

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

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

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

№ 4 (390)

Под редакцией
канд. физ.-мат. наук Д.Я. Прессмана

**HYDROMETEOROLOGICAL
RESEARCH and FORECASTING**

No. 4 (390)

Москва
2023

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

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

Сборник содержит работы, посвященные исследованию целого спектра практических вопросов гидрометеорологического прогнозирования. Исследуется механизм возникновения горных волн над Европейской территорией России, дается оценка их прогноза с помощью модели COSMO-Ru6.6. По данным реанализа ERA5 исследуются характеристики грозовой активности над азиатской частью Арктического сектора России. Анализируется опыт составления штормовых предупреждений об опасных явлениях погоды конвективного характера с применением экспериментальных методов Гидрометцентра России. Приводятся оценки выбора оптимального для прогноза над акваторией Каспийского моря набора параметризаций из числа предусмотренных моделью WRF. Обобщается опыт использования нейронных сетей для численного прогноза приземного озона. Раздел морских прогнозов содержит статью с анализом ледовых условиях на судоходных трассах Каспийского моря. В разделе агрометеорологических прогнозов представлены регрессионные модели оценки и прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур, основанные на анализе агрометеорологических условий и спутниковой информации. Две работы содержат описание региональных особенностей изменения климата. Сборник интересен для специалистов, аспирантов и студентов, изучающих гидрометеорологию.

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The present issue contains papers that deal with studying a wide range of practical issues of hydrometeorological forecasting. The mechanism for the generation of mountain waves over European Russia is investigated, their forecasting capability is assessed using the COSMO-Ru6.6 model. Based on the ERA5 reanalysis data, the characteristics of thunderstorm activity over the Asian part of the Russian Arctic are studied. The experience of producing storm warnings about convective weather hazards using experimental methods of the Hydrometcenter of Russia is analyzed. Estimates are given for selecting an optimum set of parameterizations for forecasting over the Caspian Sea among those provided by the WRF model. The experience of using neural networks for numerical prediction of ground-level ozone is summarized. The section of marine forecasts contains the paper analyzing ice conditions on the Caspian Sea shipping routes. The agrometeorological section presents regression models for estimating and forecasting the yield of grain and leguminous crops based on the analysis of agrometeorological conditions and satellite information. Two papers contain a description of the regional features of climate change. The issue is interesting for specialists, postgraduates, and students studying hydrometeorology.

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Метеорологические прогнозы, математическое моделирование

Исследование возникновения горных волн над Европейской территорией России и оценка возможности их прогнозирования для авиации с помощью модели COSMO-Ru6.6 6
Иванова А.Р., Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А.

Грозовая активность и характеристика неустойчивости атмосферы по данным реанализа ERA5 над азиатской частью Арктического сектора России 25
Нечепуренко О.Е., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Кравец К.А.

Опыт тестирования экспериментальных методов Гидрометцентра России при составлении штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды 46
Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Алексеева А.А., Васильев Е.В.

Оценка точности воспроизведения метеорологических характеристик по модели WRF для акватории Каспийского моря 72
Фомин В.В., Выручалкина Т.Ю.

Постпроцессинг численных прогнозов концентраций приземного озона с использованием машинного обучения 86
Борисов Д.В., Кузнецова И.Н.

Расчеты и прогнозы элементов режима морей и океанов

Анализ ледовых условий на судоходных трассах Каспийского моря 105
Нестеров Е.С., Максимов А.А., Федоренко А.В.

Агрометеорологические прогнозы

Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах восточной части Сибирского федерального округа 118
Страшина А.И., Павлова А.В., Кулакова Т.В., Кланг П.С.

Климатические исследования, обзоры

Мониторинг гололедно-изморозевых отложений на территории России 138
Аржанова Н.М., Коришнунова Н.Н.

Итоги 25-й сессии Северо-Евразийского климатического форума и стартового регионального семинара ЭСКАТО ООН по проекту: Расширение знаний и потенциала для повышения устойчивости к медленно наступающим стихийным бедствиям в Центральной Азии 154
Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Сумерова К.А., Емелина С.В., Набокова Е.В., Каверина Е.С., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Толстых М.А.

CONTENTS

Meteorological forecasts, mathematical modeling

- Investigation of the mountain wave generation over the European part of Russia and assessment of forecasting capabilities for aviation using COSMO-Ru6.6 model 6
Ivanova A.R., Komasko N.I., Skriptunova E.N., Zavalova A.A.
- Thunderstorm activity and characterization of atmospheric instability according to ERA5 reanalysis data over the Asian part of the Russian Arctic 25
Nechepurenko O.E., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N., Gorbatenko V.P., Kravets K.A.
- Experimental Methods of Hydrometcentre of Russia for Producing Storm Warnings about Adverse and Severe Weather Events 46
Dmitrieva T.G., Smirnov A.V., Alekseeva A.A., Vasil'ev E.V.
- Assessing the accuracy of simulation of meteorological characteristics with the WRF model for the Caspian Sea 72
Fomin V.V., Vyrychalkina T.Y.
- Post-processing of ground-level ozone numerical forecasts using machine learning 86
Borisov D.V., Kuznetsova I.N.

Computing and forecasting of the marine environment parameters

- Analysis of ice conditions on the Caspian Seashipping routes 105
Nesterov E.S., Maksimov A.A., Fedorenko A.V.

Agrometeorological forecasts

- Agrometeorological conditions and prediction of the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the eastern Siberian Federal District 118
Strashnaya A.I., Pavlova A.V., Kulakova T.V., Klang P.S.

Climate research, reviews

- Monitoring of glaze-ice on the territory of Russia 138
Arzhanova N.M., Korshunova N.N.
- Outcomes of 25th session of the North Eurasian Climate Outlook Forum combined with the project inception regional workshop under the auspices of the UN ESCAP: Enhancing knowledge and capacity to build resilience to slow-onset disasters in Central Asia 154
Khan V.M., Vilfand R.M., Tishchenko V.A., Sumerova K.A., Emelina S.V., Nabokova E.V., Kaverina E.S., Kulikova I.A., Kruglova E.N., Tolstykh M.A.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-6-24>

УДК 551.511.31+551.558.21

Исследование возникновения горных волн над Европейской территорией России и оценка возможности их прогнозирования для авиации с помощью модели COSMO-Ru6.6

***А.Р. Иванова, Н.И. Комасько,
Е.Н. Скриптунова, А.А. Завьялова***

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

Исследуется возможность образования горных волн над Европейской территорией Российской Федерации в период с мая по август 2023 года. Обсуждаются условия возникновения сильных нисходящих потоков и орографической турбулентности для четырех полигонов, включающих горные системы Урала, Северного Кавказа, Кольского полуострова и Крыма. Произведен анализ циркуляционных и термодинамических условий, благоприятных для генерации горных волн над ЕТР, на основе начальных и прогностических данных модели COSMO-Ru6.6. Оценена точность прогноза параметров, используемых в расчетах. Установлено, что в некоторых случаях умеренная турбулентность, отмеченная в самолётных наблюдениях AIREP Speci вблизи районов со сложным рельефом, могла иметь орографическую природу.

Ключевые слова: горные волны, сообщения пилотов, модель COSMO-Ru, орографическая турбулентность

Investigation of the mountain wave generation over the European part of Russia and assessment of forecasting capabilities for aviation using COSMO-Ru6.6 model

***A.R. Ivanova, N.I. Komasko,
E.N. Skriptunova, A.A. Zavialova***

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

The probability of the mountain wave generation over the European part of the Russian Federation in May–August 2023 is studied. The conditions for the occurrence of strong downdrafts and leeward orographic turbulence are discussed for 4 domains including the mountain systems of the Urals, the North Caucasus, the Kola Peninsula and Crimea. An analysis of circulation and thermodynamic conditions favorable for the generation of mountain waves over European Russia were calculated using the initial and forecast data of the COSMO-Ru6.6 model. The accuracy of forecasting the parameters used in the calculations was assessed. It was found that in some cases, moderate turbulence reported in AIREP Speci aircraft observations near the areas with complex terrain could be of orographic nature.

Keywords: mountain waves, pilot reports, COSMO-Ru model, orographic turbulence

Введение

Орографические гравитационные волны, иначе называемые горными волнами (ГВ), являются следствием деформации устойчиво стратифицированного воздушного потока, натекающего на препятствие [17], и одним из механизмов обмена количеством движения между земной поверхностью и атмосферой [16]. Горные волны, распространяющиеся по вертикали, называются стационарными. Те, которые распространяются по горизонтали на подветренной стороне хребта, обычно именуются «захваченными» («trapped waves») или просто «подветренными» («lee waves»). Характеристики горных волн, условия их возникновения и некоторые аспекты их моделирования подробно описаны в обзоре [3].

Для авиации информация о горных волнах имеет особое значение. Еще в 1958 г. Всемирной метеорологической организацией был выпущен документ «Авиационные аспекты горных волн» [14], в котором приводился анализ случаев влияния ГВ на летательные аппараты и формулировались некоторые особые подходы к прогнозированию. Основными негативными аспектами воздействия ГВ на воздушное судно оказались интенсивные нисходящие потоки и возникающая на подветренной стороне гор сильная турбулентность. Зафиксированные по данным наблюдений вертикальные скорости нисходящих движений достигали в некоторых горных регионах 10–12 м/с. Подобные потоки способны привести к столкновению воздушного судна с поверхностью в районе со сложной орографией, поскольку пилоту в этих условиях может не хватить времени на исправление ситуации. Турбулентность, связанная с роторными облаками на подветренной стороне орографического препятствия, несколько раз приводила к авиационным происшествиям и даже катастрофам – настолько были велики нагрузки на элементы конструкции самолета. В катастрофе Боинга-707 в марте 1966 г. на подветренной стороне Фудзиямы, когда погибли 113 пассажиров и 11 членов экипажа, пиковые нагрузки при попадании в область роторной турбулентности, как оказалось, составили +9g и -4g. По информации совета по безопасности на транспорте США, в период 1990–2017 гг. было зафиксировано 42 авиационных происшествия, вызванных орографической турбулентностью, из них 16 случаев со смертельным исходом [19].

Учитывая опасность горных волн для полетов, Международная организация гражданской авиации (ИКАО) требует обязательного включения информации о текущем и прогностическом наличии горных волн умеренной и сильной интенсивности в сообщениях AIRMET и SIGMET [7].

Постановка задачи и используемые материалы

Разнообразие рельефа нашей страны позволяет сделать заключение, что основные проблемы, связанные с горными волнами, следует ожидать в ее азиатской части. Однако и на Европейской территории России (ЕТР) существуют горные системы, которые при определенных циркуляционных

и термодинамических условиях в данном районе способны порождать ГВ. В ряде работ описаны случаи возникновения орографических возмущений атмосферы, генерируемых на подветренной стороне Уральского хребта [2, 11], Крымских [1, 5, 6, 12] и Кавказских гор [13].

Для настоящего исследования использовались следующие материалы:

– сведения об опасных явлениях, в т. ч. о горных волнах, над ЕТР по сообщениям пилотов (AIREP Speci) за период с 9 июня 2021 г. по 31 августа 2023 года.

– начальные данные на модельных уровнях конфигурации модели численного прогноза погоды COSMO-Ru-ENA [9] с шагом 6.6 км (COSMO-Ru6.6) за период с 1 февраля 2022 г. по 31 августа 2023 г. и прогностические поля трех компонентов скорости ветра, температуры и давления с заблаговременностью 6 и 12 ч за период с 11 мая по 31 августа 2023 года.

Цель работы состояла в поиске и анализе сообщений пилотов о горных волнах над ЕТР, анализе параметров индикации ГВ, рассчитанных на основе модельных данных, а также в оценке успешности прогноза этих параметров.

2. Анализ сообщений о горных волнах над ЕТР по данным наблюдений

Согласно определению [7], горную волну (Mountain Wave, MTW) следует считать:

а) сильной, если она сопровождается нисходящим потоком со скоростью 3,0 м/с (600 фут/мин) или более и/или наблюдается или прогнозируется сильная турбулентность;

б) умеренной, если она сопровождается нисходящим потоком со скоростью 1,75–3,0 м/с (350–600 фут/мин) и/или наблюдается или прогнозируется умеренная турбулентность.

Единственным источником фактической информации о наблюдаемых горных волнах и их интенсивности над территорией Российской Федерации служат специальные сообщения пилотов AIREP Speci. К сожалению, подобные сведения во многом субъективны и не всегда могут быть достоверными из-за сложной цепочки передачи информации по каналам связи, в том числе с включением голосовых сообщений.

Формат сводки AIREP Speci описан в [4]. Сообщение состоит из двух строк. В первой присутствует сокращение UA, далее указывается буквенное обозначение территории (RA – для азиатской территории Российской Федерации, RS – для европейской), номер бюллетеня (60–69 – об условиях погоды, 70–79 – о вулканическом пепле) и индекс ИКАО центра связи, рассылающего сообщение. Вторая строка начинается с аббревиатуры ARS (AiRep Special), содержит идентификатор воздушного судна, наблюдаемое явление, время его наблюдения, широту и долготу воздушного судна, эшелон полета.

Ниже приводится пример такого сообщения:

UARA61 RUHB 110415

ARS BAGABCD SEV MTW OBS AT 0515Z N5500E11040 FL180=

Расшифровка сообщения: «Специальное сообщение передано с борта ВС авиакомпании British Airways GABCD. Сильная горная волна отмечалась в 05.15 ч ВСВ. Сообщение относится к местоположению ВС на $55^{\circ}00'$ с. ш., $110^{\circ}40'$ в. д. на эшелоне 180 гектофутов (~ 5500 м)».

Всего за период с начала архивации сводок AIREP Specі – с 9 июня 2021 г. по 31 августа 2023 г. – было получено 57108 таких сообщений. Большинство из них (37396, или 65 %) относилось к наблюдаемой турбулентности, 19 % (10706) – к грозам, 16 % (9006) – к обледенению. В это время информация о горных волнах умеренной и сильной интенсивности над европейской территорией нашей страны ни разу не была зафиксирована. Однако это не означает, что горные волны над ЕТР в реальности отсутствовали, они просто могли быть не замечены из-за недостатка наблюдений.

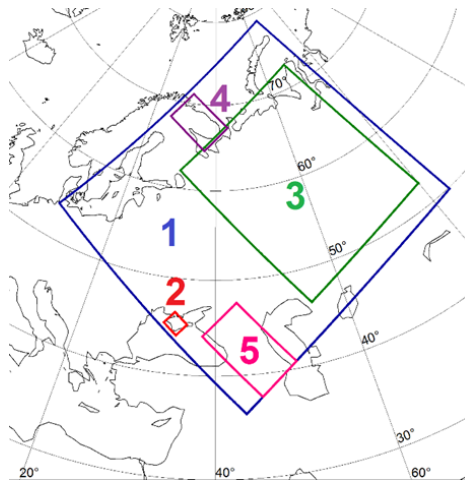
После пандемийного периода полного восстановления авиационного трафика так и не произошло. Наряду с этим, с начала специальной военной операции (то есть с конца февраля прошлого года) большинство аэродромов в южной части ЕТР оказались закрыты и полеты из/в них были приостановлены. По этой причине количество самолетных наблюдений над этой частью страны естественным образом уменьшилось. Кроме того, как следует из определения, приведенного выше, интенсивность горных волн подразумевает наличие нисходящих движений и/или областей турбулентности. Возможно, в части сообщений пилотов о турбулентности природа последней была орографической. Это тоже предстояло проверить. Допускаем также, что в течение упомянутого выше промежутка времени интенсивность горных волн над ЕТР была ниже умеренной и, следовательно, не фиксировалась в сообщениях AIREP Specі.

3. Выбор расчетных полигонов

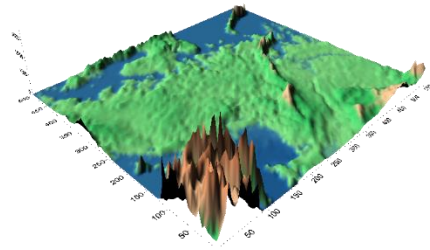
Для анализа возможного возникновения горных волн над Европейской территорией России на базе домена COSMO-Ru-ENA были выделены следующие области, включающие одну или несколько горных систем:

- ЕТР (550×500 узлов модельной сетки);
- Крымские горы (32×36 узлов);
- Уральские горы (300×350 узлов);
- Кольский п-ов, где расположены горные массивы Хибин, Ловозерские тундры, Чунагундра, Мончетундра и др. (70×100 узлов);
- горы Северного Кавказа (90×150 узлов).

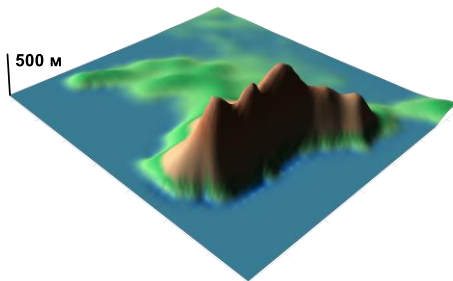
Графическое представление расчетных областей, а также модельная «маска» – орография каждого района в объемном виде изображены на рис. 1.



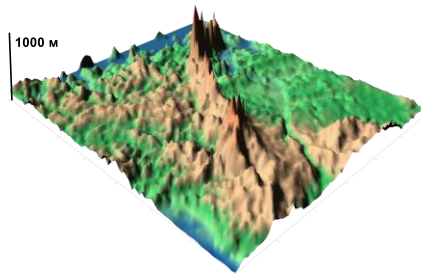
ЕТР



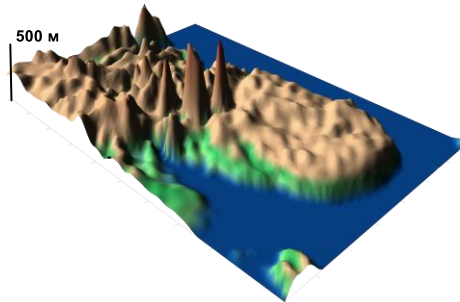
Крым



Урал



Кольский п-ов



Кавказ

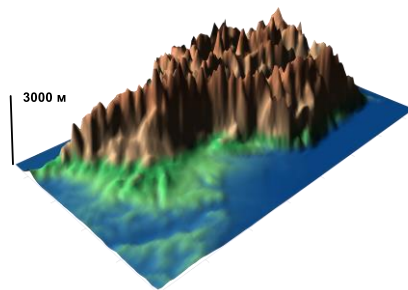


Рис. 1. Расчетные области модельной сетки: 1) ЕТР, 2) Крым 3) Урал, 4) Кольский п-ов, 5) Кавказ и их объемное представление в модельной орографии.

Fig. 1. Model grid domains for 1) European Russia 2) Crimea 3) Urals, 4) Cola Peninsula, 5) Caucasus and 3D-presentation of model relief.

4. Анализ расчетов, выполненных по начальным данным модели

Поскольку фактическая информация о наличии горных волн над ЕТР за исследуемый период отсутствовала, было принято решение провести анализ с применением некоторых индикаторов, способных указать на условия их возникновения. Как известно [8], горные волны могут возникать при условии:

- скорости ветра на высоте вершины порядка 8–10 м/с;
- направления потока, отклоняющегося от нормали по отношению к хребту не более чем на 30 градусов;
- устойчивости атмосферы на высотах, близких к вершине препятствия.

При этих условиях считается, что число Фруда, которое в задаче обтекания препятствий отражает связь между естественной длиной волны и шириной препятствия, близко к единице [3]. Для чисел Фруда, значительно превышающих 1, характерно образование зон роторной турбулентности на подветренной стороне горы.

В период с января по август 2023 г. на модельных уровнях анализировались скорость и направление ветра, рассчитывались частота Брента – Вэйсяля и число Фруда. Расчет проводился на основании анализа модельной орографии для каждого участка хребта каждого расчетного полигона. На рис. 2 показано направление потоков, перпендикулярных таким участкам (для Крыма были учтены оба направления, так как ГВ, возникающие при потоках, перпендикулярных как одной, так и другой стороне хребта, будут относиться к Европейской территории России). При наблюдении перечисленных выше условий строились разрезы вертикальной скорости на подветренной стороне препятствия для обнаружения в них периодических структур со сменой знака.

Пример захваченных волн в поле вертикальной скорости представлен на рис. 3. Здесь, на подветренной стороне Уральских гор, в нижнем слое обнаружены квазипериодические структуры, напоминающие захваченные волны с длиной около 20 км (примерно 3 шага сетки). Скорость нисходящих движений, характеризующих интенсивность волны, для представленного случая оказалась невелика: максимум составляет 0,16 м/с.

Отметим, что за период исследования количество подобных случаев, когда число Фруда для натекающего на препятствие потока нужной ориентации и интенсивности оказывалось близким к 1, невелико, а поле вертикальной скорости весьма редко соответствует классической «волновой» картине. Тем более невозможно воспроизведение роторов и суброторов под гребнями подветренных волн, поскольку для этого потребовалось бы моделирование на сетке с шагом, не превышающим нескольких сотен метров [18].

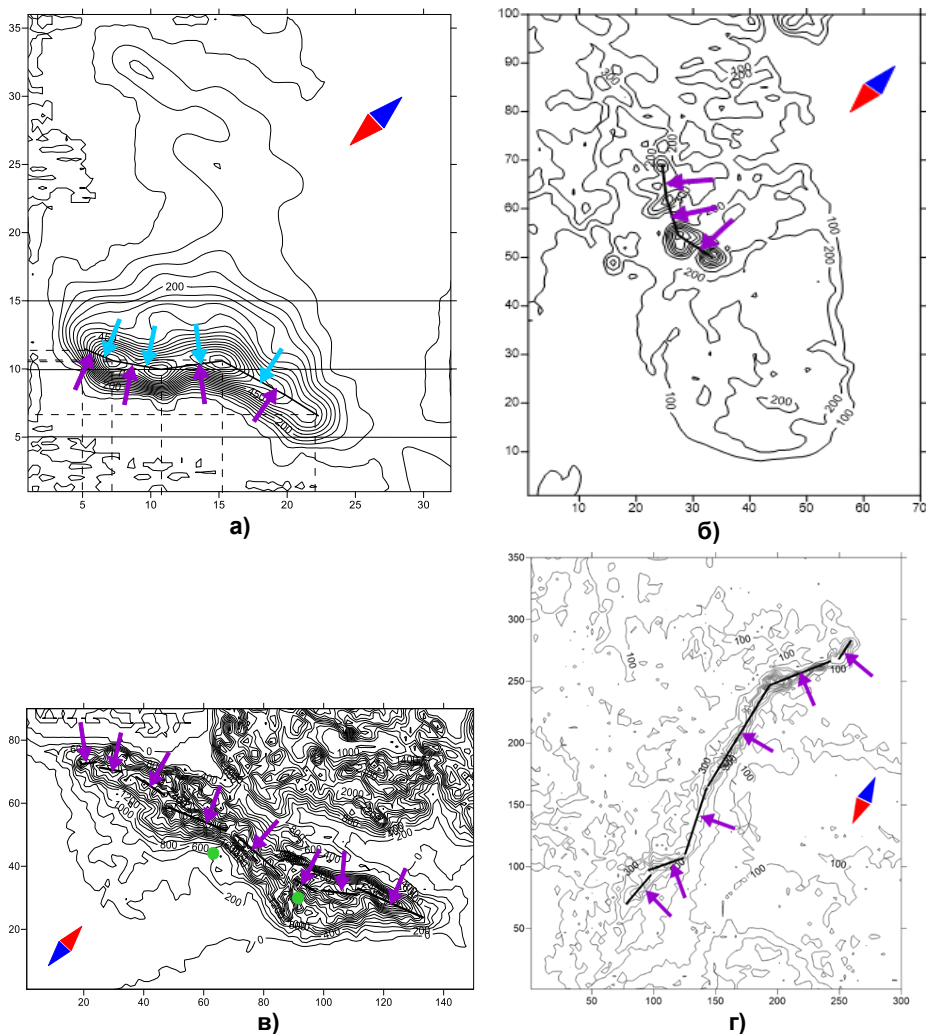


Рис. 2. Карты высот модельной орографии в районе: Крыма (а); Кольского п-ова (б); Кавказа (в); Уральских гор (г). Стрелками указано направление потоков, перпендикулярных участкам горных хребтов (черные отрезки). Цифры на осях соответствуют количеству узлов сетки модели (шаг 6.6 км).
Fig. 2. Model terrain heights for Crimea (а); Cola Peninsula (б); Caucasus (в); Urals (г). The arrows indicate the direction of cross flows to sections of mountain ridges (black segments). The digits on the axes correspond to the number of model grid points (grid step is 6.6 km).

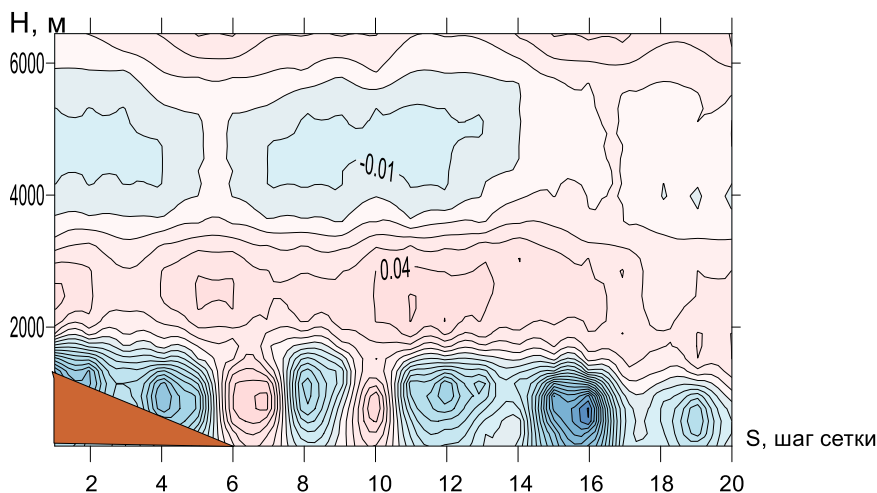


Рис. 3. Разрез вертикальной скорости на подветренной стороне Уральского хребта 19 марта 2023 г. 00 ч ВСВ (внизу). Цифры на горизонтальной оси означают количество шагов сетки от узла, соответствующего вершине хребта.

