani].
3. *Guseynov J.S.* Features of the Distribution of Long-Term Temperature Regime in the Territory of Azerbaijan. Moscow, Hydrometeorological Research and Forecasts, 2020, no. 4, pp. 110-116 [in Russ.].
4. *Guseynov N.Sh.* Synoptic Meteorology. Baku, Sada, 2011, 316 p. [in Azerbaijani].
5. *Guseynov J.S.* Features of long-term temperature changes on the southern and southeastern slopes of the Greater Caucasus. Scientific Works of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, 2019. pp. 76-78 [in Azerbaijani].
6. *Guseinov J.S.* Modern features of climate change in the northeastern part of the Greater Caucasus region. Proceedings of the international scientific conference on "Current Issues in Modern Natural and Economic Sciences", Ganja, June 13-14, 2022, pp. 33-37 [in Azerbaijani].
7. *Guseynov J.S.* Assessment of the Impact of Climate Change on the Precipitation Regime of the Absheron Peninsula. Baku, Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, Geography and Natural Resources, 2022, vol. 17, No. 2, pp. 17-23. [in Azerbaijani].
8. *Imanov F.A.* Statisticheskie metody v gidrometeorologii [Statistical Methods in Hydrometeorology]. Baku, MVM, 2011, 272 p. [in Azerbaijani].
9. *Ismailova N.N.* The Impact of Climate Change on the Temperature Regime of the Absheron Peninsula and Its Water Area. Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, Geography and Natural Resources, Baku, 2023, No. 1, vol. 19, pp. 25-29 [in Azerbaijani].
10. *Mahmudov R.N.* Modern Climate Changes and Hazardous Hydrometeorological Phenomena. Baku, National Aviation Academy, 2018, 232 p. [in Azerbaijani].
11. *Mahmudov R.N., Mammadova V.I., Dadashova F.S.* Modern Climate Changes and Analysis of Hydrometeorological Conditions in Azerbaijan in Recent Years (2021-2022). Proceedings of the Azerbaijan Geographical Society, Geography and Natural Resources, Baku, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 3-9 [in Azerbaijani].
12. The National Atlas of the Republic of Azerbaijan [Atlas]. Baku, State Committee on Land Resources and Cartography, 2014, 444 p. [in Azerbaijani].
13. *Tanriverdiyev Kh.K., Khalilov Kh.A., Khalilov M.Ya. et al.* Geography of the Republic of Azerbaijan. Physical Geography [Volume I]. Baku: Europe publ., 2015, 530 p. [in Azerbaijani].
14. *Mammadov R. M., Safarov E. S., Safarov S. H.* Study of the surface temperature regime in the Caspian Sea using drifters. ANAS Proceedings. The Sciences of Earth, 2012, no. 1, pp. 55-59.
15. *Safarov S., Valizadeh K. Kh., Ismayilov V., Safarov E.* Detection of upwelling events in the Caspian Sea using thermal satellite image processing. International Journal of Engineering and Geosciences, 2024, vol. 9, no. 2, 247-255
16. WMO-No. 1209. WMO Guidelines on the Calculation of Climate. World Meteorological Organization, Switzerland, Geneva, 2017, № 1203, 29 p.

*Поступила 03.02.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 03.02.2025; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-165-170>

УДК 551.590.2

## **Исследование цикличности опасных гидрометеорологических явлений**

***Н.С. Сидоренков, М.И. Сильницкая***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
sidorenkov37@mail.ru*

Проверяется синхронизация опасных гидрометеорологических явлений с максимумами-максимумами приливных сил Луны и Солнца. В качестве индикаторов последних используются циклы лунно-солнечных затмений – Сарос и Экслигмос. Сравниваются уровни половодий на реках Урал, Тобол, Ишим, Вагай и Ока в 2024 и 1970 гг. Показано, что катастрофическим уровням половодий 2024 г. предшествовали рекордные уровни половодий в 1970 г. С этим же циклом Экслигмос связаны жестокие засухи 1921 и 1975 гг. в Поволжье и аномальные морозы 1924 и 1978 гг. в Москве.

*Ключевые слова:* циклы лунно-солнечных затмений, цикл Сарос, цикл Экслигмос, синхронизация, опасные гидрометеорологические явления

## **Investigation of the cyclic nature of severe hydrometeorological events**

***N.S. Sidorenkov, M.I. Silnitskaya***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
sidorenkov37@mail.ru*

The synchronization of severe hydrometeorological events with the maxima-maxima of the tidal forces of the Moon and the Sun is checked. The cycles of lunar and solar eclipses – Saros and Exeligmos – are used as indicators of the latter. Flood levels on the Ural, Tobol, Ishim, Vagai, and Oka rivers in 2024 and 1970 are compared. It is shown that the catastrophic flood levels in 2024 were preceded by record flood levels in 1970. Severe droughts in the Volga region in 1921 and 1975 and abnormal frosts in Moscow in 1924 and 1978 are associated with the same Exeligmos cycle.

*Keywords:* lunar and solar eclipse cycles, Saros cycle, Exeligmos cycle, synchronization, severe hydrometeorological events

### **Введение**

Катастрофические половодья на реках Урала и Западной Сибири весной 2024 г. – явление случайное только на первый взгляд. В [3] описана синхронизация повторяемости опасных метеорологических и агрометеорологических явлений с циклами лунно-солнечных затмений.

Затмения не могут влиять на гидрометеорологические процессы. Затмения – это лишь сигнал природы о том, что Солнце, Земля и Луна выстроились на прямую линию и приливные силы Луны и Солнца, сложившись, достигли максимальных значений (так называемых максимумов-максиморов), а также о том, что явления, вызываемые приливными силами на Земле, могут быть наиболее мощными, способными нанести ущерб обитателям Земли.

Чередование затмений повторяется приблизительно с циклом Сарос. Он длится 6585,3 суток, т. е. 18 лет 11 дней (или 10 дней при четырех високосных годах) и 8 часов. За избыточные 8 часов (сверх 6585 суток) Земля поворачивается вокруг своей оси еще примерно на  $120^\circ$ , поэтому лунная тень проходит по земной поверхности на те же  $120^\circ$  западнее, чем в предыдущем Саросе (18 лет назад). Только через три Сароса лунная тень попадает приблизительно в тот же сектор долгот, что и 54 года назад. Этот 54-летний цикл получил название Экселигмос. Его точная длительность равна 54 года 32 дня.

### **Цикл Экселигмос и уровни половодий**

Полное солнечное затмение 7 марта 1970 г. повторилось в том же секторе долгот 8 апреля 2024 г. Лунное затмение 21 февраля 1970 г. повторилось 25 марта с сохранением локализации. Естественно, возникло желание сравнивать гидрометеорологические процессы 2024 г. с процессами 1970 года (с учетом сдвига их на 32 дня).

Для проверки гипотезы о возможном проявлении цикла Экселигмос из гидрологических ежегодников, хранящихся в Гидрометцентре России, были выписаны данные о высших уровнях воды на реке Оке в Калуге, реке Урал в Оренбурге, реке Тобол в Кургане, реке Ишим в селе Викулово и на реке Вагай в селе Черное.

Весной 1970 г. наблюдались рекордно высокие уровни половодий на р. Оке и ее притоках. Так, в г. Калуга 13 апреля 1970 г. уровень воды в Оке поднялся на 1525 см. На притоках р. Оки в то время зарегистрированы рекордные уровни: р. Жиздра в г. Козельск – 956 см, р. Протва на посту Спас-Загорье (возле г. Обнинск) – 759 см, р. Угра в пос. Товарково – 1084 см. Весной 1970 г. полоса рекордных уровней наблюдалась и восточнее устья р. Оки на притоках р. Волги: реки Средний Аниш, Сура (г. Пенза), Уфа (г. Красноуфимск) и ее притоки.

Зимой 2023/2024 гг. синоптические процессы в Центральном районе России развивались аналогично ситуации зимы 1970 г., но с месячной задержкой. То есть проявился цикл Экселигмос.

К весне 2024 г., как и в 1970 г., в бассейне р. Оки и средних притоков р. Волги накопились аномально большие запасы воды в снеге (рисунок). В верхнем бассейне р. Оки (в Орловской, Калужской, Тульской областях) они доходили до 250 % нормы. При дружном таянии снега уровни воды в реках вполне могли достигнуть показателей уровней половодий 1970 г.

Однако в марте 2024 г. установилась антициклональная солнечная погода. Днем снег таял, а ночью подмораживало. Осадки практически отсутствовали. Талая вода успевала стекать и впитываться в не промерзшую зимой землю. В результате снег растаял постепенно. Когда 30 марта наступила аномально теплая погода, снега там уже почти не было и рекордного паводка не получилось.