Fig. 3. Vertical velocity cross-section at leeward side of the Urals 19.03.2023 00 UTC. The digits at abscissa are grid-step numbers from the gridpoint corresponding to the top of the ridge.

Кроме того, по архивным данным было выполнено исследование повторяемости потоков, способных переваливать через орографическое препятствие (отличие направления от перпендикуляра к линии хребта не более 30 градусов, скорость ветра более 8 м/с). Данные для различных горных систем за период с февраля 2022 г. по август 2023 г. приведены в табл. 1.

Таблица 1. Повторяемость ветра (в %), благоприятного для образования горных волн над ЕТР (перпендикулярный к хребту поток, отличие направления не более чем на 30 градусов) для различных горных систем в период с февраля 2022 г. по август 2023 г.

Table 1. Frequency of flows (%) favorable for the mountain wave generation over the European Russia (flow perpendicular to the ridge, direction difference of no more than 30 degrees) for various mountain systems in the period from February 2022 to August 2023

Регион	Скорость ветра, м/с				N1	N2	P,%
	< 5	5,0–7,9	8,0–9,9	≥ 10			
Крым, с юга	77,9	17,2	3,6	1,3	31029	180600	17,2
Крым, с севера	80,9	15,7	2,5	0,9	20856	166152	12,6
Урал	78,1	16,1	3,4	2,4	296105	1827672	16,2
Кольский п-ов	73,5	19,5	5,8	4,0	23253	195048	11,9
Кавказ	78,9	18,3	2,0	0,8	442919	837984	53,0

Примечание. N1 – число случаев подходящего направления; N2 – общее число случаев; P – процент N1 от N2.

Отметим, что потоки подходящего направления (параметр P в таблице) чаще всего наблюдаются в регионе Кавказских гор (в среднем в 53 % случаев, в сентябре 2022 г. наблюдался максимум – 67,7 %). Для этих потоков, как правило, характерны небольшие скорости: всего в 0,8 % случаев они превышают 10 м/с.

Напротив, при малой повторяемости ветров, перпендикулярных участкам «модельных» хребтов на Кольском полуострове, почти в 10 % случаев они достигают скоростей, благоприятных для потенциальной генерации ГВ (>8 м/с).

5. Качество прогноза модельных параметров, ответственных за воспроизведение характеристик горных волн

Успешность симуляции горных волн в модели численного прогноза погоды, очевидно, определяется качеством воспроизведения определенных циркуляционных и термодинамических условий атмосферы, зависящих от корректности прогноза различных модельных параметров. Задача заключалась в том, чтобы проверить, насколько хорошо воспроизводятся в модельном прогнозе данные параметры и условия. Для этого сравнивались значения в узлах сетки по начальным и прогностическим данным в конкретный срок. Следовало также оценить качество прогноза интенсивности горных волн, выражаемой через скорость нисходящих потоков или орографическую турбулентность.

С этой целью была выполнена проверка качества прогноза модуля скорости и направления ветра, а также положительных значений квадрата частоты Брента-Вяйсяля, характеризующих устойчивое состояние атмосферы. Расчеты производились для всей территории ЕТР и каждого исследуемого региона. Успешность прогноза оценивалась для заблаговременностей 6 и 12 ч для каждого из регионов, представленных на рис. 1.

Скорость горизонтального потока

Для анализируемого периода (май–август 2023 г.) модель практически везде завывшала скорость ветра в нижнем километровом слое при прогнозе как на 6 ч, так и на 12 ч (табл. 2). При этом отклонение от среднего значения для «умеренного» ветра (скорость от 5 до 10 м/с) не возрастает с увеличением прогноза, а порой становится меньше. Средняя квадратическая ошибка увеличивается с ростом заблаговременности и с увеличением скорости ветра и оказывается максимальной для региона Кавказа (2,7 м/с при прогнозе на 12 ч для $V > 10$ м/с).

Направление потока

В целом для Европейской территории России примерно в половине случаев направление ветра в прогнозе и анализе для одного и того же срока отличается не более чем на 10 градусов (табл. 3). При этом значительные

ошибки направления ветра, превышающие 30 градусов, составляют 10.7 и 15.8 % в прогнозе на 6 и 12 ч соответственно. Минимальный процент ошибок в данной градации отмечается для Кольского полуострова, максимальный – для Кавказского региона. Однако для последнего домена характерен самый большой процент незначительных ошибок (0–10 град) в сравнении с прочими территориями. Отметим также, что для горных регионов, в отличие от ЕТР, процент незначительных ошибок направления ветра в прогнозе на 12 ч выше, чем в прогнозе на 6 ч.

Таблица 2. Средняя арифметическая и средняя квадратическая ошибки значений модуля скорости ветра, V , при прогнозе на 6/12 ч в мае-августе 2023 г. на модельных уровнях в нижнем километровом слое

Table 2. Bias and root mean square error of the wind speed module, V , for forecast projection 6/12 hours in May-August 2023 at model levels in the lowest 1-km layer

Регион	Скорость ветра, V , м/с			
	<5	5-8	8-10	>10
Средняя арифметическая ошибка, м/с				
ЕТР	0.6/0.6	0.5/0.4	0.3/0.2	0.2/0.0
Крым	0.7/0.8	0.7/0.7	0.7/0.6	0.5/0.4
Урал	0.5/0.6	0.4/0.4	0.3/0.2	0.1/-0.1
Кольский п-ов	0.5/0.7	0.4/0.4	0.4/0.3	0.2/0.2
Кавказ	0.9/1.0	0.7/0.6	0.6/0.5	0.6/0.6
Средняя квадратическая ошибка, м/с				
ЕТР	1.4/1.6	1.4/1.7	1.5/1.8	1.7/2.0
Крым	1.6/1.8	1.8/2.0	1.7/1.9	1.6/1.9
Урал	1.2/1.4	1.4/1.6	1.4/1.7	1.5/1.9
Кольский п-ов	1.3/1.6	1.5/1.7	1.5/1.8	1.5/1.7
Кавказ	1.8/2.0	2.0/2.2	2.0/2.4	2.2/2.7

Таблица 3. Успешность прогноза на 6/12 ч направления ветра в мае-августе 2023 г. (процент отличия значения в анализе и прогнозе не более чем на Δ , град) на модельных уровнях в нижнем километровом слое

Table 3. Forecast accuracy (projection is 6/12 hours) of wind direction in May-August 2023 (percentage of difference between the values in the initial and prediction data doesn't exceed Δ , deg) at the model levels in the lowest 1-km layer

Регион	Δ , град				
	Штиль	0-10	11-20	21-30	≥ 30
ЕТР	0,02/0,02	58,7/50,1	22,3/23,8	8,2/10,4	10,7/15,8
Крым	0,03/0,03	14,0/19,4	55,1/47,3	21,9/22,7	9,0/10,7
Урал	0,03/0,02	9,5/14,8	59,6/50,5	22,8/24,3	8,2/10,4
Кольский	0,01/0,01	8,6/12,5	61,4/54,3	22,2/23,6	7,8/9,6
Кавказ	0,05/0,05	27,8/32,8	39,5/34,3	21,2/20,7	11,5/12,1

Температурная стратификация

Оценка прогноза устойчивости атмосферы, характеризующейся положительными значениями квадрата частоты Брента–Вяйсяля, представлена в табл. 4. Повторяемость условия $N^2 > 0$ в исследуемый теплый период превышает 60 % во всех районах со сложной орографией и оказывается максимальной для Крымского региона (75,8 %). При такой высокой вероятности значения критериев Пирса и Хайдке оказываются весьма близки и при оценке 6-часового прогноза меняются в диапазоне от 0.66 для Кольского полуострова до 0.8 для Кавказского региона. Для прогноза на 12 ч эти величины уменьшаются примерно на 0.03, оставаясь довольно высокими, чтобы подтвердить успешность прогноза.

Таблица 4. Успешность прогноза на 6/12 ч термической устойчивости атмосферы (условия $N^2 > 0$) в мае-августе 2023 г. в модели COSMO-Ru6.6 на модельных уровнях в нижнем километровом слое

Table 4. Parameters of skill score prediction (projection is 6/12 h) for the atmospheric thermal stability ($N^2 > 0$) in May-August 2023 model at the COSMO-Ru6.6 model levels in the lowest 1-km layer

Регион	ПВ	ОН	ПН	PI	HI
ЕТР	66,6/66,8	91,1/90,3	94,4/94,2	0,76/0,74	0,77/0,76
Крым	75,8/75,9	92,3/91,7	95,0/94,7	0,70/0,68	0,73/0,70
Урал	62,9/63,0	90,2/89,4	94,2/93,9	0,77/0,75	0,78/0,74
Кольский п-ов	73,3/73,4	90,3/89,4	94,9/88,0	0,66/0,63	0,70/0,67
Кавказ	67,2/67,4	92,8/92,0	94,4/94,5	0,79/0,77	0,80/0,79

Примечание. ПВ – повторяемость явления; ОН – оправдываемость наличия явления; ПН – предупредительность наличия явления; PI – индекс Пирса; HI – индекс Хайдке.

Вертикальная скорость

В ходе выполнения исследования при построении разрезов вертикальной скорости по данным на модельных уровнях обращает на себя внимание значительное увеличение интенсивности вертикальных движений в прогностических полях по сравнению с анализом, особенно для заблаговременности 6 ч. В приведенном примере на рис. 4 это хорошо заметно в нижней половине тропосферы до высоты примерно 5 км. Выше характер вертикальных движений (более слабых в начальных данных) может существенно отличаться в анализе и прогнозе.

Увеличение значений вертикальной скорости в прогностических данных подтверждается информацией табл. 6 и 7. В табл. 6 для разных регионов представлена доля вертикальных скоростей «незначительных» вертикальных движений (модуль вертикальной скорости w менее 5 см/с). Эта

доля оказалась максимальной не для ЕТР, а для домена, включающего Уральские горы. Впрочем, это объяснимо: для расчетной области, представленной на рис. 1, узкая горная цепь расположена квазидиагонально: большой процент территории занимают равнины, над которыми не происходит орографическая деформация горизонтального потока с генерацией вертикальных движений.

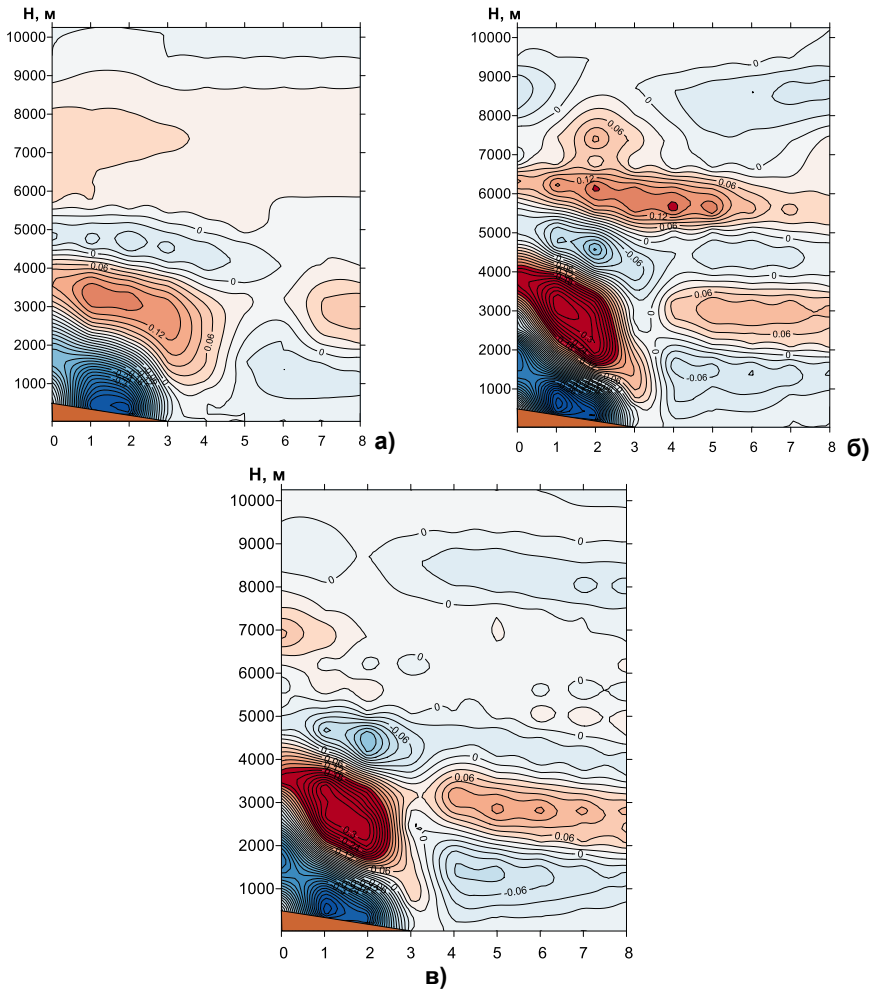


Рис. 4. Поле вертикальной скорости над Крымскими горами 7.02.2023 12 ч ВСВ в модели COSMO-Ru6.6: в начальных данных (анализ) (а); в прогнозе на 6 ч (б); в прогнозе на 12 ч (в). Цифры на горизонтальной оси означают количество шагов сетки от узла, соответствующего вершине хребта.

Fig. 4. Vertical velocity cross-section over the Crimean Mountains on February 7, 2023, 12 UTC in the COSMO-Ru6.6 model: initial data (analysis) (a); 6-h forecast (б); 12-h forecast (в). The digits at abscissa are grid-step numbers from the gridpoint corresponding to the top of the ridge.

Наибольшая доля величин w , превышающих по модулю 5 см/с, наблюдается в Кавказском регионе. Отметим увеличение процентного содержания как восходящих, так и нисходящих движений ($|w| > 0.05$ м/с) с увеличением заблаговременности прогноза. В среднем для ЕТР количество таких случаев в прогнозе на 6 ч увеличивается более чем в 3 раза в сравнении с начальными данными, а для Уральского региона – в 5 раз.

Таблица 6. Доля (%) значений вертикальной скорости, w , в начальных и прогностических данных модели COSMO-Ru6.6 в мае-августе 2023 г. для ЕТР и регионов

Table 6. Part (in %) of vertical velocity values, w , in the initial and forecast data of the COSMO-Ru6.6 model in May-August 2023 for European Russia and mountain regions

Регион	Вертикальная скорость, w , м/с		
	< -0.05	-0.05...0.05	> 0.05
Анализ			
ЕТР	1.7	96.4	1.9
Крым	3.6	92.6	3.8
Урал	1.1	97.9	1.0
Кольский п-ов	2.5	95.2	2.3
Кавказ	8.8	78.3	12.9
Прогноз на 6 ч			
ЕТР	5.9	88.1	6.0
Крым	8.3	84.0	7.8
Урал	5.4	89.4	5.2
Кольский п-ов	5.9	88.6	5.5
Кавказ	14.4	68.8	16.9
Прогноз на 12 ч			
ЕТР	6.4	87.3	6.3
Крым	8.6	83.5	7.9
Урал	5.8	88.5	5.6
Кольский п-ов	6.2	88.1	5.7
Кавказ	14.9	67.8	17.3

В табл. 7 произведена оценка успешности воспроизведения в модели нисходящих движений как возможного признака наличия горных волн. Отметим, что в течение мая–августа 2023 г. интенсивность таких движений не превышала по модулю 0.5 м/с как по начальным, так и по прогностическим данным для всех регионов, кроме Кавказа (там было зафиксировано несколько значений w в градации - 0.5...- 1.0 м/с). В табл. 7 различия в доле узлов с нисходящими движениями между прогнозами на 6 и 12 ч весьма малы. Зато разница между начальными данными и прогностическими с заблаговременностью 6 ч на этот же срок велика: процент узлов в анализе

оказывается меньше в 2–6 раз для нисходящих движений $w \leq -0.1$ м/с и на порядок для $w \leq -0.5$ м/с.

Таблица 7. Процент узлов с нисходящими движениями $w \leq -0.1/-0.5$ м/с на модельных уровнях в начальных и прогностических данных модели. Май–август 2023 г.

Table 7. Part (in %) of the gridpoints with downwards $w \leq -0.1/-0.5$ m/s at model levels in the model initial and forecast data. May-August 2023

	ЕТР	Крым	Урал	Кольский п-ов	Кавказ
Анализ	0.5/0.004	1.2/0.01	0.2/0.001	0.4/0.00005	3.4/0.02
Прогноз на 6 ч	1.7/0.03	2.7/0.1	1.2/0.01	1.1/0.001	6.7/0.2
Прогноз на 12 ч	1.8/0.03	2.8/0.1	1.3/0.01	1.1/0.002	7.0/0.2

Воспроизведение орографической турбулентности в модели

Наличие орографической турбулентности рассчитывалось согласно алгоритму, описание которого подробно представлено в [11]. Это реализация метода критической амплитуды (метод Макфарлина – Бакмайстера с дополнениями Макканна), который позволяет выделить зоны разрушения горных волн с образованием турбулентности с учетом волнового торможения. Пример подобных расчетов приведен на рис. 5. Отметим, что практика рутинного прогноза интенсивности орографической турбулентности для авиации, как правило, основана на более примитивных алгоритмах (например, произведение любого критерия турбулентности в ясном небе на параметр, характеризующий шероховатость поверхности) [15].

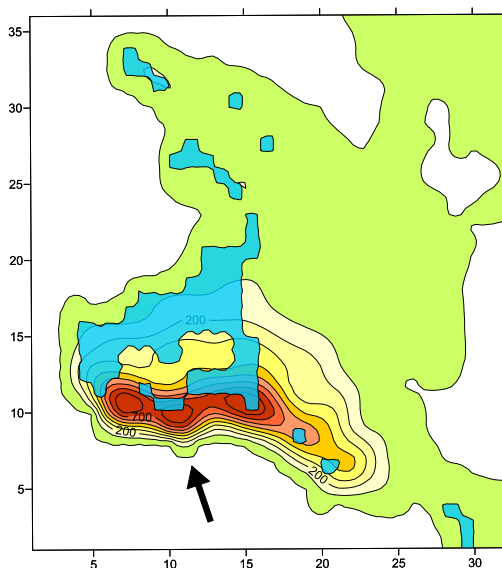


Рис. 5. Области орографической турбулентности (голубая заливка) на подветренной стороне Крымских гор (модельная орография) 17 мая 2023 г. 18 ч ВСВ. Черная стрелка показывает направление натекающего на хребет потока. Цифры на осях – количество узлов модельной сетки.

Fig. 5. Orographic turbulence areas (blue shading) on the leeside of the Crimean Mountains (model terrain) May 17, 2023 18 UTC. The black arrow shows the direction of the flow crossing the ridge. The numbers on the axes indicate the number of model grid points.

Расчеты орографической турбулентности с использованием выходных данных на модельных уровнях в этой работе были выполнены для Крымского региона за период 1–31 августа 2023 г. Успешность прогнозов оказалась довольно высокой, хотя повторяемость явления, рассчитанная по начальным данным модели, составила около 10 % (табл. 8). При прогнозе на 6 и 12 ч оправдываемость наличия явления достигает 79,9 и 77,2 % соответственно. Критерий Хайдке, характеризующий качество прогноза редкого явления, оказался высоким, равным, соответственно, 0,81 и 0,77 для заблаговременностей 6 и 12 ч. Таким образом, модель весьма успешно спрогнозировала орографическую турбулентность, связанную с разрушением горных волн. Отметим, что для прогноза турбулентности, связанной с образованием роторов под гребнями захваченных волн, необходимо гораздо более тонкое разрешение модельной сетки [18].

Таблица 8. Успешность прогноза орографической турбулентности для Крымского региона в августе 2023 г.

Table 8. Parameters of skill score prediction (projection is 6/12 h) of orographic turbulence for Crimea in August 2023

Орографическая турбулентность	ПВ	ОН	ПН	PI	HI
Прогноз на 6 ч					
Наличие	10,6	79,9	86,9	0,84	0,81
Отсутствие	89,4	98,4	97,4	0,84	0,81
Прогноз на 12 ч					
Наличие	10,4	77,2	82,6	0,80	0,77
Отсутствие	89,6	98,0	97,2	0,80	0,77

Примечание. ПВ – повторяемость явления; ОН – оправдываемость наличия явления; ПН – предупреденность наличия явления; PI – индекс Пирса; HI – индекс Хайдке.

Подтвердить факт наличия орографической турбулентности по данным наблюдений оказалось невозможным по причинам, изложенным в п. 2. Однако была сделана попытка выделить из сообщений AIREP Spec1 о сильной и умеренной турбулентности именно те, в которых турбулентность могла иметь орографическую природу. Для этого был произведен анализ сообщений, переданных с борта воздушного судна вблизи горных хребтов. Проверялись потенциально благоприятные условия для возникновения горных волн (подходящие ориентация воздушного потока и стратификация атмосферы). При соблюдении подобных условий следовало исключить наличие других возможных источников турбулентности, таких как конвекция (для чего производилось вычисление уровня нейтральной плавучести) и области струйных течений (рассчитанных согласно алгоритму, изложенному в [10]).

В ходе исследования были обнаружены некоторые области вблизи Кавказского побережья, где сообщения пилотов об умеренной турбулентности передавались (в отсутствие конвекции и струйных течений) десятки раз. Проверка ориентации воздушных потоков и стратификации атмосферы позволила предположить, что в некоторых случаях эта турбулентность могла иметь орографическую природу. Пример подобных мест обозначен для региона Кавказ на рис. 2 двумя зелеными точками.

Выводы

Наличие горных волн умеренной и сильной интенсивности над европейской частью нашей страны в период 9.06.2021 – 31.08.2023 натурными наблюдениями отмечено не было. Тем не менее исследование полей вертикальной скорости по модельным данным в период с мая по август 2023 г. позволило установить, что при определенных условиях вблизи существующих горных систем над ЕТР (Уральские, Крымские, Кавказские горы, горы Кольского п-ова) могут образовываться структуры, визуально похожие на ГВ, не достигающие, однако, интенсивности, представляющей опасность для полетов воздушных судов. Такие структуры действительно возникают, как и следует из теоретических положений, при натекании на орографическое препятствие достаточно интенсивного воздушного потока при направлении, близком к нормали по отношению к хребту, и при устойчивой стратификации атмосферы на высотах, близких к высоте препятствия. Исследования показали, что перечисленные выше параметры, ответственные за возникновение ГВ (скорость и направление ветра, положительные значения частоты Брента – Вьяйсяля), вполне успешно прогнозируются в модели COSMO-Ru с шагом 6.6 км на сроки 6 и 12 ч. Отметим завышение скорости горизонтального потока в нижнем слое атмосферы в прогнозе для всей территории ЕТР и для областей со сложной орографией в частности. Что касается значений вертикальной скорости в нисходящих потоках, за исследуемый период они ни разу не достигали величин, характерных для интенсивности хотя бы умеренной ГВ, хотя в прогностических полях также оказывались выше, чем в начальных данных.

Орографическая турбулентность, связанная с разрушением ГВ, рассчитывалась по выходным данным модели с применением алгоритма, позволяющего оценить факт ее наличия или отсутствия. Успешность прогноза по модельным данным на срок 6 и 12 ч оказалась довольно высокой – индекс Хайдке для Крымского региона при повторяемости турбулентности около 10% составил 0,81 и 0,77 соответственно. Сравнение самолетных наблюдений за турбулентностью с расчетами орографической турбулентности по модельным данным позволило предположить, что некоторые из сообщений об умеренной турбулентности, переданные с борта самолетов во время полетов вблизи Кавказского побережья, могли быть связаны с разрушением горных волн.