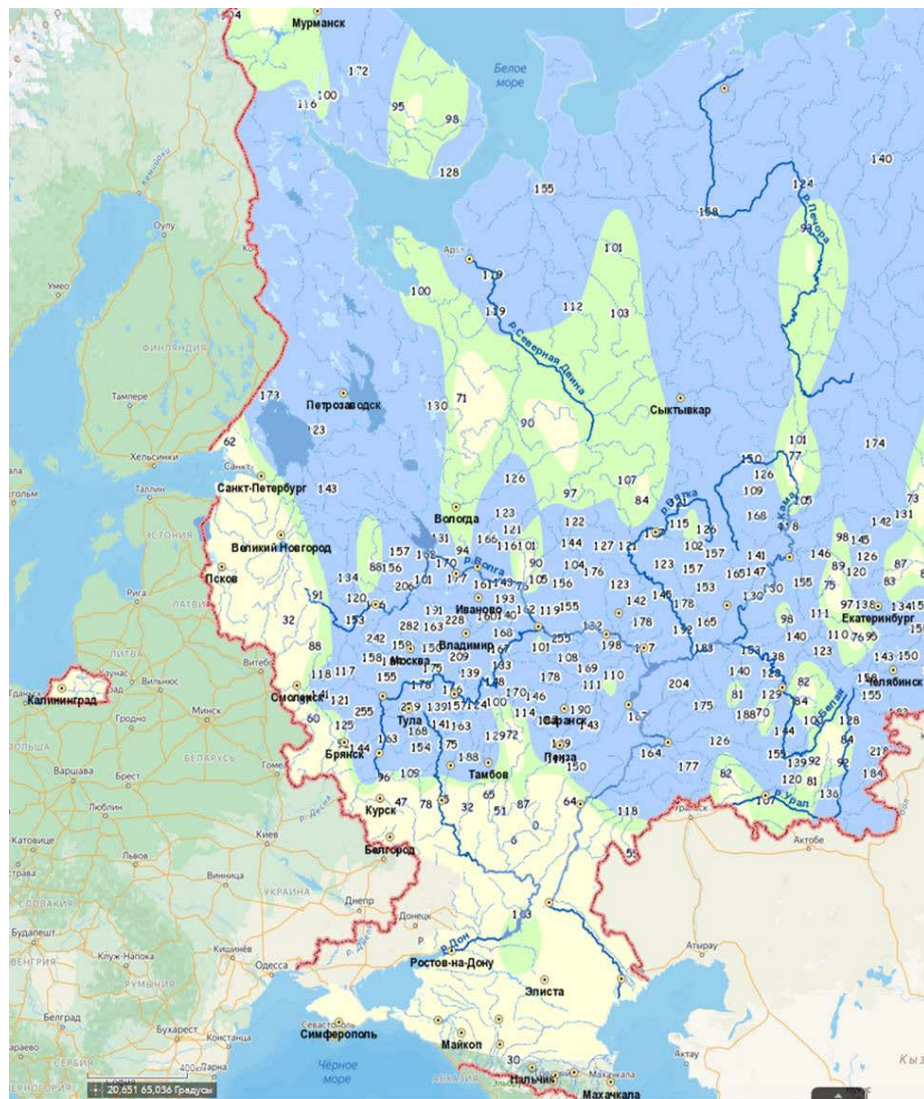


**Рис.** Запас воды в снежном покрове (отношение к норме, %) на ЕТР по состоянию на 10 марта 2024 года.

**Fig.** Snow water equivalent (relation to the norm, %) for European part of Russia on March 10, 2024.

Максимальный уровень воды в Калуге на р. Оке составил 840 см 4 апреля 2024 г., на притоках р. Оки: р. Жиздра в Козельске – 866 см 1 апреля 2024 г., р. Протва в г. Обнинск (пост Спас Загорье) – 748 см 5 апреля 2024 г. Уровни воды в Козельске и Обнинске не только превышали критерии опасного явления, но и были близки к рекордным уровням 1970 года.

На Урале и в Западной Сибири в марте и апреле 2024 г. антициклональной погоды не было. Снежный покров сохранялся до апрельской аномально теплой погоды. Поэтому на реках Урал, Иртыш и его притоках Тобол, Ишим, Вагай произошли катастрофические подъемы уровней воды. Повсеместно были установлены новые рекорды уровня половодий.

А какими же были там уровни половодий в предшествующий Экселигмос в 1970 г.?