Список литературы

1. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Том 35, № 2. С. 134-146. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-2-134-146.
2. *Зидлев Н.Н.* Теоретическая картина обтекания Северного Урала при учете устойчивой атмосферы // *Вестник МГУ. Серия 3. Физика, астрономия*. 1977. Т. 18, № 6. С. 42-50.
3. *Иванова А.Р.* О возникновении и возможности прогнозирования опасных для авиации горных волн // *Метеорология и гидрология*. 2024 (в печати).
4. *Инструктивный материал по кодам SIGMET и AIRMET* (Утвержден приказом Росгидромета № 95 от 20.02.2015 г.).
5. *Кожевников В.Н.* Моделирование орографических возмущений над горами Крыма // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Том 55, № 4. С. 49-57. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555449-57>
6. *Кожевников В.Н., Моисеенко К.Б., Волков Б.И.* Обтекание гор при сдвиге скорости потока // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Том 52, № 6. С. 660-668.
7. *Метеорологическое обеспечение международной авионавигации*. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации: Издание 20-е. ИКАО, 2018. 230 с.
8. *Пчелко И.Г.* *Авиационная метеорология*. Л.: ГИМИЗ, 1963. 348 с.
9. *Ривин Г.С., Розинкина Е.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В. и др.* Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4 (374). С. 37-53.
10. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М., Триада лтд, 2016. 312 с.
11. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А.* Прогноз орографической турбулентности по выходной продукции численной модели // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 1. С. 40-52.
12. *Шокуров М.В.* Численное моделирование атмосферной циркуляции над Черным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. № 25-2. С. 91-113.
13. *Яровая Д.А., Шокуров М.В.* Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 3. С. 14-30.
14. *Aviation aspects of mountain waves*. Technical note No. 18 (prepared by M.A. Alaka, S.M., Ph.D) // WMO-No. 68. TP. 26. 1958.
15. *Kim J.-H., Sharman R., Strahan M., Scheck J.W., Bartholomew C., Cheung J.C.H., Buchanan P., Gait N.* Improvements in nonconvective aviation turbulence predictor for the World Area Forecast System // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2018. Vol. 99, no. 11. P 2295-2311. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-01117.1>
16. *Kruse C.G., Smith R.B., Eckermann S.D.* The mid-latitude lower- stratospheric mountain wave “Valve layer” // *J. Atm. Sci.* 2016. Vol. 73. P. 5081-5100. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0173.1
17. *Smith R.B.* 100 years of progress of mountain meteorology research // *Meteorological Monographs*. 2019. Vol. 59. P. 20.1-20.73. DOI: 10.1175/AMSMONO-GRAPHS-D-18-0022.1

18. Udina M., Soler M.R., Sol O. A Modeling Study of a Trapped Lee-Wave Event over the Pyrénées // Mon. Wea. Rev. 2017. Vol. 145. P. 75-96. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0031.1

19. Veilett P. Mountain Wave Monsters And What They Can Do. Aviation week, 2020, May 22. Available at: <https://aviationweek.com/business-aviation/mountain-wave-monsters-what-they-can-do>

References

1. Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Disturbances in the wind speed fields due to the Crimean mountains. *Physical Oceanography*, 2019, vol. 26, no 2, pp. 123-134.

2. Zidlev N.N. Teoreticheskaya kartina obtekaniya Severnogo Urala pri uchete ustojchivoj atmosfery. *Vestnik MGU. Seriya 3. Fizika, astronomiya*, 1977, vol. 18, no 6, pp. 42-50 [in Russ.].

3. Ivanova A.R. O vozniknovenii i vozmozhnosti prognozirovaniya opasnyh dlya aviatsii gornyh voln. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2024 (in print).

4. Instruktivnyj material po kodam SIGMET i AIRMET (Utverzhden prikazom Rosgidrometa № 95 ot 20.02.2015) [in Russ.].

5. Kozhevnikov V.N. Modeling of atmospheric disturbances over the Crimean mountains. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 344-351.

6. Kozhevnikov V.N., Volkov B.I., Moiseenko K.B. Flow over mountains with the stream velocity shear. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 587-595.

7. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoj aeronavigatsii. Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviatsii: Izdanie 20-e. ICAO Publ, 2018. 230 s. [in Russ.].

8. Pchelko I.G. Aviacionnaya meteorologiya. Leningrad, GIMIZ Publ, 1963, 348 p. [in Russ.].

9. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications.

Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 37-53 [in Russ.].

10. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh uslovij dlya aviatsii. Moscow, Triada ltd Publ, 2016, 312 p. [in Russ.].

11. Shakina, N.P., Skriptunova, E.N., Zav'yalova, A.A. Orographic Turbulence Forecasting from Numerical Model Output Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, pp. 28-36. DOI: 10.3103/S1068373921010040.

12. Spokurov M.V. Chislennoe modelirovanie atmosfernoj cirkulyatsii nad Chernym morem. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2011, no. 25-2, pp. 91-113 [in Russ.].

13. Yarovaya D.A., Shokurov M.V. Mezomasshtabnye ciklonicheskie vihri, vozni-kayushchie nad Chernym morem vblizi Kavkazskogo poberezh'ya. *Morskoy gidrofizi-cheskij zhurnal*, 2012, no. 3, pp. 14-30 [in Russ.].

14. Aviation aspects of mountain waves. Technical note No. 18 (prepared by M.A. Alaka, S.M., Ph.D) // WMO-No. 68, TP. 26, 1958.

15. Kim J.-H., Sharman R., Strahan M., Scheck J.W., Bartholomew C., Cheung J.C.H., Buchanan P., Gait N. Improvements in nonconvective aviation turbulence predictor for the World Area Forecast System. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 2018, vol. 99, no. 11, pp. 2295-2311. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0117.1

16. Kruse C.G., Smith R.B., Eckermann S.D. The mid-latitude lower- stratospheric mountain wave “Valve layer”. *J. Atm. Sci.*, 2016, vol. 73, pp. 5081-5100. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0173.1

17. Smith R.B. 100 years of progress of mountain meteorology research. *Meteorological Monographs*, 2019, vol. 59, pp. 20.1-20.73. DOI: 10.1175/AMSMONO-GRAPHS-D-18-0022.1

18. Udina M., Soler M.R., Sol O. A Modeling Study of a Trapped Lee-Wave Event over the Pyrénées. *Mon. Wea. Rev.*, 2017, vol. 145, pp. 75-96. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0031.1

19. Veilett P. Mountain Wave Monsters And What They Can Do. Aviation week, 2020, May 22. Available at: <https://aviationweek.com/business-aviation/mountain-wave-monsters-what-they-can-do>

*Поступила 25.10.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.
Submitted 25.10.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-25-45>

УДК 551.515.4

Грозовая активность и характеристика неустойчивости атмосферы по данным реанализа ERA5 над азиатской частью Арктического сектора России

О.Е. Нечепуренко^{1,2}, И.В. Кузевская¹, К.Н. Пустовалов^{1,2}, В.П. Горбатенко¹, К.А. Кравец¹

¹Национальный Исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия;

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

o.e.nechepurenko@gmail.com, irinakuzhevskaja@gmail.com, const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, foreveryoungfox@mail.ru

Грозы в Арктическом секторе Российской Федерации являются ключевым индикатором климатических изменений, поскольку сигнализируют о повышении температуры в этом холодном регионе. В работе рассмотрена изменчивость числа дней с грозой за 2015–2021 гг. в азиатской части Арктического сектора Российской Федерации по данным наземных наблюдений. Стремительного роста числа дней с грозой по сравнению с климатическими данными не обнаружено, однако на некоторых станциях отмечается увеличение частоты проявления грозовой активности. Верификация значений индекса неустойчивости Total Totals, полученных по данным одноименного продукта реанализа ERA5 и аэрологического зондирования, критических отличий не показала. Наилучшее согласие демонстрирует станция Якутск (1,4 %); на станциях Туруханск и Ванавара процент несовпадения составил 3,1 и 3,5 % соответственно. Использование продукта «Total Totals» реанализа ERA5 в арктических регионах актуально для ретроспективного установления факта наличия гроз и их локализации на слабозаселенных территориях.

Ключевые слова: Арктика, число дней с грозой, верификация, Total Totals, радиозонд

Thunderstorm activity and characterization of atmospheric instability according to ERA5 reanalysis data over the Asian part of the Russian Arctic

O.E. Nechepurenko^{1,2}, I.V. Kuzhevskaja¹, K.N. Pustovalov^{1,2}, V.P. Gorbatenko¹, K.A. Kravets¹

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia;

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS

o.e.nechepurenko@gmail.com, irinakuzhevskaja@gmail.com, const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, foreveryoungfox@mail.ru

Thunderstorms in the Arctic sector of the Russian Federation are a key indicator of climate change, as they signal a temperature rise in this cold region. The paper considers the variability of the number of days with thunderstorms in the Asian part of the Russian Arctic for 2015–2021 based on ground-based observations. No rapid increase in the number of days with thunderstorms as compared to the long-term data was found. However, an

increase in the frequency of thunderstorm activity is registered at some stations. A verification of the Total Totals instability index values obtained from the ERA5 reanalysis product with the same name and rawinsonde data did not show critical differences. The best fit was demonstrated for Yakutsk station (1.4 %); at Turukhansk and Vanavara stations, the percentage of inconsistency was 3.1 and 3.5 %, respectively. The use of the ERA5 Total Totals product in the Arctic regions is relevant for the retrospective determination of the presence of thunderstorms and their localization in sparsely populated areas.

Keywords: Arctic, number of days with thunderstorm, verification, Total Totals, rawinsonde

Введение

Климатические изменения ставятся во главу угла научных исследований в области гидрометеорологии, поскольку общая тенденция роста температуры воздуха по всему земному шару влечет серьезные перемены во всех сферах человеческой деятельности. Северные районы больше других реагируют на потепление [8, 22], включая ослабление статической устойчивости тропосферы в высокоширотной Арктике, что, вероятно, может привести к увеличению повторяемости явлений конвективного характера [16]. По данным Всемирной сети определения местоположения молний (WWLLN) количество арктических молний выше 65° с. ш. утроилось за последнее десятилетие [32]. Данные ежегодного отчета Vaisala [51] подтверждают возросшую грозовую активность над северными регионами с 2017 года.

В связи с этим исследование повторяемости конвективных явлений в арктическом секторе и условий развития конвекции в атмосфере для их образования являются актуальными задачами и требуют всестороннего изучения.

Несмотря на постоянное развитие современных оперативных систем численного прогнозирования погоды, опасные конвективные явления, к числу которых относят шквалы, град, смерчи, сильные ливни и грозы, когда они наблюдаются в комплексе с другими конвективными явлениями, сочетание которых образует ОЯ, остаются относительно плохо прогнозируемым явлением во временном масштабе более нескольких часов [23, 36]. Одним из широко практикуемых способов оценки атмосферной неустойчивости является использование индексов, первые из которых были разработаны в 40–50-х годах XX в. в качестве вспомогательного инструмента для оперативного прогноза погоды [44]. Применение индексов позволяет качественно и количественно оценивать степень устойчивости атмосферы. Другим назначением индексов является прогноз возникновения грозы и других опасных конвективных явлений, для чего рассчитанные значения индексов неустойчивости сравниваются с заранее определенным пороговым значением, характерным, например, для случая с грозой и без грозы для конкретного региона. Традиционно индексы рассчитывались на основе вертикальных профилей метеорологических величин, определяемых посредством аэрологического зондирования. К достоинству аэрологического

зондирования относится то, что контактные измерения параметров атмосферы отражают ее истинное состояние в фиксированный момент времени. Однако, недостатком такого вида наблюдения является малая частота запусков радиозонда (00 и 12 ч ВСВ), что не всегда хорошо согласуется с суточным пиком конвективной активности, а также неравномерное пространственное распределение пунктов наблюдения. Стоит отметить, что, согласно отчетам ЦАО [12], некоторая доля запланированных выпусков не реализуются.

Для эффективного использования индексов в прогнозе образования конвективных явлений для конкретного региона требуется определение пороговых значений для разных сезонов года [11]. Полный список индексов содержит десятки различных индексов неустойчивости, сочетающих термодинамические и/или кинематические параметры, используемые для прогноза гроз. Индексы с упрощенной формулой расчета: Lifted index [28], Showalter index [47], K-index [30], Total Totals index [41] и CAPE [20, 21, 25, 39, 45] в научных исследованиях наиболее «популярны». В конечном итоге индексы, рассчитанные по данным аэрологического зондирования, дают только числовые значения, которые характеризуют конвективный потенциал воздушной массы в районе аэрологической станции.

Преимуществом применения индексов неустойчивости является универсальность, поскольку с их помощью сравнивают параметры конвекции в разных по физико-географическим характеристикам регионах мира и изучают динамику и эволюцию погодных явлений, связанных с конвекцией. Стоит отметить, что индексы, приведенные в статье, не работают в горных районах, где высота поверхности находится выше уровня 850 гПа.

В настоящее время расчет индексов неустойчивости не ограничивается только использованием данных аэрологического зондирования. Современные спутниковые продукты (MODIS/Aqua, Terra [42], VIIRS/SuomiNPP, GIIRS/FY4 [26] и др.) содержат восстановленные значения индексов неустойчивости, которые наносятся на карту погоды в ГИС-средах с подходящим подложным изображением со спутника, а затем с их помощью локализуют границы грозových ячеек на обширной территории. Много научных работ посвящено интерпретации результатов численного моделей прогноза (NWP) для локализации зон опасных конвективных явлений с использованием значений индексов неустойчивости [3, 5]; в современных NWP доступны все конвективные индексы [43].

Глобальный реанализ ERA5 предоставляет пространственно- и временно согласованные продукты с расчетными значениями индексов K-index, Total Totals и CAPE в узлах регулярной сетки по долготе и широте в виде 4D-массивов с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [24]. Для характеристики степени неустойчивости атмосферы умеренных широт более перспективными считаются индексы K-index и Total Totals [13]. Однако для их использования нужны предварительные исследования по верификации значений, рассчитанных на основе разных измерений. Эти закономерности важно

учитывать при анализе информации из реанализов [4]. Например, реанализы хорошо согласуются с данными радиозондовых измерений над США [29, 38] и Австралией [19]. Для Европы оценены базы данных реанализа ERA-Interim [48] и ERA5 [49] в сравнении с данными наземных наблюдений. Выдвинуто предположение, что ERA5 является одним из самых надежных доступных реанализов для исследования конвективной среды, в основном проводилось сопоставление данных предыдущей версии ERA5 реанализа ERA-Interim с данными аэрологического зондирования [46]. Было показано, что температура на высотах, направление и скорость ветра также хорошо согласуются между собой для координатных точек (Колпашево, Новосибирск и Томск) при использовании обоих источников вертикальных профилей метеовеличин. В исследовании [35] проверялась достоверность реанализа ERA5 на основе данных пяти аэрологических станций на территории Сибири, расположенных в радиусе 500 км от города Томска. Показана перспективность применения ERA5 для восстановления вертикальных профилей температуры и характеристик ветра в тропосфере. В целом, научные работы с прямым сравнением (верификацией) именно значений индексов неустойчивости, полученных из реанализа семейства ECMWF, с аэрологическими или спутниковыми наблюдениями, активно публикуются в последнее время [10, 17, 27, 52].

Всестороннее изучение климатических особенностей является одной из главных задач, поставленных в Стратегии развития Арктической зоны России и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года и Основах государственной политики России в Арктике. Территория исследования в настоящей статье характеризуется редкой сетью наблюдений, из-за чего многие конвективные явления невозможно зафиксировать, однако даже те немногие метеорологические и аэрологические станции, расположенные за Полярным кругом, предоставляют ценные сведения о состоянии атмосферы. Цель настоящего исследования заключается в оценке за 2018–2022 гг. соответствия значений индекса неустойчивости Total Totals, полученных по данным реанализа ERA5 и аэрологического зондирования в азиатской части Арктического сектора России.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе для изучения грозовой активности азиатской части Арктического сектора России выбрана территория, расположенная севернее 60° с. ш. и восточнее 70° в. д., на которой расположено 77 метеорологических и 23 аэрологических станции. Сформированы два массива данных – первый для исследования грозовой активности с 2015 по 2021 год и второй для верификации данных реанализа ERA5 за период с 2018 по 2022 год.

Для формирования первого массива по изучению грозовой активности были отобраны дни с грозой из базы данных восьмисрочных наблюдений

за атмосферными явлениями (АТМ8С) ВНИИГМИ-МЦД [2]. Дополнительно привлекались данные штормовых телеграмм WAREP за тот же временной период. Отбор проводился через запрос к базе WAREP, который содержал индекс станции и коды атмосферного явления 91 «гроза на станции» и 92 «гроза в окрестности». После исключения из списка строк с ошибочными записями наблюдений и с отсутствием дней с грозой, для изучения грозовой активности на территории исследования было отобрано 11 метеорологических станций (рис. 1, табл. 1).

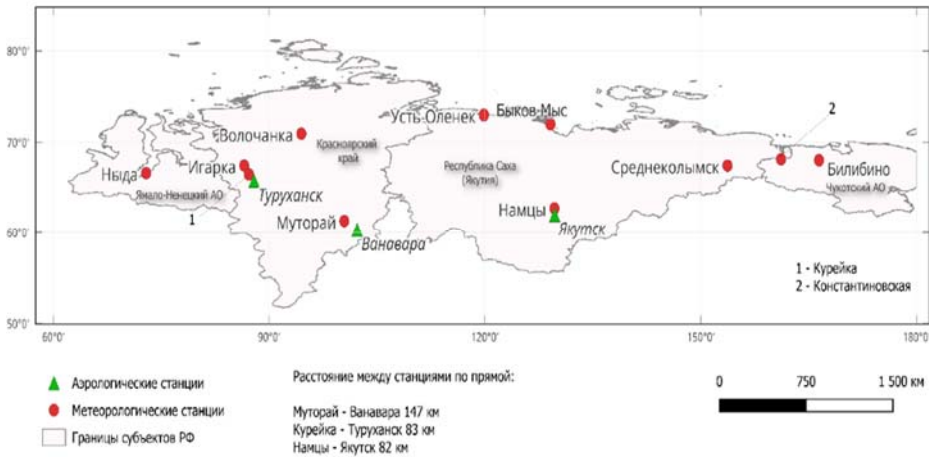


Рис. 1. Расположение выбранных для исследования аэрологических и метеорологических станций в азиатской части Арктического сектора РФ.

Fig. 1. Location of upper air and weather stations under study in the Asian part of the Russian Arctic.

Рассматриваемая в работе территория по классической классификации климатов Алисова относится к арктическому (станции Усть-Оленек, Быков Мыс и Константиновская), субарктическому поясу с очень холодной континентальной сибирской областью (станции Волоочанка, Курейка, Игарка, Муторай, Намцы, Среднеколымск и Билибино) и умеренному поясу с умеренно теплой областью атлантического влияния (станция Ныда). Кроме того, нужно отметить, что на исследуемой территории выделяется два региона, в которых принято анализировать циркуляционные процессы отдельно – до р. Енисей (~100° в. д.) и восточнее [1, 9].

Для верификации параметров неустойчивости из данных продуктов реанализа ERA5 был сформирован массив по следующим критериям: выбран период – с 1 мая по 30 сентября (теплый период); сроки – 00 и 12 ч ВСВ; отобраны метеорологические станции, расположенные на расстояние не более 150 км от пунктов проведения аэрологического зондирования (аэрологических станций) (табл. 1). Данное условие принимается исходя из того, что на такое расстояние радиозонд может удаляться от станции

по горизонтали. Заметим, что на севере отсутствуют метеорологические станции, на которых проводят, в том числе, и аэрологические наблюдения. Поэтому в итоге были сформированы такие пары «метеорологическая – аэрологическая станция»: Муторай – Ванавара, Курейка – Туруханск и Намцы – Якутск. Местное время для станций зондирования Туруханск и Ванавара отличается от ВСВ на 7 часов (сроки зондирования 7 и 19 часов), для Якутска – на 9 часов (запуск зонда осуществляется в 9 и 21 часов).

Таблица 1. Метаданные метеорологических и аэрологических станций в Арктическом секторе РФ

Table 1. Metadata of upper air and weather stations in the Asian part of the Russian Arctic

Субъект	Станция	Индекс ВМО	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота над у.м., м
Ямало-Ненецкий АО	Ныда	23345	66,63	72,93	10
Красноярский край	Волочанка	20982	70,97	94,5	37
	Игарка	23274	67,46	86,56	20
	Курейка	23375	66,47	87,22	27
	Муторай	24807	61,33	100,47	330
	Ванавара*	24908	60,33	102,26	259
	Туруханск*	23472	65,78	87,93	38
Республика Саха (Якутия)	Быков Мыс	21821	72,0	129,12	18
	Среднеколымск	25206	67,45	153,72	21
	Усть-Оленек	21711	73,0	119,87	21
	Намцы	24753	62,73	129,67	88
	Якутск*	24757	62,01	129,71	101
Чукотский АО	Билибино	25147	68,05	166,45	270
	Константиновская	25129	68,15	161,17	12

Примечание. * аэрологическая станция.

Для настоящего исследования был выбран индекс Total Totals (TOTL), так как в [13] было получено, что северная граница со значениями выше пороговых ($\geq 50^\circ\text{C}$), характеризующих атмосферу как сильно неустойчивую и указывающих на высокую вероятность возникновения гроз (более 75 %), простирается до 62° с. ш.:

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500}), \quad (1)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа ($^\circ\text{C}$); T_{850} – температура окружающей среды на уровне 850 гПа ($^\circ\text{C}$); TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа ($^\circ\text{C}$).

По результатам аэрологического зондирования в архиве данных [50] выбраны значения индекса TOTL. Далее с портала Copernicus Climate Change Service были загружены данные продукта ERA5 «Total Totals» в формате NetCDF [31] за период с 2018–2022 гг. в сроки 00 и 12 ч ВСВ.

Для пакетной конвертации файлов реанализа ERA5 из формата NetCDF (.nc) в формат CSV (.csv) использован программный код (скрипт), написанный на языке программирования MATLAB (The MathWorks, Inc.). Отбор значений индекса TOTL для ближайших к аэрологическим станциям узлов сетки проведен с помощью скрипта на языке Python. В результате отбора сформирован массив данных значений индекса TOTL реанализа ERA5 из 866 случаев.

Анализ грозовой активности в азиатской части Арктического сектора России по наземным данным

Как известно, азиатская часть Арктического сектора РФ относится к районам со слабой грозовой активностью, обусловленной низкими температурами воздуха в теплое время года.

В этой части статьи рассмотрим изменчивость числа дней с грозой с 2015 по 2021 год. Потенциально грозовой период рассматриваемой территории начинается в мае и продолжается до сентября [14]. Отмечаются и аномалии, например, на станции Ныда наблюдался один день с грозой в первой декаде октября 2019 года.

Наибольшая грозовая активность для большинства станций приходится на июль (рис. 2), однако на отдельных станциях (ст. Ныда, Игарка) пик активности отмечается в августе. К августу образуется вертикальный теплообмен воздуха между хорошо прогретой подстилающей поверхностью и холодным воздухом с образованием мощной конвективной облачности. Отдельно стоит отметить самую северную станцию Усть-Оленок, на которой три дня с грозой были отмечены в третьей декаде июня 2020 года.

Суммарное за теплый период число дней с грозой с запада на восток в целом уменьшается (с 18 на станции Ныда до 3 на станции Константиновская). Минимальное число дней с грозой зафиксировано на станциях Курейка и Быков Мыс – 1 день за весь теплый период. Повышенная грозовая активность в районе Обской губы (ст. Ныда) и на берегу Игарской протоки Енисея (ст. Игарка) обусловлена выходами атлантических циклонов, которые стали чаще продвигаться на северное побережье Сибири [14], а также вследствие преобладания меридиональной формы циркуляции с начала XX века [9, 34]. Однако остается непонятным вопрос, почему в районе р. Енисей наблюдалось неравномерное и климатически необъяснимое распределение числа дней с грозой за семилетний период (севернее на станции Игарка наблюдалось 14 дней, тогда как на станции Курейка, расположенной на 174 км южнее, зарегистрирована одна гроза). Свыше десяти дней с грозой также наблюдалось на станциях Волочанка (11), Намцы (13), Муторай (17).

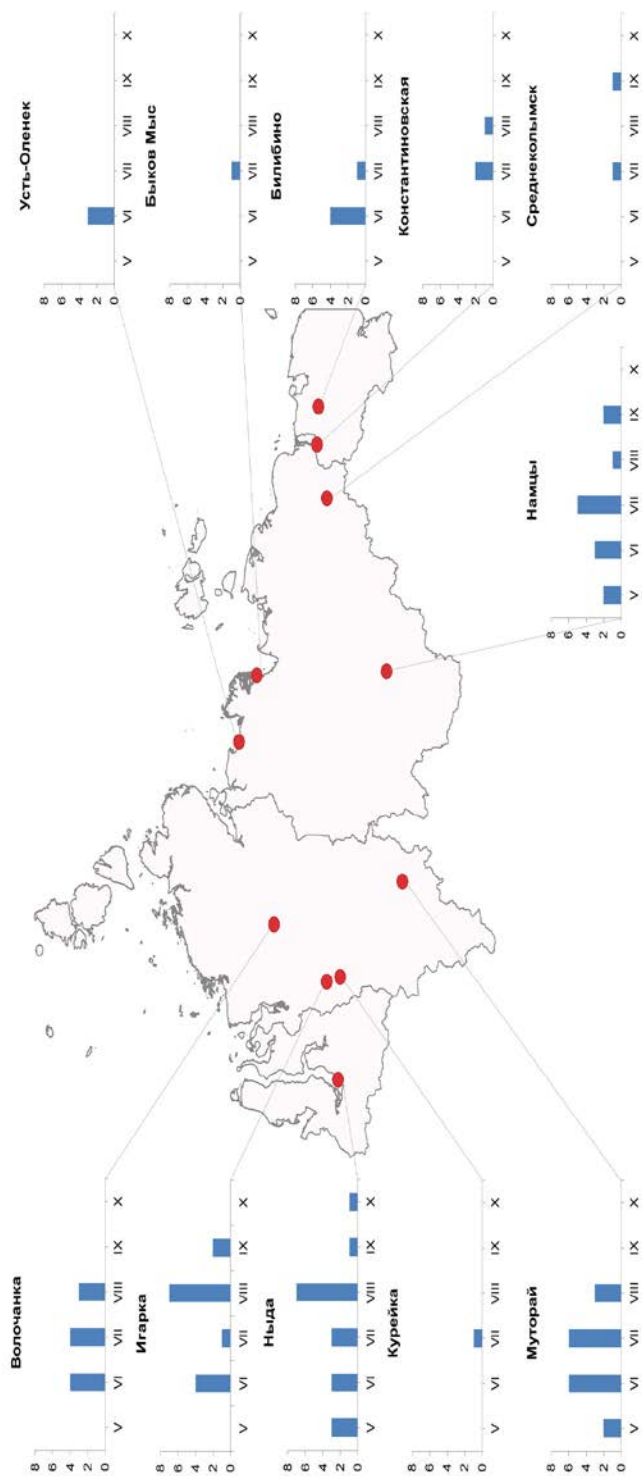


Рис. 2. Суммарное распределение гроз в азиатской части Арктического сектора РФ за период с 2015 по 2021 г.
 Fig. 2. Total distribution of thunderstorms in the Asian part of the Russian Arctic for 2015 to 2021.

Для прибрежных станций (Усть-Оленек, Быков Мыс) за рассмотренный период число дней с грозой не превысило 3. Процесс образования грозы здесь связан с таянием морских льдов и, как следствие, освобождением обширных водных пространств, и прогревом деятельного слоя на фоне увеличения температуры воздуха.

К середине теплого периода свободная ото льдов, относительно теплая поверхность моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря способствует формированию неустойчивой стратификации в атмосфере над арктическим побережьем, приводя к образованию мощных кучевых и кучево-дождевых облаков. На удаленных от Восточно-Сибирского моря станциях Среднеколымск, Константиновская, Билибино наблюдалось до 5 дней с грозой.

Как показано на рис. 3, годом с наиболее выраженной грозовой активностью можно считать 2020 г., общее число дней с грозой по всем станциям составило 22. Обновление максимума годового числа дней с грозой на рассматриваемых станциях в 2020 г. подтверждается данными Научно-прикладного справочника «Климат России» [14].

Косвенным свидетельством усиления грозовой активности являются лесные пожары на обширных незаселенных северных территориях Сибири. В [40] на основе данных дистанционного зондирования было отмечено, что 2019 и 2020 гг. выделялись как экстремальные по числу пожаров в сибирской Арктике. Кроме того, над площадью лесного пожара в атмосферу выделяется большое количество водяного пара [15] и создается слой аэрозольных частиц, что способствует разогреву нижележащих слоев воздуха и облегченной конденсации водяного пара (на ядрах конденсации пирогенного происхождения) и, как следствие, развитию конвективной облачности [33].

Добавим, что дымовая завеса является слоем, которая задерживает уходящее тепло от подстилающей поверхности, увеличивая тем самым ночные температуры воздуха [18]. Помимо того, очаги возгорания приводят к эманиции парниковых газов, таких как диоксид углерода и метан [6, 37], в большом количестве содержащихся в вечной мерзлоте. В результате складывается самоподдерживающийся триггерный процесс.

В целом, анализ динамики грозовой активности региона за последнее десятилетие в сравнении с многолетними данными показал, что на фоне наличия значительной межгодовой изменчивости грозовой активности повторяемость гроз на севере заметно увеличилась. Данные с северных метеостанции азиатской части России не демонстрируют стремительного роста числа дней с грозой по сравнению с климатическими данными, однако на некоторых станциях отмечается увеличение частоты проявления грозовой активности.

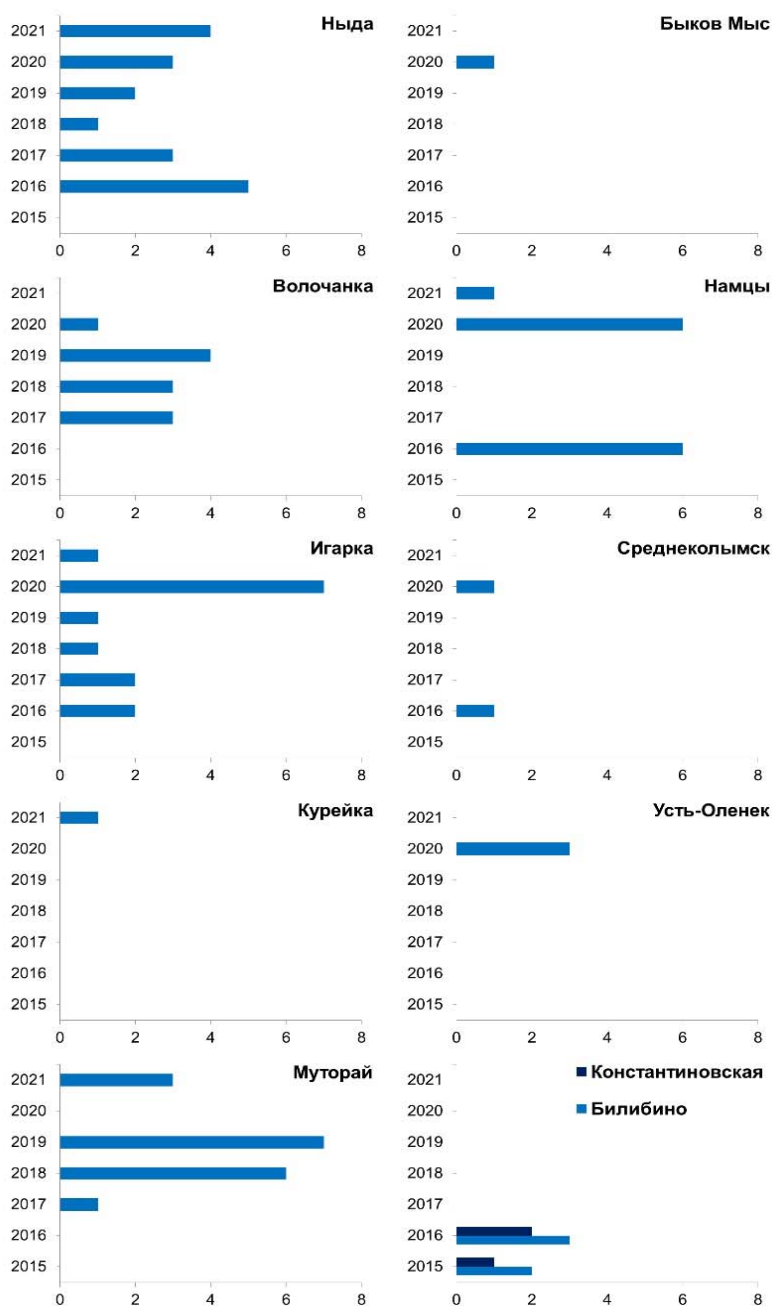


Рис. 3. Межгодовая изменчивость суммарного числа дней с грозой в году в азиатской части Арктического сектора РФ.

Fig. 3. Interannual variability of total number of days with thunderstorms per year in the Asian part of the Russian Arctic.

Верификация значений продукта «Total Totals» реанализа ERA5 с результатами аэрологического зондирования

Необходимость всестороннего изучения конвективных явлений возрастает, и применение индексов неустойчивости, особенно в рассматриваемом регионе, будет актуальным. Выбор индекса неустойчивости Total Totals обоснован выше. Для оценки соответствия его значений, полученных по данным реанализа ERA5 (ниже группа «ERA5») и аэрологического зондирования (группа «Аэрология») в азиатской части Арктического сектора России, был сформирован массив для трех исследуемых станций, расположенных в азиатской части Арктического сектора России. Из массива исключались отрицательные значения индекса, поскольку такие величины не несут физического смысла.

В качестве проверочного критерия на соответствие закона распределения использовался критерий Колмогорова – Смирнова. За нулевую принималась гипотеза об отсутствии различия анализируемого распределения с теоретически ожидаемым нормальным распределением. Для всех трех станций статистическая проверка об отсутствии различий была выполнена на критическом уровне $p > 0,05$. Таким образом, три выборки имеют нормальное распределение (рис. 4). Оценка на принадлежность одной генеральной совокупности проводилась с учетом соответствия средних и дисперсий (критериев Стьюдента и Фишера).

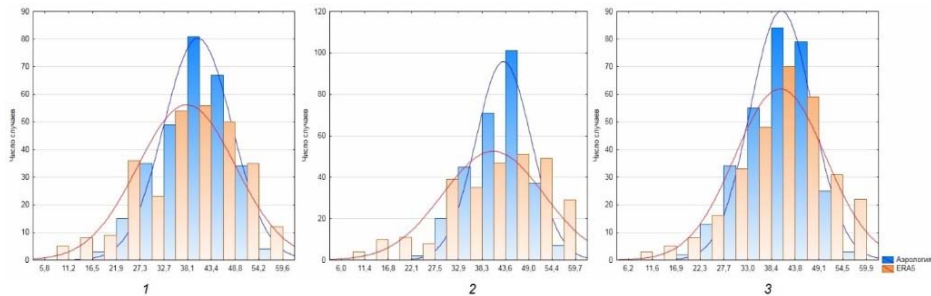


Рис. 4. Гистограммы нормального распределения для данных реанализа (синий) и аэрологических данных (оранжевый) для станций 1) Туруханск; 2) Ванавара; 3) Якутск.

Fig. 4. Normal distribution histograms for the reanalysis data (blue) and upper-air data (orange) for 1) Turukhansk; 2) Vanavara; 3) Yakutsk.

Для каждой станции по аэрологическим данным определен доверительный интервал, ограниченный $1,25\sigma$ (среднеквадратического отклонения, 75 %). Соответствие значения индекса TOTL продукта ERA5 границам этого интервала интерпретировалось как совпадение.

Получено, что критических отличий между верифицируемыми выборками не обнаружено. Сравнение в группах «Аэрология» и «ERA5» показало, что наибольшие различия получены на станции Ванавара (табл. 2):

за рассматриваемый период 3,5 % значений индекса TOTL по данным реанализа были значительно ниже аналогичных значений по данным аэрологического зондирования (9 событий). Наилучшее согласие двух выборок демонстрируют значения индекса на станции Якутск (1,4 %).

Таблица 2. Сравнение основных статистических показателей и процента несовпадения результатов по данным аэрологического зондирования и реанализа

Table 2. Comparison of basic statistics and percentage of discrepancy between upper-air sounding and reanalysis

Данные	Туруханск		Ванавара		Якутск	
	Аэро- логия	ERA5	Аэро- логия	ERA5	Аэро- логия	ERA5
Н наблюдений	288		283		295	
Среднее, ед.	40,2	37,7	43,0	40,7	40,5	40,2
СКО, ед.	7,7	11,0	6,3	11,5	7,0	10,2
Минимум, ед.	17	5,8	26,8	6,0	20,2	6,2
Максимум, ед.	56,7	59,6	58,0	59,7	58,0	59,9
Критерий Стьюдента	0,002		0,003		0,727	
Критерий Фишера	2,041		3,325		2,119	
Процент несовпадения, %	3,1		3,5		1,4	
BIAS, ед.	-2,6		-2,4		-0,4	
MAE, ед.	10,8		9,7		9,5	
RMSE, ед.	13,9		12,6		12,3	

Для оценки соответствия значений индекса TOTL, полученных по данным реанализа и аэрологических наблюдений, рассчитывались следующие показатели [7]:

1) BIAS – систематическая ошибка, представляющая систематическое завышение или занижение верифицируемого значения индекса (ERA5) относительно принятого за эталонный (аэрология):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - E_i) ,$$

2) MAE – средняя абсолютная ошибка, характеризующая среднее значение погрешности без учета ее знака (с точностью до 0,1):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i - E_i| ,$$

3) RMSE – средняя квадратическая ошибка, показывающая средне-квадратическое отклонение верифицируемой величины от эталонной:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - E_i)^2},$$

где N – число случаев; V_i – верифицируемое значение индекса (реанализ); E_i – эталонное значение (аэрология).

Систематическая погрешность BIAS значений TOTL по данным реанализа составила от -0,4 до -2,5 единиц. Значения MAE не превысили 11 единиц индекса. Оценка RMSE показала, что среднее отклонение реанализных значений TOTL от аэрологических лежат в пределах от 12,3 до 13,9. Значения индекса TOTL по ERA5 в 65–68 % случаев для всех рядов данных не отличались от аэрологических на ± 10 единиц.

Ввиду отсутствия плотной сети метеорологических, аэрологических, спутниковых наблюдений, а также выходных продуктов численного моделирования реанализ является единственным инструментом для исследования метеорологических особенностей арктических территорий. Из достоинств реанализа ERA5 стоит отметить его высокое пространственное и часовое временное разрешение. Однако не стоит забывать и о «сглаживании» и занижении значений в результате интерполяции полей метеовеличин, а также неспособности учитывать особенности рельефа или влияния процессов на разделе «суша – вода».

Приведенные результаты исследования позволяют сделать вывод, что использование продукта реанализа ERA5 «Total Totals» в арктических регионах целесообразно для ретроспективного установления факта наличия гроз и их локализации на слабозаселенных территориях. Для точного установления грозовой деятельности на исследуемой территории необходимо определить пороговые значения индекса как границы вероятности развития грозы, что не входило в задачу данного исследования.

Заключение

Грозы в Арктическом секторе России являются одним из ключевых индикаторов климатических изменений, поскольку они сигнализируют о потеплении в этом холодном регионе. Соответственно, повышение точности прогноза возникновения гроз крайне актуально для северных регионов.

За семилетний период с 2015 по 2021 год выявлено, что в границах рассматриваемого региона грозовая активность чаще приходилась на районы Обской губы (ст. Ныда, 66,63° с. ш., 72,93° в.д.) и берег Игарской протоки Енисея (ст. Игарка, 67,46° с. ш., 86,56° в.д.), что обусловлено выходом на данную территорию южных циклонов. Активная грозовая деятельность для большинства станций наблюдалась в июле, на станциях Ныда и Волочанка пик приходился на август. В 2020 г. зафиксировано максимальное количество грозовых дней по всем станциям (22 дня), что подтверждается обновлением наибольшего числа дней в году с грозой на некоторых исследуемых станциях.

Верификация значений индекса неустойчивости Total Totals, полученных по данным реанализа ERA5 и измерений радиозонда, критических отличий не показала. На станции Якутск получено лучшее согласие двух выборок (1,4 %); на станциях Туруханск и Ванавара процент несовпадения составил 3,1 и 3,5 % соответственно.

В 65–68 % случаев для всех рядов значения индекса Total Totals по данным реанализа и аэрологического зондирования не отличались более чем на ± 10 единиц индекса.

Таким образом, применение продукта реанализа ERA5 «Total Totals» в арктических регионах является перспективным для констатации факта наличия развитых конвективных ячеек, способных продуцировать грозу, и определения наиболее вероятного местоположения молниевых разрядов. Определение пороговых значений индекса как границы вероятности развития грозы позволит использовать выбранный индекс для уточнения прогноза грозовой активности в азиатской части Арктического сектора России.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/project/22-27-00494/>

Список литературы

1. Барашкова Н.К., Кужевская И.В., Поляков Д.В. Классификация форм атмосферной циркуляции: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. 124 с.
2. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коришнова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081. <http://meteo.ru/data/345-atmosfernye-yavleniya-sroki#описание-массива-данных>
3. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
4. ВМО-100. Руководство по климатологической практике. Женева: Изд-во ВМО, 2018. 168 с.
5. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27-37.
6. Доклад Постоянной комиссии по экологическим правам Совета при Президенте Российской Федерации по развитию гражданского общества и правам человека «Зеленый поворот». М., 2020. 130 с.
7. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
8. Кравец К.А., Нечепуренко О.Е. Оценка грозовой активности выше 60° северной широты в РФ // ENVIROMIS 2022: Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 12-17 сентября 2022 года. Томск: Томский центр научно-технической информации, 2022. С. 10-13.
9. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие: Справочное пособие. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 124 с.

10. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Пустовалов К.Н. Сопряженность положения грозových ячеек с высокими значениями индексов неустойчивости атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 278-285.

11. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44-59.

12. О работе аэрологической сети РФ в 2022 году. https://caontr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/upperair-rf2022_20231006.pdf

13. Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Нагорский П.М., Нечепуренко О.Е. Пространственно-временная изменчивость конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным реанализа ERA5 // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 37, № 4. С. 203-215. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215.

14. Разуваев В.Н., Булыгина О.Н., Коришнова Н.Н., Клеценко Л.К., Кузнецова В.Н., Трофименко Л.Т., Шерстюков А.Б., Швець Н.В., Давлетишин С.Г., Зверева Г.Н. Научно-прикладной справочник «Климат России»: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2020621470. Рег. 18.08.2020.

15. Ситнов С.А., Мохов И.И. Содержание водяного пара в атмосфере над Европейской частью России в период летних пожаров 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 414-429.

16. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ изменений условий смерчегенеза в северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 6. С. 722-727.

17. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6 (401). С. 429-435.

18. Шукуров К.А., Мохов И.И., Шукурова Л.М. Оценка радиационного форсинга дымового аэрозоля летних пожаров 2010 г. на основе измерений в московском регионе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 3. С. 293-303.

19. Allen J.T., Karoly D.J. A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979-2011: Inter-annual variability and ENSO influence // Int. J. Climatol. 2014. Vol. 34. P. 81-97. DOI: 10.1002/joc.3667.

20. Brooks H.E., Anderson A., Riemann K., Ebberts I., Flachs H. Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP Reanalysis // Atmos. Res. 2007. Vol. 83. P. 294-305.

21. Brooks H.E., Lee J.W., Craven J.P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data // Atmos. Res. 2003. P. 67-68, 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.

22. Brown D.M., Kochtubajda B., Said R.K. A Severe Thunderstorm Outbreak North of 70°N Over the Canadian Arctic Islands with Unusual Lightning Characteristics // Atmosphere-Ocean. 2020. Vol. 58, no. 4. P. 231-242.

23. Clark A.J., Gallus W.A., Xue M., Kong F. A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles // Weather Forecast. 2009. Vol. 24. P. 1121-1140. DOI:10.1175/2009WAF2222222.1.

24. *Copernicus Climate Change Service. Climate reanalysis.* <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>
25. *Doswell III C.A., Evans J.S.* Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences // *Atmospheric Research.* 2003. P. 117-133. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00047-4.
26. *FENGYUN Satellite Data Center.* <https://satellite.nsmc.org.cn/>
27. *Fernando M., Millangoda M., Premalal S.* Analyze and Comparison of the Atmospheric Instability Using K-Index, Lifted Index, Total Totals Index, Convective Availability Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in Development of Thunderstorms in Sri Lanka During Second Inter-Monsoon // *Multi-Hazard Early Warning and Disaster Risks.* 2021. P. 603-614. DOI: 10.1007/978-3-030-73003-1_41
28. *Galway J.G.* The Lifted index as a predictor of latent instability // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1956. Vol. 3. P. 528-529.
29. *Gensini V.A., Mote T.L., Brooks H.E.* Severe-Thunderstorm Reanalysis Environments and Collocated Radiosonde Observations // *Meteorol. Climatol.* 2014. Vol. 53. P. 742-751. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0263.1.
30. *George J.J.* Weather forecasting for aeronautics. New York; London: Academic Press. 1960. 684 p.
31. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146 (730). P. 1999-2049.
32. *Holzworth R.H., Brundell J.B., McCarthy M.P., Jacobson A.R., Rodger C.J., Anderson T.S.* Lightning in the Arctic // *Geophysical Research Letters.* 2021. Vol. 48, no. 7. DOI: 10.1029/2020GL091366.
33. *Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O.* Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016-2021 // *Atmosphere.* 2022. Vol. 13. P. 1-16. DOI: 10.3390/atmos13050669.
34. *Kononova N.K., Lupo A.R.* Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries // *Atmosphere.* 2020. Vol. 11 (255). P. 1-14. DOI: 10.3390/atmos11030255.
35. *Kuchinskaia O., Bryukhanov I., Penzin M., Ni E., Doroshkevich A., Kostyukhin V., Samokhvalov I., Pustovalov K., Bordulev I., Bryukhanova V., Stykon A., Kirillov N., Zhivotenyuk I.* ERA5 Reanalysis for the Data Interpretation on Polarization Laser Sensing of High-Level Clouds // *Remote Sensing.* 2022. Vol. 15. P. 109. DOI: 10.3390/rs15010109.
36. *Kuzhevskaya I., Volkova M., Nechepurenko O., Chursin V.* A study of hailstorms in the south of Western Siberia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development» – Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area.* 2019. Vol. 698. P. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044036.
37. *Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.* Tipping Elements in the Earth's Climate System // *PNAS.* 2008. Vol. 105 (6). P. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105.
38. *Li F., Chavas D.R., Reed K.A., Dawson II D.T.* Climatology of Severe Local Storm Environments and Synoptic-Scale Features over North America in ERA5 Reanalysis and CAM6 Simulation // *J. Clim.* 2020. Vol. 33 (19). P. 8339-8365. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0986.1.

39. *Markowski P.M., Straka J.M., Rasmussen E.N.* Direct Surface Thermodynamic Observations within the Rear-Fank Downdrafts of Nontornadic and Tornadoic Supercells // *Monthly Weather Review*. 2002. Vol. 130. P. 1692-1721. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2).
40. *McCarty J.L., Smith Thomas E.L., Turetsky M.R.* Arctic fires re-emerging // *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 13. P. 658-660. DOI: 10.1038/s41561-020-00645-5.
41. *Miller R.C.* Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Center // Tech. Report / Headquarters, Air Weather Service, USAF. 1972. 190 p.
42. *MODIS Atmospheric Profiles*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod07.php>
43. *Nguyen L., Rohrer M., Schwarb M., Stoffel M.* Development of a combined empirical index for a 5-day forecast of heavy precipitation over the Bernese Alps // *Environment International*. 2020. Vol. 135. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105357.
44. *Peppler R.A.* A review of static stability indices and related thermodynamic parameters // Illinois State Water Survey Division / Climate and meteorology section. Misc. Publ. 104. 1988. 87 p.
45. *Rasmussen E.N., Blanchard D.O.* A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // *Wea. Forecast*. 1998. Vol. 13. P. 1148-1164. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2).
46. *Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Park Soojin, Zhivotenyuk I.V., Ni E.V., Stykon A.P.* Optical characteristics of contrails according to polarization lidar sensing data // *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2018. 6 p. DOI: 10.1117/12.2504517.
47. *Showalter A.K.* A stability index for forecasting thunderstorms // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1947. Vol. 34. P. 250-252.
48. *Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B., Szuster P., Fortuniak K.* Climatological aspects of convective parameters over Europe: a comparison of ERA-Interim and sounding data // *J. Clim.* 2018. Vol. 31 (11). P. 4281-4308. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0596.1.
49. *Taszarek M., Pilguy N., Allen J.T., Gensini V., Brooks H.E., Szuster P.* Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America // *J. Clim.* 2020. Vol. 34 (8). P. 3211-3237. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0484.1.
50. *University of Wyoming. College of Engineering. Atmospheric Soundings*. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
51. *Vaisala Annual report 2021*. https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala_Annual%20report_2021_final.pdf
52. *Varga A.J., Breuer H.* Evaluation of convective parameters derived from pressure level and native ERA5 data and different resolution WRF climate simulations over Central Europe // *Clim. Dyn.* 2022. Vol. 58. P. 1569-1585. DOI: 10.1007/s00382-021-05979-3.

References

1. *Barashkova N.K., Kuzhevskaja I.V., Poljakov D.V.* Klassifikacija form atmosfernoj cirkuljacii. Tomsk: Pub. Tom. un-ta, 2015, 124 p. [in Russ.].
2. *Bulygina O.N., Veselov V.M., Aleksandrova T.M., Korshunova N.N.* Opisanie massiva dannyh po atmosferynym javlenijam na meteorologicheskikh stancijah Rossii.

Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2015620081. Available at: <http://meteo.ru/data/345-atmosferynye-yavleniya-sroki#opisanie-massiva-dannyh> [in Russ.].

3. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 101-119 [in Russ.].

4. *VMO-100*. Rukovodstvo po klimatologicheskoy praktike. 2018, Geneva, 168 p. [in Russ.].

5. Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. Analysis of the results of thunderstorm forecasting based on atmospheric instability indices using the WRF-ARW numerical model data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, pp. 16-24. DOI:10.3103/S1068373915010033

6. Doklad Postojannoj komissii po jekologicheskim pravam Soveta pri Prezidente Rossijskoj Federacii po razvitiju grazhdanskogo obshhestva i pravam cheloveka. Moscow, 2020, 128 p. [in Russ.].

7. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Ju. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].

8. Kravec K.A., Nechepurenko O.E. Ocenka grozovoj aktivnosti vyshe 60° Severnoj shirotы v RF [Assessment of thunderstorm activity above 60° North latitude in the Russian Federation]. *ENVIROMIS 2022: Mezhdunarodnaja konferencija i shkola molodyh uchenyh po izmerenijam, modelirovaniju i informacionnym sistemam dlja izuchenija okruzhajushhej srede*, Tomsk, 12-17 sentjabrja 2022 goda. Tomsk: Tomskij centr nauchno-tehnicheskoy informacii, 2022, pp. 10-13 [in Russ.].

9. Monitoring obshhej cirkuljacii atmosfery. Severnoe polusharie. Obninsk, FGBU «VNIIGMI-MCD», 2012, 124 p. [in Russ.].

10. Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Pustovalov K.N. Sopryazhennost' polozhenija grozovyh jacheek s vysokimi znachenijami indeksov neustojchivosti atmosfery na jugo-vostoke Zapadnoj Sibiri [Conjugation of the position of thunderstorm cells with high values of atmospheric instability indices in the southeast of Western Siberia]. V sbornike: *Sovremennye tendencii i perspektivy razvitija gidrometeorologii v Rossii. Materialy III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2020, pp. 278-285 [in Russ.].

11. Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Sevast'janov V.V. Indices of atmospheric instability and their threshold values, optimal for forecasting thunderstorms over Siberia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 368, no. 2, pp. 44-59 [in Russ.].

12. O rabote ajerologicheskoy seti RF v 2022 godu. https://caontr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/upperair-rf2022_20231006.pdf [in Russ.].

13. Pustovalov K.N., Gorbatenko V.P., Nagorskij P.M., Nechepurenko O.E. Spatiotemporal variability of convective instability in the south of Western Siberia according to ERA5 reanalysis data. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki [Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences]*, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 203-215. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215 [in Russ.].