Оказалось, что, действительно, 54 года назад (5 апреля 1970 г.) в Оренбурге уровень воды на р. Урал достиг рекордного значения 963 см. Только в 1993 г. этот уровень был превышен на 11 см. А на притоках р. Урал (реки Сакмара, Таналык, Малый Кизил) рекорды уровней воды, зарегистрированные в апреле 1970 г., держались до половодья 2024 г. В самом Оренбурге 13 апреля 2024 г. уровень воды поднялся до катастрофической высоты 1185 см, превысив на 211 см прежний рекордный уровень 1993 г. По сообщению ТАСС, 17 мая 2024 г. «...Предварительно суммарный размер ущерба в Оренбургской области оценивался в 40 млрд рублей, в Курганской области – 4–9 млрд рублей» (Хронология крупнейших паводков в России <https://tass.ru>).

На р. Тобол в Кургане 22 апреля 1970 г. максимальный уровень воды достиг значения 851 см, т.е. превысил уровень опасного явления. 19 апреля 2024 г. уровень воды поднялся до катастрофической высоты 1015 см. Абсолютный рекорд уровня воды (1087 см) наблюдался там 9 апреля 1947 года.

На р. Ишим в с. Викулово 19 апреля 1970 г. зарегистрирован уровень воды 889 см, а 4 мая 2024 г. уровень воды достиг катастрофической отметки 1163 см. (<https://ria.ru/20240504/ishim-1943799149.html>).

На р. Вагай и ее притоках весной 1970 г. зарегистрированы рекордно высокие уровни половодий, которые держались до 2024 г. Так в с. Черное 20 апреля 1970 г. уровень воды на р. Вагай достиг рекордной высоты 1395 см. В 2024 г. уровень воды превысил рекорд 1970 года.

Таким образом, рассмотрено доказательство существования цикла Экселигмос в динамике половодий на примере совпадений рекордных уровней рек в 1970 и 2024 гг. Требуются наблюдения половодий за сотни Экселигмусов (то есть более 5400 лет), чтобы статистически проверить эту гипотезу. Однако знание возможности такой цикличности позволит в дальнейшем заострять внимание гидрологов к складывающимся гидрометеорологическим условиям при прогнозе ожидаемых характеров весенних половодий.

### **Цикл Экселигмос и агрометеорологические опасные природные явления**

Для доказательства влияния цикла Экселигмос на гидрометеорологические процессы рассмотрим несколько ярких примеров – случаев экстремально неблагоприятных агрометеорологических явлений на Европейской территории России в 1867, 1921 и 1975 гг., приведших к катастрофическим неурожаям.

В [<https://ru.wikipedia.org/wiki/>] сообщается о голоде в Финляндии и Восточной Пруссии в 1867 г., когда из-за дефицита валюты Россия продала Аляску США. В 1921 г., вследствие засухи в Поволжье и голода из-за отсутствия зерна, советское правительство экспроприирует ценности российских церквей и монастырей на покупку продовольствия.

Через 54 года (цикл Экселигмос) в 1975 г. Поволжье и Центрально-Черноземные области вновь охватила жестокая весенняя засуха [1]. В 1975 г. из-за засухи, подобной 1921 г., валовой сбор зерна в СССР уменьшился на 83 миллиона тонн (37 %). Урожайность зерна в Поволжье уменьшилась в 4 раза (до 6 ц/га). Избежать голода тогда позволило зерно Сибири, Алтая и Украины.

### **Циклы Экселигмос и Сарос и метеорологические опасные природные явления**

По данным [<http://www.pogodaiklimat.ru/history/27612.htm>], в 1996, 1942, 1888, 1834, 1780 и 1726 гг. наблюдались экстремально холодные зимы в Москве со средними аномалиями температуры за три зимних месяца (декабрь, январь и февраль)  $-2,1^{\circ}$ ,  $-7,3^{\circ}$ ,  $-2,8^{\circ}$ ,  $-3,5^{\circ}$ ,  $-3,7^{\circ}$  соответственно, что является одним из примеров влияния 54-летнего цикла Экселигмос в зимний сезон.

18-летний цикл Сарос проявил себя в Европейской части России холодными зимами (декабрь, январь и февраль) в Москве в 1987 ( $-3,5^{\circ}$ ), 1969 ( $-4,0^{\circ}$ ), 1951 ( $-2,4^{\circ}$ ), 1933 ( $-0,7^{\circ}$ ) гг. А февраль в Москве входит в давно возникшую серию холодных февралей в 18-летнем цикле Сароса: 2021 ( $-2,9$ ), 2003 ( $-3,0$ ); 1985 ( $-6,5$ ); 1967 ( $-2,9$ ); 1949 ( $0$ ); 1931 ( $-7,6$ ); 1913 ( $-2,6$ ); 1895 ( $-6$ ); 1877 ( $-4,5$ ); 1841 ( $-7,5$ ) гг.