14. Razuvaev V.N., Bulygina O.N., Korshunova N.N., Kleshhenko L.K., Kuznecova V.N., Trofimenko L.T., Sherstjukov A.B., Shvec' N.V., Davletshin S.G., Zvereva G.N. Nauchno-prikladnoj spravochnik «Klimat Rossii» [in Russ.].

15. Sitnov S.A., Mohov I.I. Water-Vapor Content in the Atmosphere over European Russia during the 2010 Summer Fire. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*], 2013, vol. 49, no. 4, pp. 414 [in Russ.].

16. Chernokul'skij A.V., Kurganskij M.V., Mohov I.I. Analiz izmenenij uslovij smerchegeneza v severnoj Evrazii s ispol'zovaniem prostogo indeksa konvektivnoj neustojchivosti atmosfery. *Doklady Akademii nauk*, 2017, vol. 477, no. 6, pp. 722-727 [in Russ.].

17. Shihov A.N., Chernokul'skij A.V., Sprygin A.A., Jarynich Ju.I. Assessment of convective instability of the atmosphere in cases of squalls, tornadoes and large hail based on satellite observations and ERA5 reanalysis. *Optika atmosfery i okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2022, vol. 35, no. 6, pp. 429-435 [in Russ.].

18. Shukurov K.A., Mohov I.I., Shukurova L.M. Assessment of radiation forcing of smoke aerosol from summer fires in 2010 based on measurements in the Moscow region. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*], 2014, vol. 50, no. 3, pp. 293 [in Russ.].

19. Allen J.T., Karoly D.J. A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979-2011: Inter-annual variability and ENSO influence. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, pp. 81-97. DOI: 10.1002/joc.3667.

20. Brooks H.E., Anderson A., Riemann K., Ebbers I., Flachs H. Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP Reanalysis. *Atmos. Res.*, 2007, vol. 83, pp. 294-305.

21. Brooks H.E., Lee J.W., Craven J.P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmos. Res.*, 2003, pp. 67-68, 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.

22. Brown D.M., Kochtubajda B., Said R.K. A Severe Thunderstorm Outbreak North of 70°N Over the Canadian Arctic Islands with Unusual Lightning Characteristics. *Atmosphere-Ocean*, 2020, vol. 58, no. 4, pp. 231-242.

23. Clark A.J., Gallus W.A., Xue M., Kong F. A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles. *Weather Forecast*, 2009, vol. 24, pp. 1121-1140. DOI:10.1175/2009WAF2222222.1.

24. Copernicus Climate Change Service. *Climate reanalysis*. <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>

25. Doswell III C.A., Evans J.S. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences. *Atmospheric Research*, 2003, pp. 117-133. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00047-4.

26. FENGYUN Satellite Data Center. <https://satellite.nsmc.org.cn/>

27. Fernando M., Millangoda M., Premalal S. Analyze and Comparison of the Atmospheric Instability Using K-Index, Lifted Index, Total Totals Index, Convective Availability Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in Development of Thunderstorms in Sri Lanka During Second Inter-Monsoon. *Multi-Hazard Early Warning and Disaster Risks*, 2021, pp. 603-614. DOI: 10.1007/978-3-030-73003-1_41

28. Galway J.G. The Lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1956, vol. 3, pp. 528-529.

29. Gensini V.A., Mote T.L., Brooks H.E. Severe-Thunderstorm Reanalysis Environments and Collocated Radiosonde Observations. *Meteorol. Climatol.*, 2014, vol. 53, pp. 742-751. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0263.1.

30. George J.J. Weather forecasting for aeronautics. New York; London: Academic Press publ., 1960, 684 p.

31. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, no. 730. pp. 1999-2049.
32. Holzworth R.H., Brundell J.B., McCarthy M.P., Jacobson A.R., Rodger C.J., Anderson T.S. Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, no. 7. DOI: 10.1029/2020GL091366.
33. Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016-2021. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, pp. 1-16. DOI: 10.3390/atmos13050669.
34. Kononova N.K., Lupo A.R. Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries. *Atmosphere*, 2020, vol. 11 (255), pp. 1-14. DOI: 10.3390/atmos11030255.
35. Kuchinskaiia O., Bryukhanov I., Penzin M., Ni E., Doroshkevich A., Kostyukhin V., Samokhvalov I., Pustovalov K., Bordulev I., Bryukhanova V., Stykon A., Kirillov N., Zhivotenyuk I. ERA5 Reanalysis for the Data Interpretation on Polarization Laser Sensing of High-Level Clouds. *Remote Sensing*. 2022, vol. 15, pp. 109. DOI: 10.3390/rs15010109.
36. Kuzhevskaiia I., Volkova M., Nechepurenko O., Chursin V. A study of hailstorms in the south of Western Siberia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development». Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area. 2019, vol. 698, pp. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044036.
37. Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J. Tipping Elements in the Earth's Climate System. *PNAS*. 2008, vol. 105, pp. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105.
38. Li F., Chavas D.R., Reed K.A., Dawson II D.T. Climatology of Severe Local Storm Environments and Synoptic-Scale Features over North America in ERA5 Reanalysis and CAM6 Simulation. *J. Clim.*, 2020, vol. 33, pp. 8339-8365. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0986.1.
39. Markowski P.M., Straka J.M., Rasmussen E.N. Direct Surface Thermodynamic Observations within the Rear-Flank Downdrafts of Nontornadic and Tornadoic Supercells. *Monthly Weather Review*, 2002, vol. 130, pp. 1692-1721. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2).
40. McCarty J.L., Smith Thomas E.L., Turetsky M.R. Arctic fires re-emerging. *Nature Geoscience*. 2020, vol. 13, pp. 658-660. DOI: 10.1038/s41561-020-00645-5.
41. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Center. Tech. Report. *Headquarters, Air Weather Service, USAF*. 1972. 190 p.
42. MODIS Atmospheric Profiles.
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod07.php>
43. Nguyen L., Rohrer M., Schwarb M., Stoffel M. Development of a combined empirical index for a 5-day forecast of heavy precipitation over the Bernese Alps. *Environment International*. 2020, vol. 135. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105357.
44. Pepler R.A. A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. *Illinois State Water Survey Division. Climate and meteorology section*. Misc. Publ., 104, 1988, 87 p.
45. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters. *Weather and Forecasting*, 1998, vol. 13,

pp. 1148-1164. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<1148:ABCO&OSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCO&OSD>2.0.CO;2).

46. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Park Soojin, Zhivotenyuk I.V., Ni E.V., Stykon A.P. Optical characteristics of contrails according to polarization lidar sensing data. Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2018, 6 p. DOI: 10.1117/12.2504517.

47. Showalter A.K. A stability index for forecasting thunderstorms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1947, vol. 34, pp. 250-252.

48. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B., Szuster P., Fortuniak K. Climatological aspects of convective parameters over Europe: a comparison of ERA-Interim and sounding data. *J. Clim.*, 2018, vol. 31, pp. 4281-4308. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0596.1.

49. Taszarek M., Pilguy N., Allen J.T., Gensini V., Brooks H.E., Szuster P. Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America. *J. Clim.*, 2020, vol. 34, pp. 3211-3237. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0484.1.

50. University of Wyoming. College of Engineering. Atmospheric Soundings. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

51. Vaisala Annual report 2021. https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala_Annual%20report_2021_final.pdf

52. Varga A.J., Breuer H. Evaluation of convective parameters derived from pressure level and native ERA5 data and different resolution WRF climate simulations over Central Europe. *Clim. Dyn.*, 2022, vol. 58, pp. 1569-1585. DOI: 10.1007/s00382-021-05979-3.

Поступила 03.07.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.

Submitted 03.07.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-46-71>

УДК 551.509.5+551.515.9+551.501.8

Опыт тестирования экспериментальных методов Гидрометцентра России при составлении штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды

***Т.Г. Дмитриева, А.В. Смирнов,
А.А. Алексеева, Е.В. Васильев***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
tdsin777@mail.ru*

Анализируются результаты тестирования методов сверхкраткосрочного прогноза интенсивности осадков до 12 ч и порывов ветра до 2 ч, а также технологии диагноза опасных конвективных явлений на основе данных сети ДМРЛ-С для использования в оперативной практике составления штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды конвективного характера. Рассмотрены конкретные случаи синоптических ситуаций возникновения таких явлений. Представлены новые виды используемой картографической продукции численной модели с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2. Дана оценка полезности применения новых экспериментальных методов в оперативной практике.

Ключевые слова: неблагоприятные и опасные явления погоды, наукастинг, интенсивность осадков, шквал, порывы ветра, радиолокационный диагноз, ДМРЛ-С, численная модель COSMO-Ru2.2

Experimental Methods of Hydrometcentre of Russia for Producing Storm Warnings about Adverse and Severe Weather Events

***T.G. Dmitrieva, A.V. Smirnov,
A.A. Alekseeva, E.V. Vasil'ev***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
tdsin777@mail.ru*

The results of testing a method for very-short-range forecasting of precipitation intensity (for a period up to 12 hours) and wind gusts (up to 2 hours), as well as the technology for the diagnosis of severe convective events based on radar data for use in the operational practice of storm warning about adverse and severe convective weather events are analyzed. Case studies of synoptic conditions for the occurrence of such events are considered. New types of cartographic products of the COSMO-Ru2.2 high-resolution numerical model are presented. The benefit from using new experimental methods in operational practice is assessed.

Keywords: adverse and severe weather events, nowcasting, precipitation intensity, squall, wind gusts, radar-based diagnosis, DMRL-C, COSMO-Ru2.2 high-resolution numerical model

Введение

Сверхкраткосрочный прогноз (до 12 ч) и наукастинг (на 2–12 ч с шагом 10 мин) неблагоприятных и опасных конвективных явлений погоды [7] в летний сезон остается трудной задачей как для синоптика, так и для численного прогнозирования с высоким пространственно-временным разрешением [12]. Спрогнозировать точное время и место глубокой конвекции, а значит, и сопутствующих ей опасных конвективных явлений (сильных гроз, ливней, шквалов, града), даже имея представление о конкретных порождающих ее синоптических условиях, достаточно сложно.

Ввиду несовершенства научных знаний о процессах, связанных с сильными конвективными явлениями, могут быть полезны экспериментальные научные разработки в области прогнозирования и диагностики на основе комплекса имеющейся метеорологической информации: численного моделирования, результатов наблюдений, спутниковой, аэрологической, радиолокационной и грозопеленгационной информации, а также оценка полезности их применения.

Определенные сложности также вызывает прогноз сильного ветра в переходные периоды, когда наибольший вклад в усиление скорости ветра вносит приземное барическое поле с высокими градиентами, а также наличие струйных течений нижних уровней [1].

Согласно Наставлению [10], предупреждения об ОЯ (КМЯ), связанные с развитием конвекции (гроза в комплексе с другими конвективными явлениями, ливень, град, шквал), считаются эффективными, если оправдались и выпущены не менее чем за 1 ч до реализации явления, что связано с взрывным характером возникновения ОЯ и достижения им опасной стадии.

Сложность решения этой задачи обусловлена недостаточной точностью выходных данных современных численных прогнозов для определения времени, места возникновения и интенсивности опасного явления (особенно конвективного характера), редкостью сети наблюдений, недостаточной частотой поступления данных [11].

Для составления штормовых предупреждений необходим анализ синоптической обстановки, определяющей погоду региона [9]:

- приземных и барических карт погоды за 00 и 12 ч ВСВ;
- кольцевых и/или (при наличии) микрокольцевых карт с дискретностью 3 ч;
- данных радиозондирования;
- данных прогностического радиозонда для рассматриваемого региона на сайте Гидрометцентра России [13];
- доступных результатов численного прогноза погоды, включая опасные конвективные явления, сроком до 12 ч, особое внимание уделяя прогнозам моделей высокого пространственно-временного разрешения.

При наличии угрозы развития опасного явления конвективного характера (ОКЯ) прогноз детализируется наукастингом для уточнения места,

времени возникновения и интенсивности явления. Для уточнения детализированного прогноза фактическими данными применяется:

- спутниковая информация с дискретностью не реже 15 мин (на доступных ресурсах [14]);

- микрокольцевые карты, по возможности учащенные – через 1 час;

- наукастинг интенсивности осадков на 2 ч и 12 ч для ЕТР [сайты Гидрометцентра России, 15, 16];

- диагноз конвективных явлений по данным сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования для ЕТР (экспериментальная продукция storm.radar);

- радиолокационная информация как одиночного ДМРЛ-С, так и объединенной карты сети ДМРЛ ФГБУ «ЦАО» [17] с расчетом времени подхода осадкообразующей зоны с ОКЯ, а также с учетом представленной на карте совмещенной информации грозопеленгационной сети.

Таким образом анализируется развитие/трансформация ОКЯ. Рассмотрим подробнее предлагаемые методы и инструментарии.

Продукция моделей высокого разрешения COSMO-Ru

В Гидрометцентре России расширен ассортимент продукции численной модели COSMO-Ru с шагом сетки 6 и 2.2 км. Последний вариант – с высоким пространственно-временным разрешением с усвоением данных наземной сети наблюдений и доплеровских метеолокаторов ДМРЛ-С.

В моделях COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2.2 визуализированы карты с наиболее распространенными и широко применяемыми индексами конвекции, способствующими распознаванию формирования опасных явлений конвективного характера (карты представлены на сайтах Гидрометцентра России [18, 19]):

- индекс доступной потенциальной энергии CAPE и ее различных вариаций;

- индекс молниевый потенциал LPI, показывающий молниевую активность, выраженную в цветовой шкале от 1 до 200 (Дж/м²) (рис. 1, левая панель); на карте опасных конвективных явлений соответствует явлению гроза (thunder);

- параметр сильных смерчей STP, основанный на термодинамическом подходе к прогнозу смерчей и смерчеопасных ячеек. Индекс используется для прогноза смерчей интенсивнее F2 по шкале Фуджиты – Пирсона. При STP>1 возможно формирование смерча (рис. 1, правая панель);

- индекс обнаружения суперячеек (SDI, 1/c), выражен в цветовой шкале от -0,009 до 0,009; позволяет определить знак вертикальных движений, т. е. вероятность возникновения суперячейки при положительных (восходящих) движениях и направление вращения в ячейке; рекомендуется при наличии таковой зоны рассматривать ее совместно с картой радиолокационной отражаемости (рис. 2, левая панель) и, для сопоставления, с картой опасных конвективных явлений (рис. 2, правая панель).

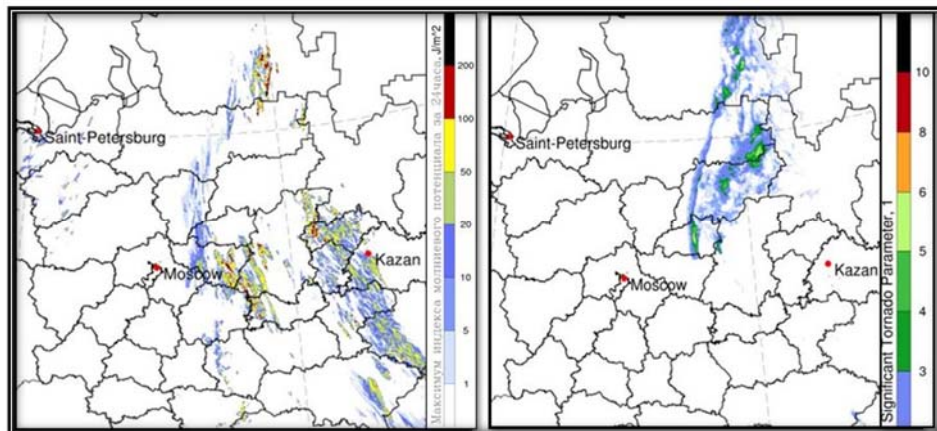


Рис. 1. Карты индексов конвекции на основе численных расчетов модели Cosmo-Ru2.2: индекс молниевоего потенциала LPI – слева, параметр сильных смерчей STP – справа. 29.07.2023, 18 ч МСК от счета 03 ч МСК.

Fig. 1. The maps of convective indices based on the Cosmo-Ru2.2 model simulations: LPI (Lightning Potential Index) (left) and STP (Significant Tornado Parameter) (right) for 18:00 MSC on July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run).

В моделях COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2.2 помимо карт с индексами конвекции визуализированы карты:

– радиолокационной отражаемости (dBZ), шкала от -50 до 70 (рис. 2, левая панель);

– опасных конвективных явлений (осадки, порывы ветра и грозы различной интенсивности, грозы, сопровождающиеся градом и шквалом) в градации «сильные и очень сильные» (рис. 2, правая панель).

Для повышения качества прогноза неблагоприятных и опасных явлений в осенне-зимний период, когда наиболее актуальна угроза гололедных явлений, в том числе ледяного дождя, визуализирована карта фазы осадков (рис. 3). Три цветовых шкалы отражают вид фазы осадков: дождь, снег и смешанные осадки различной водности ($\text{кг}/\text{м}^2$). На основе данной карты, учитывая соответствующие синоптические условия, а для мегаполисов – и влияние городских «островков тепла», зная, что фазовое состояние осадков зависит в основном от высоты изотермической поверхности 0°C (или «нулевой изотермы») и температуры у поверхности Земли [2], прогнозист определяет тип возможных осадков (дождь, снег или смешанная фаза).

Рекомендуемые в Руководстве [2] и полученные для ЕТР на практике эмпирические зависимости показывают, что осадки выпадают в виде дождя или (при температуре воздуха у поверхности Земли ниже 3°C , на уровне поверхности ~ 925 гПа – ниже 0°C [2]) в виде мокрого снега и снега.

При модельном прогнозе (COSMO-Ru6.6 и COSMO-Ru2.2) значительных порывов ветра (15 м/с и более) и сильных ежечасных и/или полусуточных осадков оперативный синоптик переходит к более подробному анализу полей экспериментального наукастинга интенсивности осадков

(до 12 ч), наукастинга порывов ветра (до 2 ч), диагностической радиолокационной информации с учетом данных численной модели (storm.radar), а также более подробной синоптической информации по микрокольцевым картам.

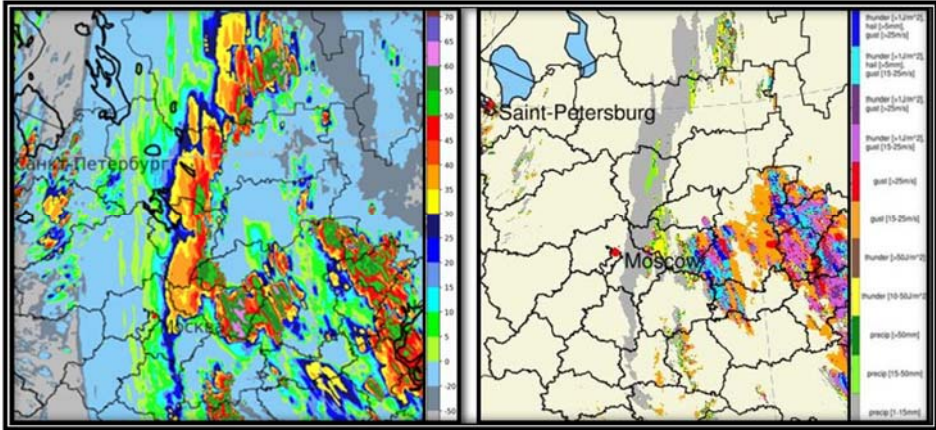


Рис. 2. Карты численных расчетов модели COSMO-Ru2.2: максимальной радиолокационной отражаемости – слева; опасных конвективных явлений – справа. 29.07.2023, 18 ч МСК от счета 03 ч МСК.

Fig. 2. The maps of the COSMO-Ru2.2 simulations: maximum radar reflectivity (left) and severe convective weather events (right) for 18:00 MSC on July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run).

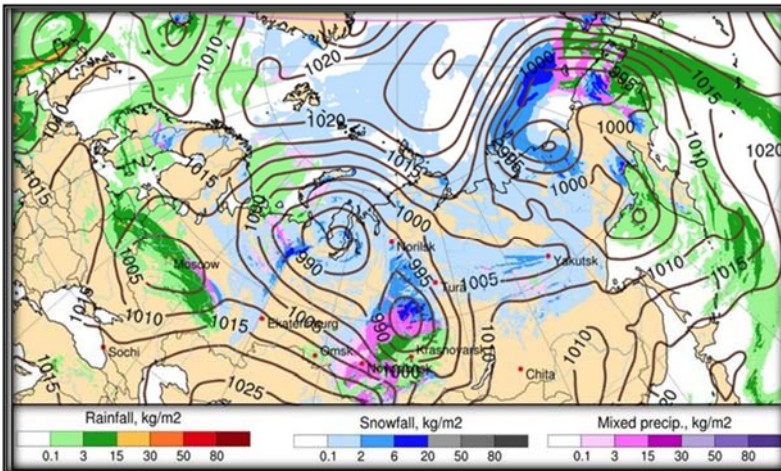


Рис. 3. Карта фазы осадков модели COSMO-Ru2.2 (цветовые шкалы отражают вид фазы осадков от дождя до снега) на примере прогноза на 12 ч к 23.10.2023 от счета 03 ч МСК.

Fig. 3. The COSMO-Ru2.2 precipitation phase forecast map (the color scales indicate the precipitation phases from rain to snow) for 12:00 MSC on October 23, 2023 (the 03:00 MSC model run).

Наукастинг (прогноз до 2 ч) максимальных порывов ветра (шквалов) с учетом данных численной модели высокого разрешения

В помощь оперативному синоптику предлагается экспериментальный наукастинг (прогноз до 2 ч) максимальных порывов ветра при шквалах на основе данных метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С и численного прогноза COSMO-Ru2.2 по территории Центрального федерального округа. В процессе разработки алгоритма и создания технологии и опытного испытания результатов наукастинга в режиме реального времени проводилось сопоставление полей данных наукастинга с фактическими данными наземных станций и сети грозопеленгаторов, а также анализ и реанализ ситуаций возникновения шквалов и усиления ветра за счет больших градиентов приземного давления и/или струйных течений нижних уровней до высоты изобарической поверхности 850 гПа [1]. Получены рекомендации, полезные оперативному прогнозисту при разработке штормовых предупреждений об опасных явлениях погоды конвективного характера.

На примере случаев шквалов в Поволжье 29.07.2023 и 07.10.2023 в аэропорту Внуково, ниже приведенных, рассмотрим возможности наукастинга для его использования при разработке штормовых предупреждений.

Случай ураганного ветра 29 июля 2023 года в Поволжье

29 июля регион Поволжья находился под влиянием обширной многоцентровой депрессии, включающей двухцентровый циклон, сформировавшийся 27 июля над Черным морем. В теплом секторе циклона, где регион находился 28 и 29 июля, на его юго-восточной стороне, где с юга подтекал влажный, теплый воздух, на поверхности 850 гПа отмечалась температура воздуха 19–21 °С, максимальная температура у поверхности Земли днем достигала 33–37 °С. В течение двух дней в регионе наблюдалась активная грозовая деятельность, сопровождавшаяся сильными шквалами, тропическими ливнями и в отдельных районах градом.

С прохождением холодного атмосферного фронта с волнами температура воздуха понизилась в целом на 9–10 °С. В табл. 1 приведены наиболее сильные/экстремальные фактические значения порывов ветра по региону, расчеты COSMO-Ru2.2, а также некоторые радиолокационные данные расчетных величин по ДМРЛ-С («Самара», «Казань», «Нижний Новгород»), которые могут указывать на идентификацию опасного конвективного явления «шквал».

В данной статье мы опускаем разбор других сопутствующих конвективных явлений (гроза, ливни, град), а сосредоточимся на шквалах, так как именно ими был нанесен значительный ущерб.

Таблица 1. Значения фактических и прогностических порывов ветра (м/с) и метеорологических и радиолокационных величин 29.07.2023 в регионе Поволжья
Table 1. The values of observed and predicted wind gusts (m/s) and meteorological and radar parameters in the Volga region on July 29, 2023

Район	МС, н/п	Время (ч МСК)	Max порыв факт., м/с	Max порыв COSMO м/с	Т°С	Тd°С	ΔТ/500, км	Δр/Зч, гПа	Нвго, км	Zmax, dBZ	Vil, кг/м ²	Явление по локатору
Самарская обл	Тольятти-Дамба	15.10-15.20	28,5	-	36,1	15	10,6	-1,1	13,7	55	33	град сильный
	Новодевичье	15.19-16.10	28	-	34,3	15	7,4	-1,2	13,7	57	36	град сильный
Ульяновская обл.	Сенпелей	15.58-16.25	25	-	36,6	12	11,9	-1,3	12,8	52	23	град сильный
	Ульяновск	16.20-16.35	26	23,4 (15 МСК)	34,1	13	12,3	-1,2	13,3	52	31	град сильный
Чувашия	Димитровград	16.50-16.55	27	17,9 (16 МСК)	35,3	14	8,4	-1,3	14,7	60	39	шквал умерен., град сильный
	Чебоксары	15.49	33	19,1 (15 МСК)	30,2	20	9,6	-1,1	15	60	80	шквал умерен., град сильный
Нижегородская обл.	Воскресенское	15.40-15.50	21	-	30,9	19	12,8	-0,7	13,7	58	26	шквал умерен., град сильный
	Бор	17-17.30	22	-	-	-	-	-	14	-	-	шквал слабый, град слабый
Татарстан	Нагорная часть		24	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Н.Новгород	~ 16.30	24,5- 28,4*	19,6 (18 МСК) 15,5 (11 МСК)	29,3	19	8,5	-0,8	15	65	76	шквал сильный, град сильный
Татарстан	Б.Кайблцы	17.50	23	-	33,3	16	12,8	-1,0	14	55	40	град сильный
	Вязовые	18.18-18.26	27	-	31,2	20	8,9	-1,3	14,4	57	37	град сильный

Примечание. * Шкала Бофорта, данные интернет-источников. Обозначения: МС, н/п – метеостанция, населенный пункт; Т°С – температура воздуха у Земли в 12 ч МСК; Тd°С – температура точки росы в 12 ч МСК; ΔТ/500 – градиент приземной температуры воздуха на расстоянии 500 км; Δр – барическая тенденция; Нвго – верхняя граница Сb облачности; Zmax – максимальная отражаемость в Сb облаке; Vil – вертикальная интегрированная водность облака.

Анализ табл. 1 подтверждает, что сильным приземным порывам ветра/шквалам, вызванным активной конвекцией, соответствуют максимальные значения параметров радиолокатора: максимальная отражаемость радиозеха 58–65 dBz, вертикальная интегрированная водность облака (32–80 кг/м²), высота кучево-дождевого облака 13–15 км. На карте метеоявлений ДМРЛ-С в пяти пунктах диагностированы шквалы, в трех случаях в градации «умеренный» и по одному – в градации «слабый» и «сильный».

Исследования состоявшихся конвективных явлений и реанализ условий возникающей конвекции, проведенные авторами за прошедшие летние периоды, в т. ч. в режиме реального времени, показали, что не все индексы конвекции являются необходимым и достаточным условием для реализации опасных конвективных явлений и, следовательно, для учета при разработке штормового предупреждения о них. Наиболее показательными расчетными параметрами являются доступная потенциальная энергия (CAPE, Дж/кг), указывающая на величину вероятной неустойчивости атмосферы в данной точке или более обширно – на некоторой площади (если считать репрезентативными данные радиозондирования на расстоянии до 250 км), соответственно, возможность реализации опасных конвективных явлений, а также индекс CIN, являющийся показателем наличия задерживающего слоя, тормозящего развитие конвекции, и часто взрывного возникновения ОЯ. Чаще всего CIN максимален в утренние часы, когда наблюдаются задерживающие слои инверсии или изотермии, но в летний период при дальнейшем прогреве солнечными лучами атмосферы он разрушается, давая ход реализации конвекции.

Конвективные индексы [4] можно проанализировать по данным радиозондирования, приведенным на сайте университета Вайоминга (США) [20] (табл. 2).

Все эти индексы рассчитываются моделями COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2.2 (радиолокационные данные расчетных величин по ДМРЛ-С «Самара», «Казань», «Нижний Новгород») и в разной степени отражают конвективную неустойчивость воздушной массы: одни – в нижней тропосфере, но с учетом вертикальной протяженности влажного слоя воздуха (Ki), другие – на более высоком уровне до 500 гПа (Li), что может указывать на сильные восходящие потоки и, соответственно, развитие сильной грозовой деятельности.

Некоторые индексы являются комплексными: SWEAT и TT учитывают показатели нижней и средней тропосферы для прогноза опасных конвективных явлений, включая смерчи.

Из табл. 2 видно, что для рассматриваемого случая 29 июля 2023 года в Поволжье наиболее показательными являются значения индексов CAPE, CIN и Li.

В целом в регионе были необходимые и достаточные условия для развития активной конвекции, что и подтверждается фактическими данными о сильных порывах ветра/шквалах (см. табл. 1).

Таблица 2. Индексы конвекции по данным зондирования атмосферы в гг. Казань, Нижний Новгород и Самара (Безенчук) за 03 и 15 ч МСК 29.07.2023
Table 2. The convection indices according to the radiosonde data from Kazan, Nizhny Novgorod, and Samara (Bezenchuk) for 03:00 and 15:00 MSC on July 29, 2023

Индекс	Срок выпуска р/зонта, ч ВСВ						Критерий состояния атмосферы
	00			12			
	Казань	Н.Новгород	Самара (Безенчук)	Казань	Н.Новгород	Самара (Безенчук)	
CAPE, Дж/кг	1177	502	960	1632	143	1939	<1000 – слабая неустойчивость, вероятны грозы; 1000–2500 – умеренная неустойчивость, сильные грозы и ливни
CIN, Дж/кг	238	180	228	0	300	98	0 – отсутствие воздействия задерживающего конвекцию слоя; <50 – слабое воздействие; 50-200 – умеренное воздействие; >200 – сильное воздействие
Li, °C	-3	1	3	-5	-1	6	≥4 – абсолютная устойчивость; 2...3 – возможны изолированные Cu cong; 1...2 – слабая конвекция, наблюдаются Cu cong; -1...-2 – почти повсеместно слабые грозы, возможны шквалы; -3...-4 – вероятны сильные грозы, шквалы, возможен град; -4...-5 – повсеместно сильные грозы, град, шквалы, глубокая конвекция; -5...-6 – очень сильные грозы, наблюдается формирование суперячеек, крупный град, возможны смерчи
TT, °C	51	49	47	49	50	47	48-49 – значительное количество гроз, некоторые сильные; 50-51 – сильные грозовые очаги, отдельные очаги с торнадо
Ki, °C	36	34	30	25	32	31	25-30 – несколько гроз; 30-35 – рассеянные грозы
Si, °C	-1	1	2	-0	-1	2	>0 – атмосфера устойчивая; -4...0 – атмосфера слабонеустойчивая
SWEAT	203	147	128	166	219	155	<250 – нет условий для возникновения сильных гроз

По приведенным показателям наиболее благоприятные условия для реализации сильных порывов/шквалов к 15 ч МСК сложились в районе г. Чебоксары (Республика Чувашия), а также в Ульяновской и Самарской областях (данные р/зондов пп. Казань и Самара). По картам метеоявлений и данным ДМРЛ-С «Нижний Новгород», «Казань», «Самара» в Нижнем Новгороде идентифицировался сильный шквал, в Казани и Самаре – сильный град (табл. 1). Величина CAPE в Нижнем Новгороде в оба срока соответствовала лишь слабой неустойчивости атмосферы и вероятностным грозам, а также сильному задерживающему конвекцию слою, показателем которого является CIN (табл. 2). И только индекс TT показывал на сильные грозовые очаги, отдельные очаги с торнадо.

Можно предположить, что некоторые шквалы все-таки могли быть не отмечены наземными метеостанциями или дополнительные условия для их реализации были не достаточны. Например, при общих благоприятных синоптических и термодинамических условиях (контрасты температуры воздуха на холодном фронте не менее 10 °С) (рис. 4) для реализации сильных порывов ветра/шквалов у поверхности Земли, наблюдавшихся в данном регионе – наличие высотного гребня тепла при антициклонической кривизне изогипс и их расходимости, сопровождавшееся значительным ослаблением ветра по потоку [3], что видно в данном примере на картах барической топографии АТ-850 и АТ-500 гПа (рис. 5), – условия расходимости изогипс были лучше для Республики Чувашии, Ульяновской и Самарской областей, чем для Нижегородской области.

Рассмотрим далее модельные расчеты данного случая.

Прогноз максимальных порывов ветра по COSMO-Ru2.2

Если рассматривать глобально прогноз максимальных порывов приземного ветра численной модели COSMO-Ru2.2, можно сказать, что модель хорошо спрогнозировала сильные ветры в Поволжье. На карте максимальных порывов ветра (рис. 6) видны зоны очень сильного ветра 30–35 м/с на юго-западе Республики Татарстан, до 30 м/с на юго-западе Республики Марий Эл, северо-востоке Нижегородской обл. и на юге Самарской области.

На карте максимальных порывов ветра с заблаговременностью суток можно видеть правильно рассчитанную зону с повышенными порывами ветра 20–25 м/с, локальными зонами 25–30 м/с и отдельными очагами максимальных порывов выше 30 м/с по всему региону Поволжья, который находился, как указывалось выше, под влиянием обширного двухцентрового циклона. При сравнении спрогнозированных очагов максимальных порывов ветра на картах часовой дискретности с фактическими видно, что модель правильно определила время максимальных порывов – с 13.30 до 18.30 ч МСК, пиковый максимум – около 16 ч МСК (МС Чебоксары порыв 33 м/с). Причем смещенность самого спрогнозированного очага максимального порыва (более 30 м/с) относительно факта 33 м/с на территории

Республики Чувашия – не более 100 км и до 150 км – от максимальных очагов 28 м/с в Самарской области.

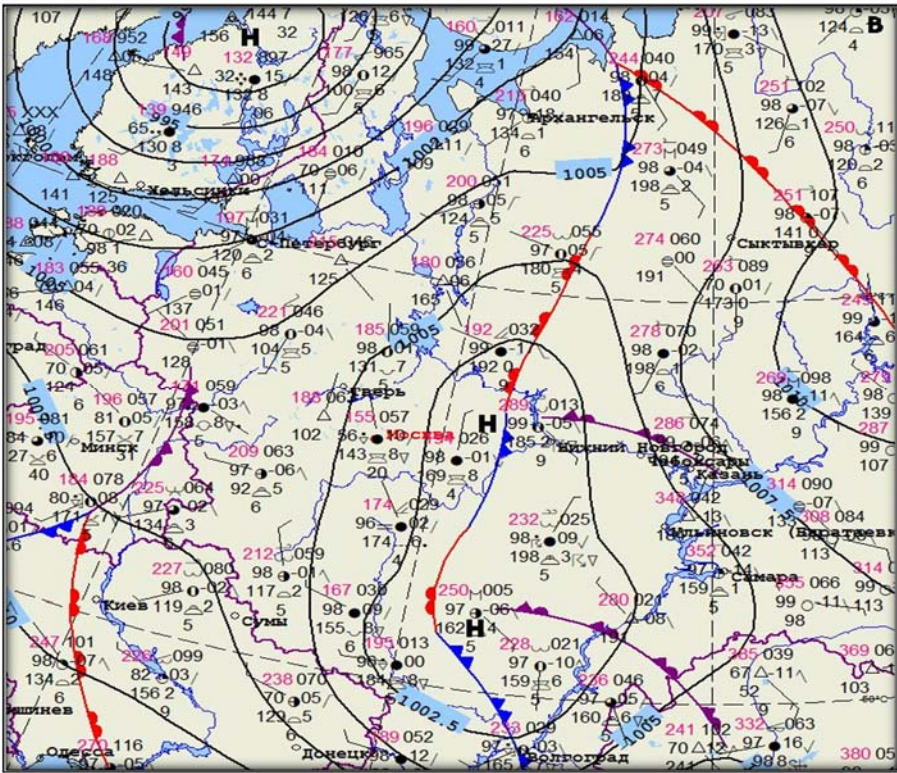


Рис. 4. Приземная карта погоды с фронтальным анализом за 12 ч МСК 29.07.2023.

Fig. 4. The surface weather chart with frontal analysis for 12:00 MSC on July 29, 2023.

Модельные прогнозы визуализируются также в графическом виде. На рис. 7 приведены спрогнозированные максимальные скорости ветра в сравнении с фактическими по четырем пунктам, где есть данные наблюдений наземных метеостанций, из чего следует, что представленные в конкретных точках (пунктах) значения спрогнозированных максимальных порывов ветра занижены относительно фактических максимальных порывов. Определяемые по цветовой шкале на рис. 6 зоны ближе по скорости к фактическим данным наземных метеостанций. Так, наиболее сопоставимы в графическом виде спрогнозированные и фактические порывы ветра по п. Ульяновск (26 м/с факт и 23 м/с прогноз, что вполне приемлемо для прогноза). Сравнения по остальным пунктам имеют значительно большие расхождения.

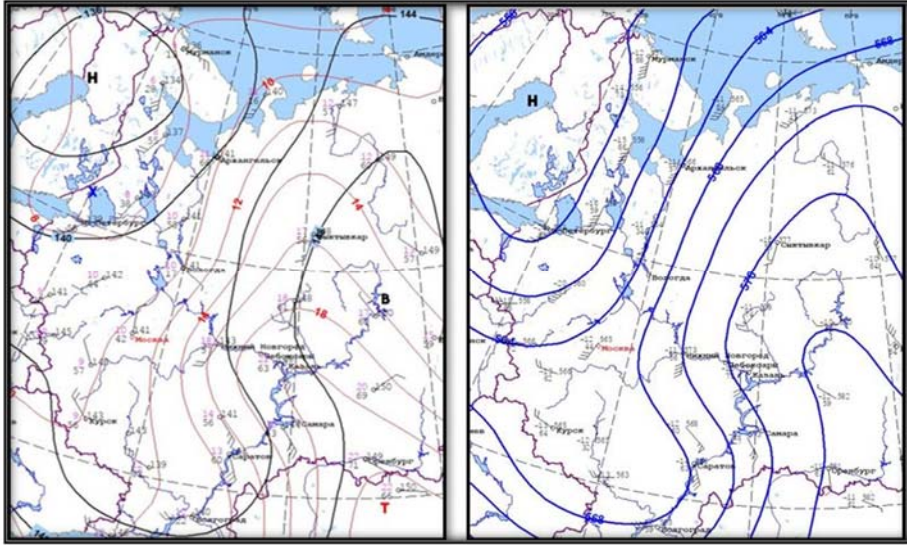


Рис. 5. Карты АТ-850 (слева) и АТ-500 (справа) за 15 ч МСК 29.07.2023
 Цветом нанесены изолинии: изогипсы – черным на карте АТ-850; синим – на АТ-500; красным – изотермы на АТ-850 гПа.

Fig. 5. The 850 hPa (left) and 500 hPa (right) maps for 15:00 MSC on July 29, 2023. The isolines: the isohypses are black at 850 hPa and blue at 500 hPa; the isotherms at 850 hPa are red.

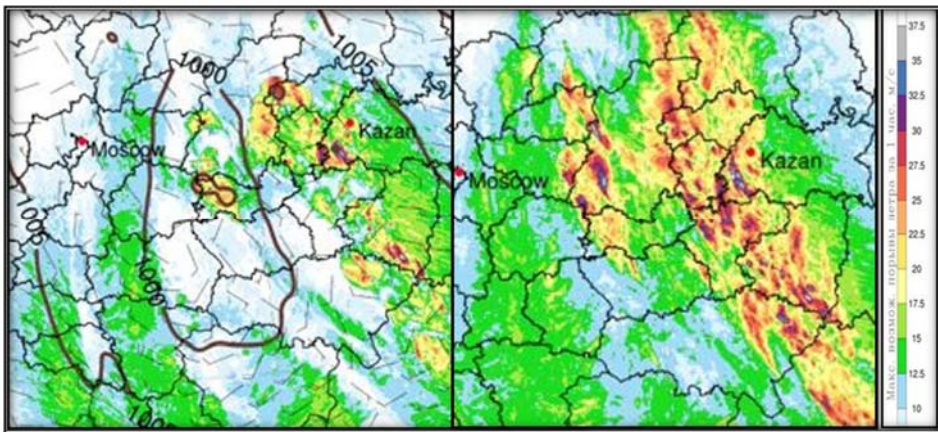


Рис. 6. Карты максимальных порывов ветра модели COSMO-Ru2.2 29.07.2023 от счета 03 ч МСК: на 16 ч МСК (слева), с суточной заблаговременностью (справа). Сила ветра отражена на цветовой шкале.

Fig. 6. The COSMO-Ru2.2 maps of maximum wind gusts for July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run): for 16:00 MSC (left), with a daily lead time (right). Wind speed is given on the color scale.

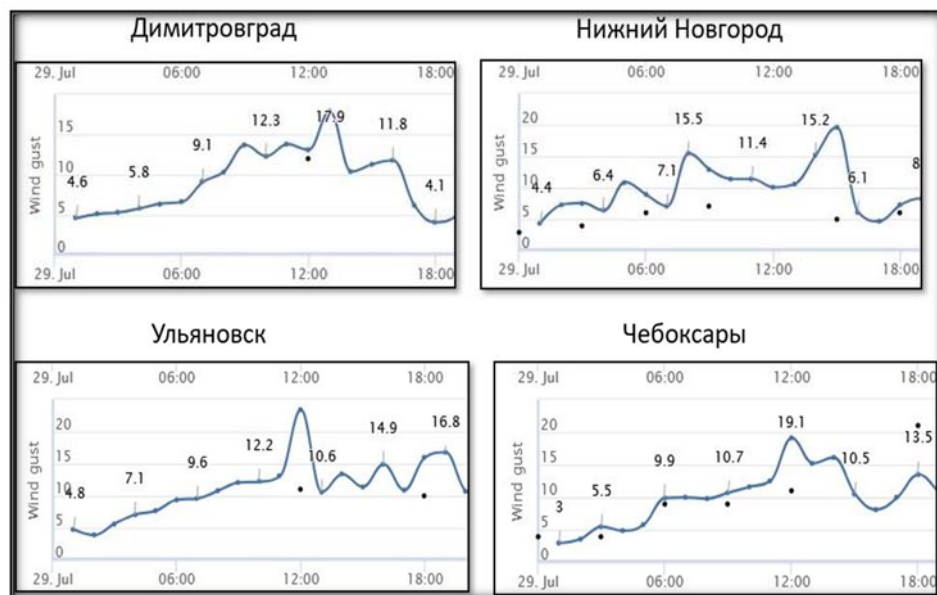


Рис. 7. Графическое представление численных расчетов максимальных порывов ветра модели COSMO-Ru2.2 29.07.2023 от счета 03 ч МСК по пунктам: Димитровград, Нижний Новгород, Ульяновск, Чебоксары. Синие линии – спрогнозированные порывы ветра; «жирные» точки без линий – фактические порывы.

Fig. 7. The graphic presentation of the COSMO-Ru2.2 numerical simulations of maximum wind gusts for July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run) for four stations with available weather station observations: Dimitrovgrad, Nizhny Novgorod, Ulyanovsk, and Cheboksary. The blue lines are predicted wind gusts; the bold dots without lines are observed gusts.

Следует сделать вывод, что прогнозисту при разработке штормового предупреждения о сильном ветре при шквале следует прежде всего, кроме обязательной оценки синоптической ситуации, анализировать карты максимальных порывов ветра расчетов модели с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2, при этом понимая, что если модель прогнозирует очаги максимальных порывов ветра в соседних к пункту прогноза областях, особенно перемещающихся по воздушному потоку, то следует уточнять для пункта/района прогноза скорости по графическому материалу. Следует учитывать также известные благоприятные термодинамические условия – температура воздуха 25–30 °С, точка росы 16–20 °С, значительные величина падения давления и контрасты температуры воздуха на фронте. Сравнение фактических и модельных прогностических максимальных порывов ветра см. в табл. 1.

В помощь оперативному синоптику также предлагается экспериментальный наукастинг порывов ветра до 2 ч, построенный по данным сети

локаторов ДМРЛ-С на ЕТР и модели COSMO-Ru2.2, пример которого для 29.07.2023 по территории региона Поволжья приведен ниже.

Наукастинг порывов ветра до 2 ч по региону Поволжья 29.07.2023

По приведенным на рис. 8 картам наукастинга порывов ветра видно, что в регионе Поволжья правильно воспроизведены сильные порывы ветра: по региону в основной градации 15–20 м/с (зеленый цвет) с очагами 20–25 м/с (желтый цвет) и 25–30 м/с (оранжевый цвет), с максимальным очагом в Нижегородской области более 30 м/с (красный цвет). Однако не показан наиболее сильный ветер 26 м/с с порывом 33 м/с в районе МС Чебоксары, хотя на юго-западе Республики Чувашия отражены порывы до 30 м/с и область максимального порыва смещается в Нижегородскую область из района Чебоксар, то есть край расчетной области не всегда может позволить воспроизвести ситуацию.

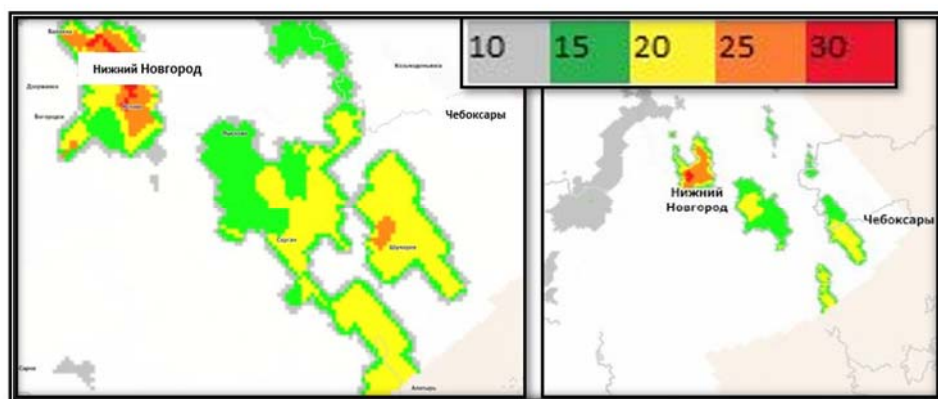


Рис. 8. Пример наукастинга Гидрометцентра России порывов ветра на 13.30 ч МСК (слева) и 14.20 ч МСК (справа) 29.07.2023. Величина порывов ветра определяется по цветовой шкале.

Fig. 8. The example of wind gust nowcasting (Hydrometcentre of Russia) for 13:30 (left) and 14:20 MSC (right) on July 29, 2023. Wind gusts are determined by the color scale.

Случай шквала с порывами до 26 м/с в аэропорту Внуково 7 октября 2023 года

На примере случая шквала в Московском регионе 07.10.2023 (аэропорт Внуково в 19.22 ч МСК), когда наблюдательной сетью был зафиксирован максимальный порыв ветра 26 м/с, покажем применение наукастинга порывов ветра на 2 ч и результаты его погрешности в отображении максимальных порывов при данной синоптической ситуации.

Этот случай связан со струйным течением нижних уровней (СТНУ) [1], характерным при прохождении системы атмосферных фронтов (рис. 9). СТНУ располагается перед фронтом в теплом влажном воздухе теплого сектора циклона с максимумом составляющей скорости ветра, параллельной фронту. В качестве критерия выделения скорости СТНУ, подобного критерию ВМО для струйного течения в свободной атмосфере, в некоторых источниках используют скорость от 15 м/с. СТНУ способствует возникновению и усилению порывов ветра у земли даже до градации опасного явления погоды. На рис. 9 (правая панель) приведена карта барической топографии АТ-850, где показано, что южнее Москвы наблюдается СТНУ со скоростью 25 м/с (данные радиозонда для п. Москва – Долгопрудный отсутствуют).

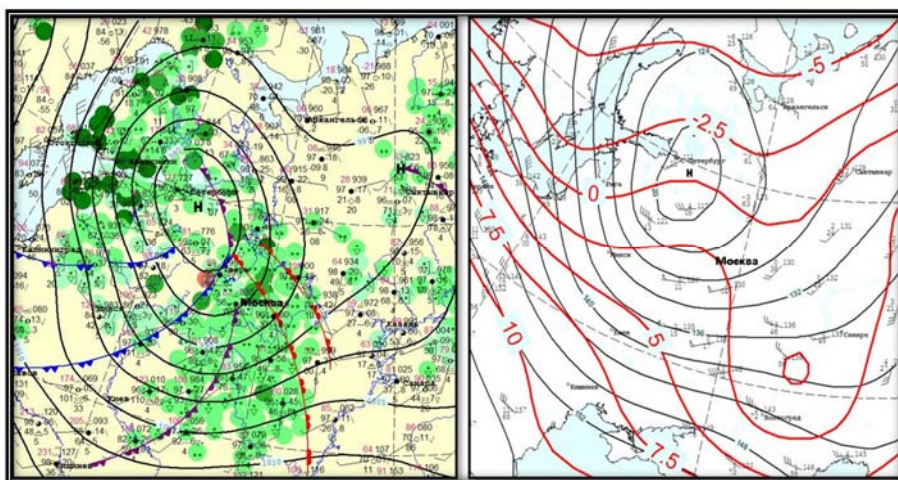


Рис. 9. Карта погоды с фронтальным анализом за 18 ч МСК (слева) и барической топографии АТ-850 за 15 ч МСК (справа) 07.10.2023. Черным цветом нанесены изобары и изогипсы, красным – изотермы; треугольники в оперении значений скорости ветра на карте АТ-850 обозначают скорость ветра 25 м/с.
Fig. 9. The weather map with frontal analysis for 18:00 MSC (left) and 850 hPa map for 15:00 MSC (right) for October 7, 2023. The isobars and isohypses are black, the isotherms are red; the triangles in the wind speed symbols on the 850 hPa map mark the wind speed of 25 m/s.

По данным ДМРЛ-С «Внуково», в 19.20 ч МСК в районе аэропорта Внуково находился ливнеопасный очаг с максимальной интенсивностью осадков 15–20 мм/ч (рис. 10), высотой кучево-дождевой облачности локально до 8 км и максимальной отражаемостью (рис. 10 и 11), что может быть соотнесено с критериями явления «шквал» для переходного периода, которые еще не прописаны для этого периода в Инструкции [5]. На рис. 11 приведен вертикальный разрез кучево-дождевого облака, на котором локальная зеленая зона соответствует максимальной отражаемости облака

На рис. 12 приведен фрагмент карты наукастинга на 2 ч порывов ветра в 19.10 ч МСК 07.10.2023. Видно, что в районе п. Наро-Фоминск находилась зона сильного ветра со скоростью 15–20 м/с, которая по воздушному потоку двигалась к аэропорту Внуково, где и был зафиксирован шквал 26 м/с. Далее, согласно наукастингу, порывы ветра ослабевали при подходе к центральной части Москвы. В целом днем по Москве и Московской области наземной наблюдательной сетью были зафиксированы порывы ветра 12–18 м/с, что вполне соответствует прогнозам наукастинга. По данному случаю можно сделать вывод, что прогноз наукастинга имел погрешность по территории прогноза до 70 км и до 1 ч по времени осуществления максимального порыва. Но если рассматривать прогноз в целом по региону, то градация ветра 15–20 м/с была отображена правильно. Видимо, для прогноза максимальных порывов ветра в конкретном пункте необходим учет, кроме всех приведенных выше доводов, местных локальных условий, а именно: открытость местности (на полосе аэродрома Внуково) и совпадение в одно время всех условий (сильный ливнеопасный очаг и прохождение СТНУ).