Ярким примером проявления удвоенного 36-летнего Сароса служат 40-градусные морозы в Москве в декабре 1978 г. и 36 лет тому назад в 1942 году.

По циклу Экселигмос 40-градусному морозу в январе 1978 г. предшествовал сильный мороз 1924 г., упомянутый Гиляровским В.А., Паустовским К.А. и др. писателями в воспоминаниях о похоронах В.И. Ленина.

Даже самое жаркое за всю историю наблюдений лето в Москве наблюдалось в 1938 и 2010 гг. – с интервалом 72 года, т.е. через 4-кратный Сарос! Многочисленные примеры повторения гидрометеорологических условий при различных кратностях 18-летних циклов Сароса приведены в [2, 3].

## Заключение

Цикличность затмений известна. Поэтому есть возможность исследовать синхронизацию опасных гидрометеорологических явлений и изменений климата с циклами затмений. Наиболее значима синхронизация опасных природных явлений и климата с циклом Экселигмос (54 года + 32 дня). С этим периодом чередуются жестокие засухи 1921 и 1975 гг. в Поволжье, аномальные морозы 1924 и 1978 гг. в Москве, катастрофические уровни половодий 1970 и текущего 2024 г. в России. Цикл Экселигмос не кратен ни солнечному, ни приливному (лунному) году. Поэтому для его статистического обоснования требуются ряды наблюдений длительностью более 5400 лет. В настоящее время гидрометеорологические условия в предшествующие Экселигмосы полезно использовать при подборе аналогов для долгосрочных гидрометеорологических прогнозов.

## Список литературы

1. Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 524 с.
2. Литвиненко Л.Н., Литвиненко В.В. Колебание Фернау и ритмы лет с четырьмя полярными затмениями за последние два тысячелетия // Географическая среда и живые системы. 2020. № 1. С. 7-30.
3. Литвиненко Л.Н., Литвиненко В.В. Катастрофические половодья на Днепре в период полярных солнечных затмений // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2018. № 3. С. 23-38. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-3-23-38.
4. Сидоренков Н.С., Сидоренков П.Н. 580-летний цикл лунных и солнечных затмений как индикатор колебаний климата того же периода // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 2. 2021. С. 5-15. DOI: 10.21455/GPB2021.2-1. <https://ria.ru/20240504/ishim-1943799149.html>

## References

1. Borisenkov E.P., Paseckiy V.M. Tysyacheletnyaya letopis' neobychaynyh yavleniy prirody. Moscow, Mysl publ., 1988, 524 p. [in Russ.].
2. Litvinenko L.N., Litvinenko V.V. Fernau oscillation and phythms of years with four polar eclipses in the past two millennia dedicated to Emmanuel le roy Ladurie. *Geograficheskaya sreda i zhiyye sistemy* [Geographical Environment and Living Systems], 2020, no. 1, pp. 7-30 [in Russ.].
3. Litvinenko L.N., Litvinenko V.V. Catastrophic floods on the Dnieper river in the period of polar solar eclipses. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. [Bulletin of the Moscow State Regional University (Natural Sciences)], 2018, no. 3, pp. 23-38. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-3-23-38 [in Russ.].
4. Sidorenkov N.S., Sidorenkov P.N. 580-year cycle of lunar and solar eclipses as an indicator of climatic oscillations of the same period. *Geofizicheskie processy i biosfera* [Geophysical Processes and Biosphere], 2021, vol. 20, no. 2, pp. 5-15. DOI: 10.21455/GPB2021.2-1 [in Russ.].

Поступила 08.11.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.

Submitted 08.11.2025; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.

## 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 абзачного отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

- заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);
- в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;
- в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;

– в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

*При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.*

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к аннотации:

- аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;
- аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

- расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;
- отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;
- выстраиваться от общего к частному;
- включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список литературы должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила русского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м<sup>2</sup>, 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.

Nicolaidis 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–Джимарай–Казбек. 2003.  
[http://www.mountain.ru/world\\_mounts/caucasia/kasbek/2003/opisanie/](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/](http://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 "р." 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.].*

*Nenashev 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: Friktionnye protsessy pri rezanii metallov [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting]. Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009 [in Russ.].*

# **Гидрометеорологические исследования и прогнозы**

**№ 1 (395)**

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@mecon.ru](mailto:hmc@mecon.ru)  
[www.meteoinfo.ru](http://www.meteoinfo.ru)

---

Подписано в печать 10.04.2025. Формат 70×100/16  
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 130 экз. Заказ № 0365  
Отпечатано в типографии  
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»  
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3