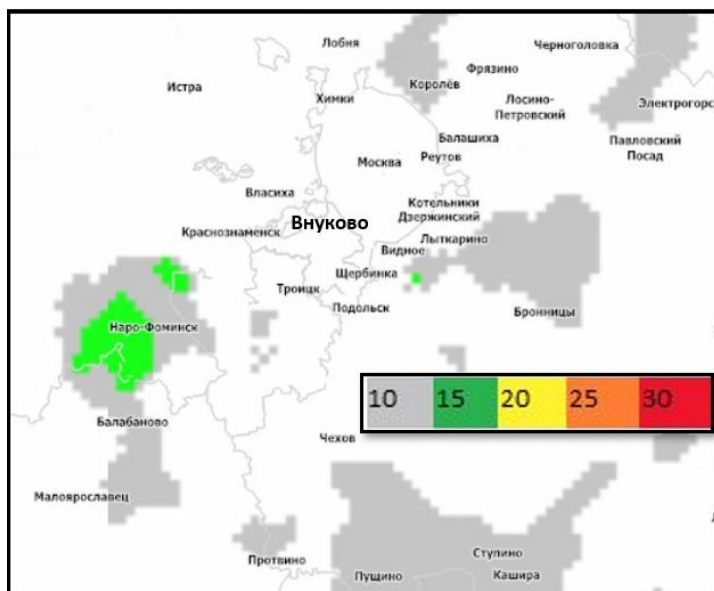


Рис. 12. Фрагмент карты наукастинга порывов ветра в 19.10 ч МСК 07.10.2023. Зеленая зона – порывы ветра зоны, двигающейся по направлению к п. Внуково, соответствующие по цветовой шкале скорости 15-20 м/с.

Fig. 12. The fragment of the wind gust map for 19:10 MSC on October 7, 2023. The green zone is wind gusts of the zone moving towards Vnukovo corresponding to the wind speed of 15-20 m/s on the color scale.

Если рассматривать модельные прогнозы с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2, COSMO-Ru6 и ICON-EUR7 порывов ветра в графическом виде на день 07.10.2023 от счета 03 ч МСК, порывы по п. Внуково до 18 м/с спрогнозированы только моделью COSMO-Ru6; прогнозы COSMO-Ru2.2 и ICON-EUR – 7–13 м/с (рис. 13). Следует вывод, что прогноз сильного ветра в переходный период также затруднителен для моделей с высоким пространственно-временным разрешением, когда и величины предикторов значительно снижены относительно летних критериев. Поэтому для разработки штормовых предупреждений о сильном ветре синоптику в оперативной работе необходимо пользоваться всеми имеющимися в наличии прогностическими инструментариями.

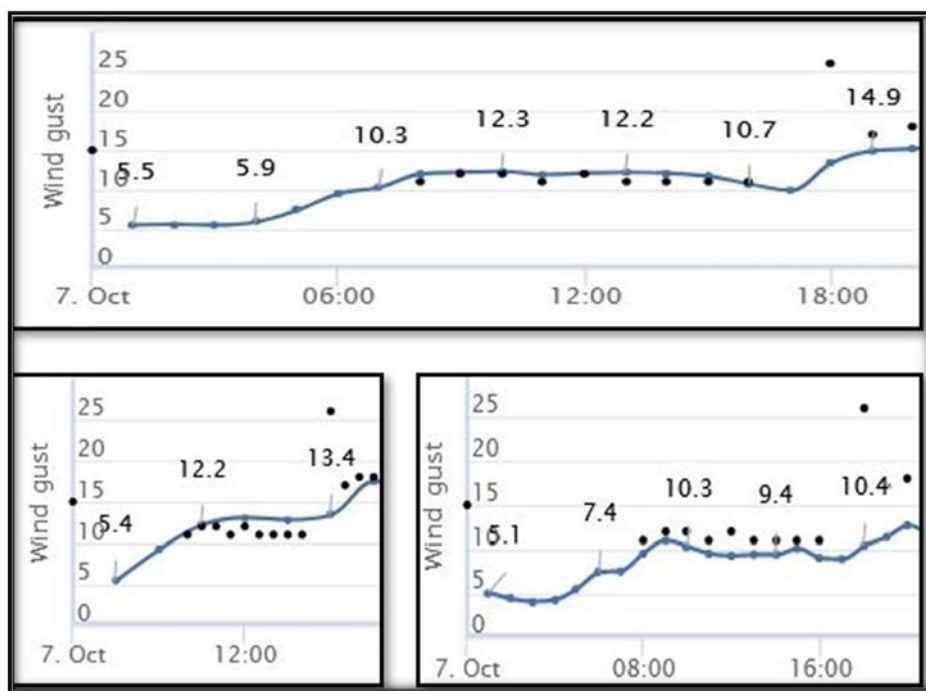


Рис. 13. Прогноз порывов ветра на день 07.10.2023 от счета 03 ч МСК: COSMO-Ru2.2 (вверху), COSMO-Ru6 (внизу слева), ICON-EUR7 (внизу справа). Синие линии – спрогнозированные порывы ветра; «жирные» точки без линий – фактические порывы.

Fig. 13. The forecast of wind gusts for the daytime on October 7, 2023 (the 03:00 MSC model run): COSMO-Ru2.2 (top), COSMO-Ru6 (bottom left), ICON-Eur7 (bottom right). The blue lines are predicted wind gusts; the bold dots without lines are observed gusts.

В целом анализ сравнения прогноза сильных порывов ветра по предлагаемому экспериментальному наукастингу, проведенный за прошедший

летне-осенний период, можно считать удачным и рекомендуемым для применения в оперативной практике после получения результатов верификации и доработки.

Наукастинг интенсивности осадков до 12 ч

Еще один вид наукастинга, предлагаемый оперативному синоптику Гидрометцентром России – это экспериментальный вариант наукастинга интенсивности осадков на базе модельного прогноза COSMO-Ru2.2 до 12 ч с использованием полей осадков по радарным данным. Технология использования модели с высоким пространственно-временным разрешением позволила увеличить срок прогноза интенсивности осадков до 12 ч. С помощью анимации отслеживается процесс в движении с видимой трансформацией зон интенсивности осадков, что дает возможность оперативному синоптику корректировать и уточнять прогнозы и консультации о неблагоприятных и опасных явлениях погоды по территории ЕТР, где есть покрытие радиолокационной сетью ДМРЛ-С.

Приведем пример консультации о комплексе неблагоприятных метеорологических явлениях, связанных с развитием конвекции, по московскому мегаполису с использованием наукастинга об интенсивности осадков с заблаговременностью до 12 ч, с помощью которого был рассчитан подход к мегаполису зоны осадков на холодном атмосферном фронте с грозами на день 18.07.2023. Утром был выпущен детализированный прогноз погоды (рис. 14): ожидался кратковременный дождь до 14 мм, местами ливень до 20 мм начиная с 12–15 ч МСК при прохождении через регион холодного атмосферного фронта с грозами.

БЮЛЕТЕНЬ ПОГОДЫ №199/д по территории г. Москва на день на период с 09.00 до 21.00 18 июля 2023 года				
Прогноз метеоусловий				
День: 09.00-21.00	Облачно с прояснениями. Кратковременный дождь, местами ливень (количество осадков 7-14 мм, местами до 20 мм). В отдельных районах гроза, град. Максимальная температура воздуха 26...28°C. Ветер юго-западный 5-10 м/с, при грозе местами порывы 15-20 м/с.			
Время (мск)	09 ⁰⁰ -12 ⁰⁰	12 ⁰⁰ -15 ⁰⁰	15 ⁰⁰ -18 ⁰⁰	18 ⁰⁰ -21 ⁰⁰
Состояние погоды				
Кол. осадков (мм)	-	0.5	7.5	12
Температура воздуха (°C)	23...25	26...28	22...24	18...20
Направление ветра	ЮЗ	ЮЗ	ЮЗ	ЮЗ
Скорость ветра (м/с)	5-8	6-9	6-9	7-10
Порывы ветра (м/с)	-	-	15	20

Рис. 14. Пример детализированного прогноза погоды по московскому мегаполису на день 18.07.2023.

Fig. 14. The example of the detailed weather forecast for the Moscow megalopolis for the daytime on July 18, 2023.

Дежурный синоптик выпустил консультацию о неблагоприятных явлениях погоды, в совокупности образующих «комплекс неблагоприятных явлений»: гроза, ливень, сильный ветер, град (рис. 15). На рис. 16 приведены карты наукастинга интенсивности осадков по Центральному федеральному округу.



Рис. 15. Пример консультации о КМЯ по московскому мегаполису на день 18.07.2023, выпущенной в 11.40 ч МСК.

Fig. 15. The example of the consultation about the complex of weather events for the Moscow megapolis for the daytime on July 18, 2023 issued at 11:40 MSC.

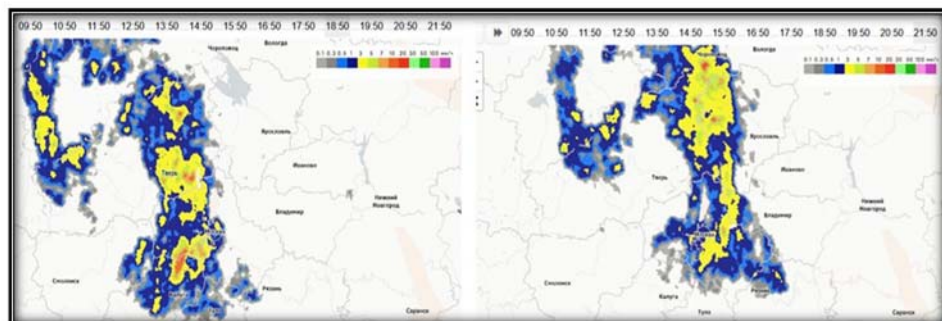


Рис. 16. Фрагменты карты наукастинга интенсивности осадков на 12 ч по ЦФО 18.07.2023 от счета 09.50 ч МСК в 18.50 ч МСК (слева) и 21.50 ч МСК (справа). Интенсивность осадков показана по цветовой шкале.

Fig. 16. The fragments of the 12-hour precipitation intensity nowcasting map for the Central Federal District at 18:50 (left) and 21:50 MSC (right) on July 18, 2023 (the 09:50 MSC model run). The precipitation intensity is shown on the color scale.

Сравнивая зоны интенсивности осадков карт наукастинга (рис. 16) и сети ДМРЛ-С (рис. 17) прежде всего по площади и конфигурации, видно, что наукастинг хорошо отразил именно центральную зону основного холодного фронта, проходившего широкой полосой в 18 ч МСК через московский регион и весь Центральный федеральный округ протяженностью с юга на север и смещением на северо-восток (рис. 18). При более детальном рассмотрении видно, что на карте наукастинга зона осадков интерпретируется одной широкой полосой, тогда как на карте

ДМРЛ-С – в виде нескольких полос различной интенсивности, локально более сильной, чем предлагает наукастинг. Кроме того, наукастинг дает некоторое запаздывание прохождения п. Москва. Надо понимать, что на зону осадков может сильно оказывать влияние сам московский мегаполис, активизируя или размывая ее в зависимости от интенсивности атмосферного фронта, времени года, суток и направления перемещения. Модель не всегда точно может спрогнозировать трансформацию зоны осадков. Однако если смотреть в целом на процесс и возможность заблаговременной разработки штормового предупреждения, предлагаемый экспериментальный наукастинг является хорошей помощью для оперативного синоптика.

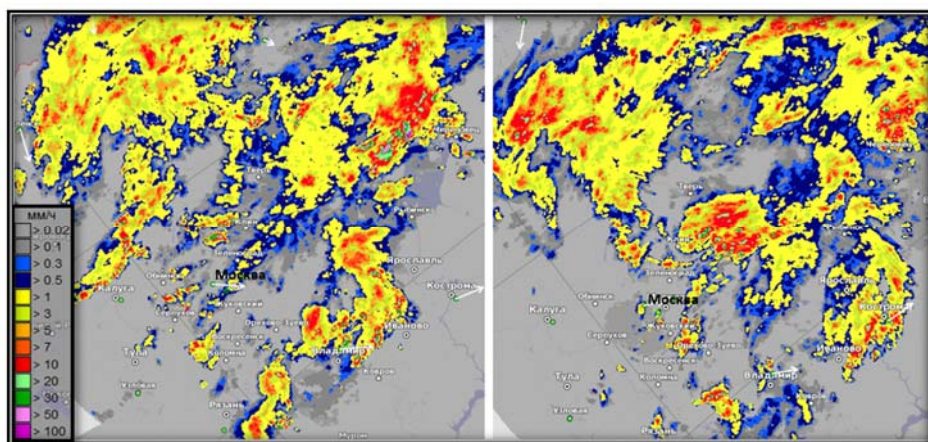


Рис. 17. Фрагменты объединенной карты интенсивности осадков сети ДМРЛ-С на сайте «Метеорад» 18.07.2023 в 18.50 ч МСК (слева) и 21.50 ч МСК (справа). Интенсивность осадков показана по цветовой шкале.

Fig. 17. The fragments of the Doppler weather radar network composite precipitation intensity map at the Meteorad website at 18:50 (left) and 21:50 MSC (right) on July 18, 2023. The precipitation intensity of is shown on the color scale.

Что касается наукастинга порывов ветра по данному случаю, также можно отметить, что по карте была видна подходящая к московскому мегаполису (на рис. 19) зона сильного ветра 15–20 м/с (зеленый цвет) с локальной областью 20–25 м/с (желтый цвет), связанная с прохождением через регион холодного атмосферного фронта. Правильность и своевременность выпуска консультации о комплексе неблагоприятных явлений погоды подтверждается фактическими данными по осадкам и порывам ветра, зафиксированным в мегаполисе (местами сильные осадки 16–23 мм за день, порывы ветра до 15–17 м/с).

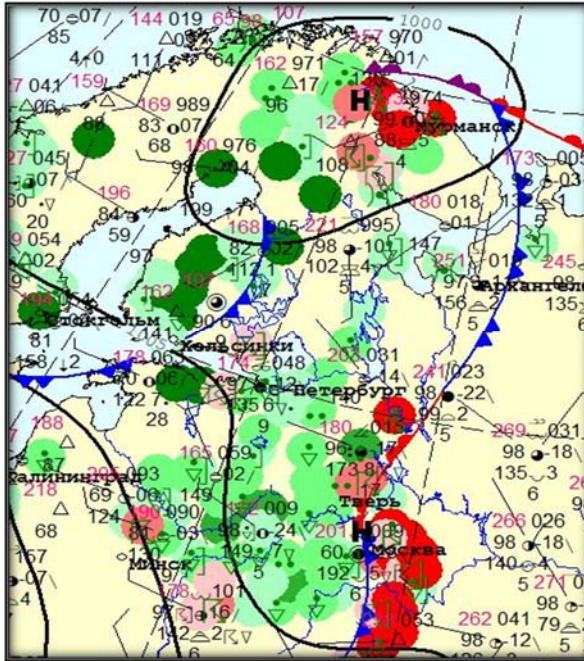


Рис. 18. Фрагмент карты погоды с фронтальным анализом за 18 ч МСК 18.07.2323 с выделенными цветом явлениями погоды: красным – грозы, зеленым – осадки.

Fig. 18. The fragment of the weather chart with frontal analysis for 18:00 MSC on July 18, 2023 with colored weather phenomena: thunderstorms are red, precipitation is green.

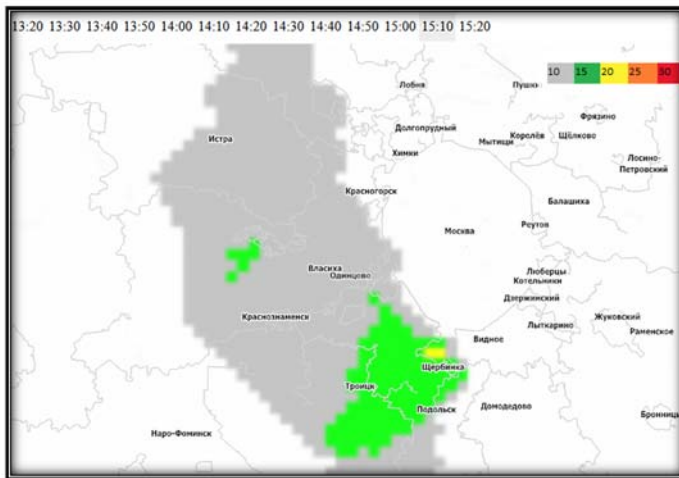


Рис. 19. Фрагмент карты наукастинга порывов ветра на 15.10 ч МСК 18.07.2023.

Fig. 19. The fragment of the wind gust nowcasting map for 15:10 MSC on July 18, 2023.

Возможности экспериментального радиолокационного мониторинга для предупреждения о возникновении конвективных штормов с сильными порывами ветра при шквалах

Радиолокационная экспериментальная диагностика мощных конвективных штормов, под которыми подразумеваются основные контрастные атмосферные фронты с активной грозовой деятельностью, осуществляемая в реальном режиме времени с периодичностью 10 минут и пространственным разрешением 0.05 градусов на основе информации сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования, дает оперативному синоптику возможность уточнить силу прогнозируемого ветра (шквала) при принятии решения о штормовом предупреждении/консультации. Диагностируются порывы ветра в градациях скорости ветра 15–33 м/с (рис. 20, левая панель), шквалов в трех градациях интенсивности (рис. 20, правая панель) и в градации опасных явлений при порывах (25 м/с и более), т. е. тремя независимыми подходами, а также максимальная скорость восходящего потока воздуха, указывающая на возможную силу опасного конвективного явления (рис. 21, правая панель).

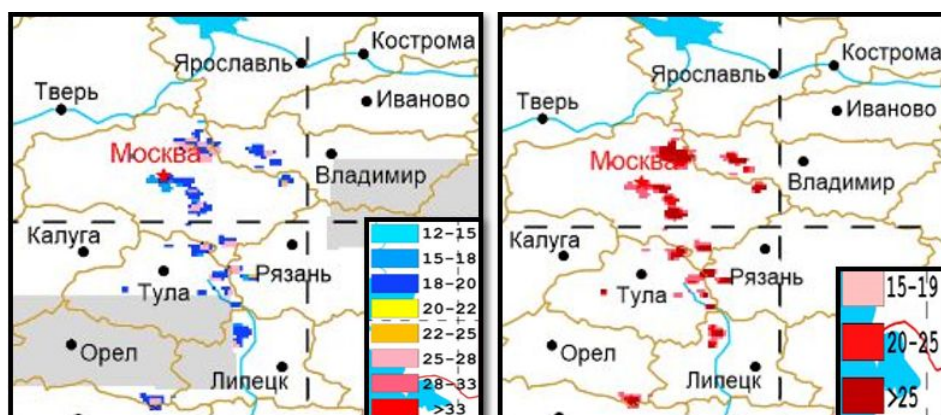


Рис. 20. Фрагменты карт в 15.40 ч МСК 18.07.2023 диагноза порывов ветра (слева – в градации скорости ветра 15–25 м/с, справа – шквалов в трех градациях интенсивности).

Fig. 20. The fragments of the wind gust diagnosis maps for 15:40 MSC on July 18, 2023 (in the 15-25 m/s gradation of wind speed (left), squalls in three gradations of intensity (right)).

Приведен пример ситуации 18.07.2023, рассмотренной выше, когда использовался экспериментальный диагноз радиолокационных данных для разработки штормовой консультации по московскому мегаполису. Карта порывов ветра правильно диагностировала порывы по московскому региону в основной градации 18–20 м/с, локально до 25 м/с, а карта опасных

порывов – до 25 м/с, что было несколько завышено (рис. 21). Карта диагноза максимальной скорости восходящего потока (20–25 м/с) правильно отражала активно выраженную конвекцию на контрастном холодном атмосферном фронте с возможностью реализации сильных конвективных явлений (ливней и шквалистых порывов ветра), что идентифицировал локалатор ДМРЛ-С «Внуково» и подтвердили данные наземной наблюдательской сети.

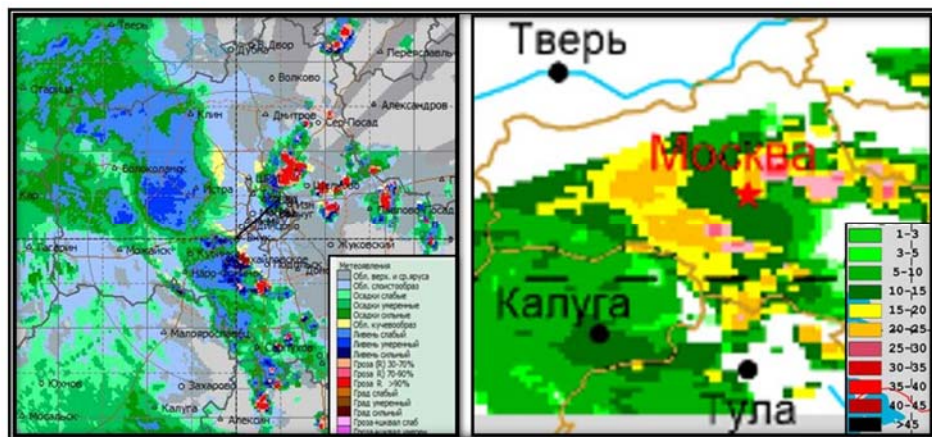


Рис. 21. Фрагменты карт в 15.10 ч МСК 18.07.2023 метеоявлений ДМРЛ-С «Внуково» (слева) и диагноза максимальной скорости восходящего потока воздуха (справа). Цветовые шкалы указывают: слева – явления, справа – максимальную конвективную скорость потока в м/с, являющуюся одним из параметров конвекции, характеризующим опасные конвективные явления.

Fig. 21. The fragments of the maps for 15:10 MSC on July 18, 2023: Vnuково Doppler radar weather events (left) and the diagnosis of maximum updraft velocity (right). The color scales indicate: weather events (left), maximum convective flow velocity (m/s) (right), which is one of the convection parameters characterizing severe convective weather events.

Выводы

1) Использование предложенных экспериментальных методов наукастинга интенсивности осадков до 12 ч и порывов ветра до 2 ч, а также технологии диагноза опасных конвективных явлений на основе данных сети ДМРЛ-С позволяет более точно показать развитие неблагоприятных и опасных явлениях погоды конвективного характера с учетом их трансформации на ближайшие часы, что улучшает прогноз этих явлений погоды ;

2) продукция моделей с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2 и COSMO-Ru6 (индексы конвекции и карты) позволяет уточнять сверхкраткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды;

3) для сверхкраткосрочного прогноза максимальных порывов ветра/шквалов в градации «опасные» необходимо учитывать наличие струйного течения нижних уровней;

4) при прогнозе конвективных явлений для обслуживаемого пункта/района необходимо учитывать зоны сильных конвективных явлений (сильных порывов ветра и осадков), визуализированных на картах численных расчетов модели COSMO-Ru2.2, в том числе в соседних областях;

5) при использовании наукастинга порывов ветра на период до 2 ч анализировать максимальные спрогнозированные порывы ветра в зоне радиусом до 50 км, не проецируя результат на конкретную точку местности;

6) при прогнозе сильных осадков, особенно в летний период, используя наукастинг до 12 ч, учитывать возможную активизацию или ослабление осадкообразующей зоны при подходе к мегаполисам.

Список литературы

1. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 704 с.

2. Инструкция для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике. М.: Росгидромет, 2016. 31 с.

3. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С ("ГИМЕТ-2010"). М.: Росгидромет, 2011. 108 с.

4. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. СПб.: Изд-во РГГМИ, 1996. 306 с.

5. Методические Указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М.: Росгидромет, 2019. 126 с.

6. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды. РД 52.27.723-2009. 22 с.

7. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2019. 65 с.

8. *Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Голубев А.Д.* Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 48-57.

9. *Васильев П.П., Васильева Е.Л.* Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 118-133.

10. *Дмитриева Т.Г, Песков Б.Е.* Численный прогноз с мезосиноптическим уточнением двух случаев особо сильных шквалов на европейской части России летом 2010 г. // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С.18-30.

References

1. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Spast' I. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 704 p. [in Russ.].

2. Instrukciya dlya operativno-prognosticheskikh i aviametpodrazdelenij Rosgidrometa po ispol'zovaniyu informacii DMRL v sinopticheskoy praktike. Moscow, Rosgidromet, 2016, 31 p. [in Russ.].

3. Programmnoe obespechenie vtorichnoj obrabotki informacii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S ("GIMET-2010"). Moscow, Rosgidromet, 2011, 108 p. [in Russ.].

4. *Rusin I.N., Tarakanov G.G.* Sverhkratkosrochnye prognozy pogody. Saint Petersburg, Izd-vo RGGMI, 1996, 306 p. [in Russ.].

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

6. Bazovye trebovaniya k tekhnologii podgotovki kratkosrochnyh prognozov pogody. RD 52.27.723-2009, 22 p. [in Russ.].

7. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. RD 52.27.724-2019, 65 p. [in Russ.].

8. *Vasiliev A.A., Vil'fand R.M., Golubev A.D.* The joint use of mesoscale numerical and conceptual models in operational forecast of hazard weather phenomena. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 48-57 [in Russ.].

9. *Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L.* Sistema statisticheskoy interpretacii vyhodnoj produkcii gidrodinamicheskikh modelej dlya srednesrochnogo prognoza pogody. 70 let Gidrometcentru Rossii. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1999, pp. 118-133 [in Russ.].

10. *Dmitrieva T.G., Peskov B.E.* Numerical forecast with the mesosynoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July 29, 2010). *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 71-79. DOI: 10.3103/S1068373913020027.

*Поступила 10.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.*

*Submitted 10.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-72-85>

УДК 551.465

Оценка точности воспроизведения метеорологических характеристик по модели WRF для акватории Каспийского моря

В.В. Фомин^{1,2}, Т.Ю. Выручалкина^{1,3}

¹ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, г. Москва, Россия;

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

*³ Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Россия
vladimirfomin@live.com*

В работе представлены оценки точности воспроизведения метеорологических характеристик, полученных по негидростатической атмосферной модели WRF, адаптированной к акватории Каспийского моря с пространственным разрешением 6 км. Проведены расчеты метеорологических характеристик с различными параметризациями физических процессов, доступных в модели WRF. Выполнена верификация модели по данным с прибрежных метеорологических станций за 2021 год. Исследование показало, что наилучшие результаты в воспроизведении метеорологических характеристик достигаются с использованием в качестве параметризации микрофизических процессов – Thompson graupel scheme, параметризации конвекции – Tiedtke, параметризаций длинноволновой и коротковолновой радиаций – RRTMG, параметризации пограничного слоя – MYJ и параметризации приземного слоя – Noah Land-Surface Model. Анализ результатов расчетов в сравнении с данными наблюдений на метеорологических станциях показал, что модель корректно воспроизводит модуль и направление скорости ветра, температуру воздуха, давление на уровне моря. Получено, что модель корректно воспроизводит не только средние характеристики скорости ветра, но и его наибольшие значения, что может быть особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря.

Ключевые слова: Каспийское море, региональная модель атмосферной циркуляции, численные методы

Assessing the accuracy of simulation of meteorological characteristics with the WRF model for the Caspian Sea

V.V. Fomin^{1,2}, T.Y. Vyruchalkina^{1,3}

¹ N.N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, Russia;

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

*³ Water problems institute of Russian academy of sciences, Moscow, Russia
vladimirfomin@live.com*

The paper presents the accuracy estimates for the simulation of meteorological characteristics obtained from the WRF model with a spatial resolution of 6 km adapted for the Caspian Sea. It was used to simulate meteorological characteristics using various parameterizations of microphysics processes available in the WRF model. The model was verified using data from coastal weather stations for 2021. It was found that the best results in reproducing meteorological characteristics are achieved using the Thompson graupel scheme as a parameterization of physical processes, the Tiedtke scheme as a parameterization of convection, the RRTMG scheme as a parameterization of long-wave and short-wave radiation, the MYJ scheme as a boundary layer parameterization, and the Noah Land-Surface Model as a surface layer parameterization. An analysis of the simulation results versus observational data from weather stations showed that the model correctly reproduces the modulus and direction of wind speed, air temperature, and sea-level pressure. It was found that the model correctly reproduces not only the average characteristics of wind speed, but also its extreme values, which is especially important when modeling storm surges in the Caspian Sea.

Keywords: Caspian Sea, regional nonhydrostatic atmosphere circulation model, numerical methods

Введение

Решение актуальных задач, направленных на исследование морской циркуляции, планирование и проведение морских операций, предупреждение о чрезвычайных ситуациях, требует привлечения наиболее современных методов исследования гидрометеорологических процессов. К ним в том числе относятся и численные методы моделирования гидрометеорологических характеристик. Развитие вычислительной техники позволяет использовать наиболее полные численные модели атмосферной циркуляции, реализованные с высоким пространственным разрешением и позволяющие рассчитывать детализированные поля метеорологических характеристик.

В настоящей работе рассматривается реализация региональной модели атмосферной циркуляции WRF [19] для акватории Каспийского моря. Исследования атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря проводятся различными коллективами. Так, в [4] исследуется возможность моделирования осадков с использованием модели WRF различного пространственного разрешения (от 30 до 3.3 км). В [9] представлены результаты моделирования полей ветра над акваторией Каспийского моря с пространственным разрешением 10 км. В [8] анализируется влияние параметризаций микрофизических процессов, доступных в модели WRF, на воспроизведение такого погодного явления, как «lake effect snow», при котором вода, испаряющаяся в холодное время года с поверхности моря или озера, превращается в облака и выпадает в виде снега. В [3] представлена апробация системы оперативного диагноза и прогноза (СОДиП) для краткосрочного прогноза гидрометеорологических характеристик, в которой для прогноза метеорологических характеристик используется модель WRF с пространственным разрешением 7 км. Модель

WRF используется также и в региональных системах совместного моделирования океан – атмосфера [5]. В [16] результаты расчетов по модели WRF используются для воспроизведения морских течений в южном Каспии при бризовых ветрах.

Таким образом, можно отметить, что модель WRF может использоваться как для изучения физических процессов над акваторией Каспийского моря, так и при решении практических задач по созданию реанализа метеорологических характеристик или для краткосрочных прогнозов метеорологических характеристик. Атмосферное воздействие, рассчитываемое по модели WRF или аналогичной ей региональной негидростатической модели COSMO, может быть использовано для расчета потоков импульса, тепла и пресной воды при воспроизведении параметров морской циркуляции [1, 3]. В [2] показано, что использование данных атмосферного воздействия, рассчитываемых по региональным негидростатическим моделям атмосферной циркуляции, позволяет повысить точность расчета гидрологических характеристик, в том числе и в период прохождения штормовых ситуаций.

Целью настоящей работы является адаптация модели WRF для акватории Каспийского моря с высоким пространственным разрешением. Для решения этой задачи проведена адаптация модели WRF для акватории Каспийского моря, выполнены расчеты метеорологических характеристик с использованием различных параметризаций физических процессов, доступных в модели WRF. Выполнен анализ чувствительности результатов расчетов при использовании различных параметризаций физических процессов, а также оценка точности на основе сравнения результатов измерений с данными с прибрежных гидрологических станций.

Материалы и методы исследования

Модель WRF (Weather Research and Forecasting Model) [19] для акватории Каспийского моря была адаптирована с пространственным разрешением 6 км в проекции Ламберта. Количество точек по долготе и широте составило 199×399. По вертикали задавалось 42 вертикальных горизонта. Расчетная область модели представлена на рис. 1. Сеточная область модели превышает акваторию Каспийского моря в его морских границах на 250–300 км во всех направлениях. Это сделано с целью уменьшения влияния граничных условий на атмосферные характеристики над морской поверхностью и в прибрежной зоне.

В качестве входной гидрометеорологической информации, необходимой для формирования начальных и граничных условий, были использованы данные глобального реанализа ERA5 [10], предоставляемые с пространственным разрешением 0.25×0.25°. Данные о подстилающей поверхности взяты из архива MODIS с пространственным разрешением 2'.

Верификация модели проводилась по данным прибрежных метеорологических станций, расположение которых представлено на рис. 1. Верификация проводилась для периода с 1 января по 31 декабря 2021 г. для температуры воздуха, скорости ветра, его зональной и меридиональной компонент и для давления над уровнем моря. С учетом пропусков в данных верификация проводилась для данных с временной дискретностью в 12 часов.

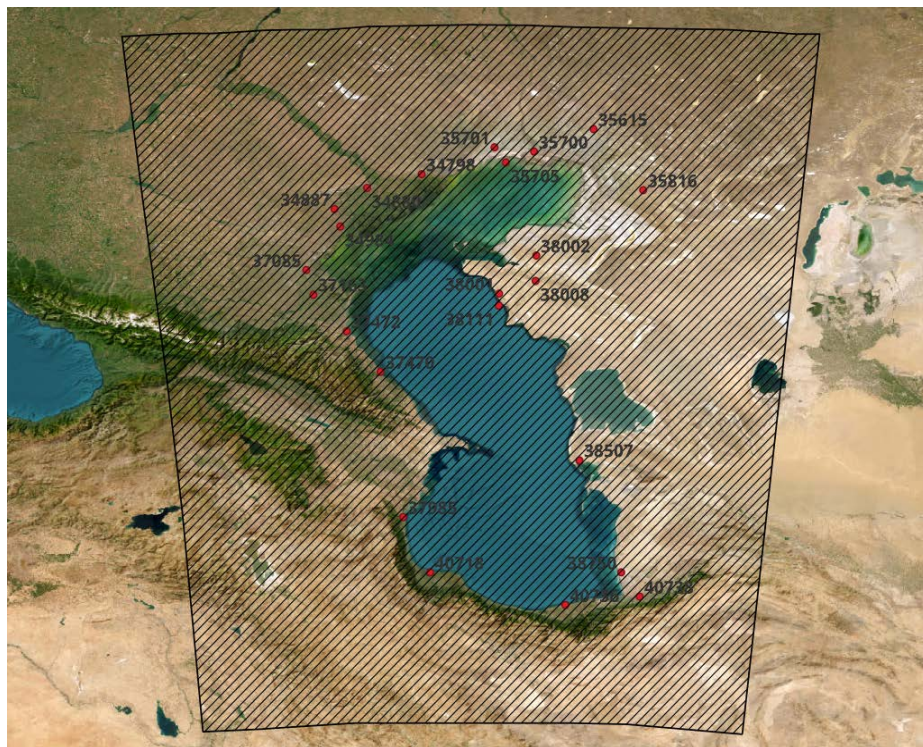


Рис. 1. Область моделирования по модели WRF и расположение метеостанций, выбранных для проведения верификации по модели WRF.
Fig. 1. WRF model area and location of weather stations selected for WRF model verification.

Для оценки точности воспроизведения метеорологических характеристик рассчитывались среднеквадратичное отклонение (RMSE) и коэффициент корреляции (R_c).

В рамках исследования были рассмотрены различные параметризации с целью определения оптимальной конфигурации модели WRF. Выбор параметризаций был основан на собственном опыте авторов работы [3], а также на основе результатов анализа работ [4, 8, 9]. В табл. 1 представлены три выбранные конфигурации модели WRF.

Таблица 1. Варианты конфигурации модели WRF**Table 1.** WRF model configuration

Тип параметризации	E01	E02	E03
Параметризация микрофизических процессов	Thompson graupel scheme [21]	Lin scheme [15]	WSM 6 class [11]
Параметризация конвекции	Tiedtke [22]	Kain-Fritsch Eta [7]	Kain-Fritsch Eta [7]
Параметризация длинноволновой радиации	RRTMG [13]	RRTM [17]	RRTM [17]
Параметризация коротковолновой радиации	RRTMG [13]	Goddard [6]	Goddard [6]
Параметризация пограничного слоя	MYJ [14]	MRF Hong and Pan [12]	MYNN 2.5 level TKE scheme [18]
Параметризация приземного слоя	Noah Land-Surface Model [20]	Noah Land-Surface Model [20]	Noah Land-Surface Model [20]

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены средние по всем станциям значения коэффициента корреляции и среднеквадратичной ошибки расчетов параметров для трех выбранных конфигураций модели WRF (эксперименты E01, E02, E03).

Таблица 2. Средние значения коэффициента корреляции (R_c) и среднеквадратичной ошибки (RMSE) для модуля скорости ветра (SPD), его зональной (U10) и меридиональной компонент (V10), температуры воздуха (TEMP) и давления (SLP) для экспериментов E01, E02, E03

Table 2. Mean values of correlation coefficient (R_c) and root mean square error (RMSE) for wind speed (SPD), its zonal (U10) and meridional components (V10), air temperature (TEMP) and pressure (SLP) for experiments E01, E02, E03

Эксперимент	SPD		TEMP		Slp		U10		V10	
	R_c	RMSE	R_c	RMSE	R_c	RMSE	R_c	RMSE	R_c	RMSE
E01	0.78	1.05	0.98	1.42	0.99	0.88	0.87	1.20	0.79	1.19
E02	0.77	1.06	0.98	1.43	0.99	0.88	0.86	1.21	0.78	1.22
E03	0.76	1.09	0.98	1.43	0.99	0.87	0.86	1.23	0.76	1.28

Как видно в табл. 2, точность результатов расчетов при использовании каждой из выбранных параметризаций незначительно отличается. При этом расчеты метеорологических полей по эксперименту E01 показали

более точные результаты по всем параметрам. В среднем коэффициент корреляции для скорости ветра, зональной и меридиональной его компонент на 0.01 выше по отношению к эксперименту E02 и на 0.02–0.03 выше по отношению к эксперименту E03. Коэффициент корреляции при воспроизведении давления на уровне моря и температуры воздуха одинаков для всех трех экспериментов. Значения среднеквадратичной ошибки на 0.01–0.03 ниже в эксперименте E01 по отношению к эксперименту E02 и на 0.01–0.09 ниже по отношению к эксперименту E03.

Далее рассмотрим точность воспроизведения метеорологических характеристик на отдельных станциях, рассчитанных по модели WRF в конфигурации E01.

На рис. 2–3 в качестве примеров приведены реализации температуры воздуха, модуля скорости ветра, зональной и меридиональной компонент скоростей ветра, давления над уровнем моря, полученные по результатам расчетов по модели WRF для точек расположения метеостанций, а также полученные по данным измерений на этих станциях.

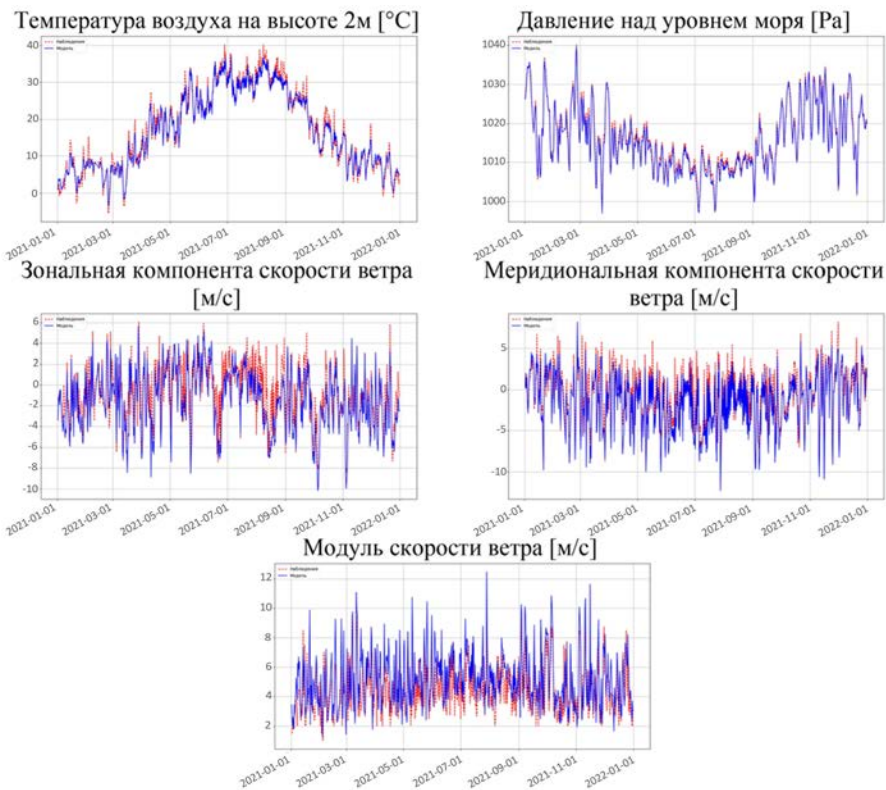


Рис. 2. Сравнение реализаций метеорологических характеристик по результатам моделирования по модели WRF и по данным измерений на станции 38507.

Fig. 2. Comparison of realizations of meteorological characteristics based on the results of WRF model simulations and on data of measurements at station 38507.

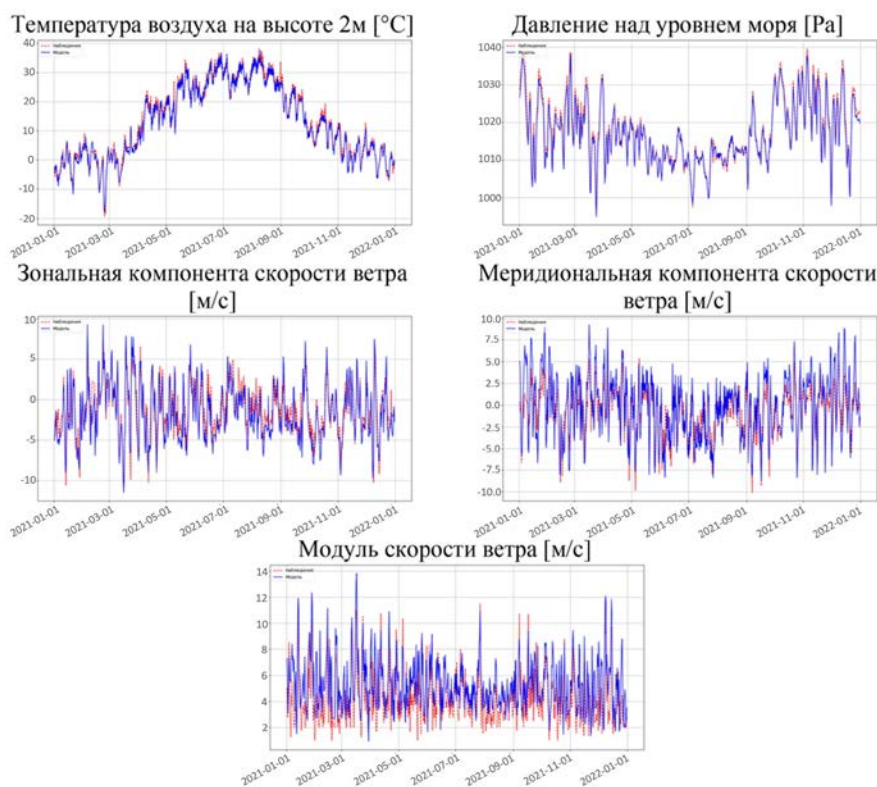


Рис. 3. Сравнение реализаций метеорологических характеристик по результатам моделирования по модели WRF и по данным измерений на станции 38008.

Fig. 3. Comparison of realizations of meteorological characteristics based on the results of WRF model simulations and on data of measurements at station 38008.

В табл. 3 представлены значения коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения результатов расчетов от станционных данных.

Результаты расчетов, представленные в табл. 3 и на рис. 2–3 показывают хорошую точность в воспроизведении метеорологических характеристик и подтверждают возможность воспроизведения моделью реальной атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря. Результаты верификации показывают, коэффициент корреляции для температуры воздуха изменяется от 0.96 до 0.99, в среднем составляет 0.98. Здесь необходимо отметить, что коэффициент корреляции рассчитывался с учетом годового хода. Среднеквадратичная ошибка в результатах расчета температуры воздуха изменяется от 1.22 до 1.71 °С и в среднем составляет 1.42 °С. Анализ графиков изменения температуры воздуха по результатам

моделирования и данным измерений показывает, что модель качественно воспроизводит изменчивость температуры над акваторией Каспийского моря.

Таблица 3. Значения коэффициента корреляции (Rc) и среднеквадратичной ошибки для модуля скорости ветра (SPD), его зональной (U10) и меридиональной компонент (V10), температуры воздуха (TEMP) и давления на уровне моря (SLP), полученных по результатам расчетов и данным измерений

Table 3. Correlation coefficient (Rc) and root mean square error for wind speed (SPD), its zonal (U10) and meridional components (V10), air temperature (TEMP) and sea level pressure (SLP) obtained from simulations and measurement data

№ станции	SPD		TEMP		Slp		U10		V10	
	Rc	RMSE	Rc	RMSE	Rc	RMSE	Rc	RMSE	Rc	RMSE
38008	0.79	1.13	0.99	1.42	0.99	1.09	0.90	1.24	0.85	1.42
38002	0.76	1.13	0.98	1.67	0.99	1.06	0.91	1.24	0.82	1.23
38507	0.77	1.09	0.99	1.39	0.99	0.87	0.84	1.26	0.90	1.21
38111	0.87	1.16	0.98	1.71	0.99	0.78	0.93	1.41	0.94	1.34
35816	0.89	0.96	0.98	1.59	0.99	0.97	0.94	1.11	0.92	1.11
35615	0.91	1.03	0.99	1.53	0.99	0.71	0.95	1.30	0.90	1.17
37472	0.85	1.10	0.99	1.22	0.99	0.78	0.91	1.34	0.91	1.17
34887	0.73	1.07	0.97	1.46	0.99	0.85	0.93	1.13	0.83	1.08
37985	0.56	0.88	0.98	1.23	0.99	0.78	0.63	0.99	0.78	1.09
37085	0.80	1.15	0.98	1.55	0.99	0.90	0.92	1.23	0.73	1.13
37163	0.90	1.04	0.98	1.35	0.99	0.83	0.91	1.25	0.77	1.09
35701	0.87	0.91	0.98	1.49	0.99	0.77	0.97	0.95	0.89	1.13
34798	0.85	1.05	0.99	1.32	0.99	0.96	0.94	1.08	0.85	1.14
38750	0.74	0.98	0.98	1.35	0.99	0.99	0.81	1.21	0.63	1.10
35700	0.86	1.08	0.99	1.30	0.99	0.79	0.95	1.09	0.90	1.16
35705	0.83	1.19	0.98	1.51	0.99	0.92	0.92	1.45	0.84	1.42
40718	0.75	0.92	0.98	1.25	0.99	0.86	0.74	1.05	0.79	0.99
38001	0.79	1.25	0.98	1.54	0.99	0.94	0.84	1.40	0.82	1.40
34984	0.89	0.89	0.99	1.22	0.99	0.73	0.96	1.02	0.76	1.16
34880	0.81	0.91	0.97	1.35	0.99	0.77	0.91	1.16	0.59	1.27
37470	0.72	1.09	0.96	1.43	0.99	0.90	0.80	1.07	0.86	1.30
40738	0.58	1.10	0.96	1.62	0.99	1.01	0.74	1.38	0.58	1.09
40736	0.49	1.01	0.98	1.27	0.99	1.08	0.62	1.25	0.39	1.29
Мин	0.49	0.88	0.96	1.22	0.99	0.71	0.62	0.95	0.39	0.99
Среднее	0.78	1.05	0.98	1.42	0.99	0.88	0.87	1.20	0.79	1.19
Макс	0.91	1.25	0.99	1.71	0.99	1.09	0.97	1.45	0.94	1.42

Коэффициент корреляции для модуля скорости ветра для представленных станций изменяется от 0.49 до 0.91 и в среднем составляет 0.78, что является достаточно высоким показателем. Среднеквадратичная ошибка изменяется от 0.88 м/с до 1.25 м/с и в среднем составляет 1.05 м/с. Анализ графиков показывает, что результаты моделирования соответствуют данным наблюдений и модель хорошо воспроизводит как средние

характеристики модуля скорости ветра, так и значения скорости ветра в периоды его интенсификации и возникновения штормовых ситуаций, что может быть особенно важно при моделировании ветровых нагонов и для воспроизведения дрейфовой компоненты скорости течений.

Коэффициент корреляции для зональной компоненты скорости ветра изменяется от 0.62 до 0.97 и в среднем составляет 0.87. Коэффициент корреляции для меридиональной компоненты скорости ветра изменяется от 0.39 до 0.94 и в среднем составляет 0.79. Среднеквадратичная ошибка в среднем по всем станциям составляет 1.2 м/с и 1.19 м/с для зональной и меридиональной компонент соответственно. Отметим, что минимальное значение коэффициента корреляции для модуля скорости ветра и его меридиональной компоненты получено для станции 40736, расположенной в южной части Каспийского моря. Вероятнее всего, указанное занижение может быть вызвано двумя причинами: гористой местностью в южной части Каспийского моря и локальным расположением станции, при котором модель WRF недостаточно точно учитывает орографию в районе ее расположения. Также заниженные значения могут быть вызваны экранированием станции для отдельных направлений ветра с учетом ее расположения. Учитывая, что на остальных станциях наблюдаются высокие значения коэффициента корреляции и незначительные значения среднеквадратичной ошибки, можно говорить, что модель корректно воспроизводит скорость и направление ветра в целом по бассейну Каспийского моря.

Анализ приведенных графиков для компонент скорости ветра также показывает соответствие результатов измерений с данными моделирования. Это говорит о том, что корректно воспроизводится не только модуль скорости ветра, но также и его направление. Анализируя результаты верификации по характеристике давления над уровнем моря, необходимо отметить, что давление является интегральной характеристикой и воспроизводится всегда достаточно успешно. Результаты верификации показывают, коэффициент корреляции составляет 0.99. Среднеквадратичная ошибка изменяется от 0.71 до 1.09 гПа. Визуальный анализ графиков сравнения также показывает высокое соответствие результатов моделирования с данными наблюдений.

Таким образом, по результатам комплексного сравнения данных измерений с результатами моделирования метеорологических характеристик по модели WRF с горизонтальным разрешением 6 км необходимо отметить хорошее соответствие результатов моделирования с данными измерений. Анализ модуля и направления скорости ветра показал, что модель хорошо воспроизводит не только средние характеристики скорости ветра, но и его наибольшие значения, что особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря.

С использованием модели WRF в конфигурации E01 были проведены расчеты атмосферных характеристик с 1970 по 2021 год. На рис. 4–5

представлены примеры результатов расчетов скорости ветра на акватории Каспийского моря для 1971 и 2021 гг., а также температуры воздуха на высоте 2 м. На основе полученных результатов планируется создание базы данных метеорологических характеристик Каспийского моря. Она будет использоваться в дальнейших работах для комплексного исследования гидрометеорологических процессов на акватории Каспийского моря.

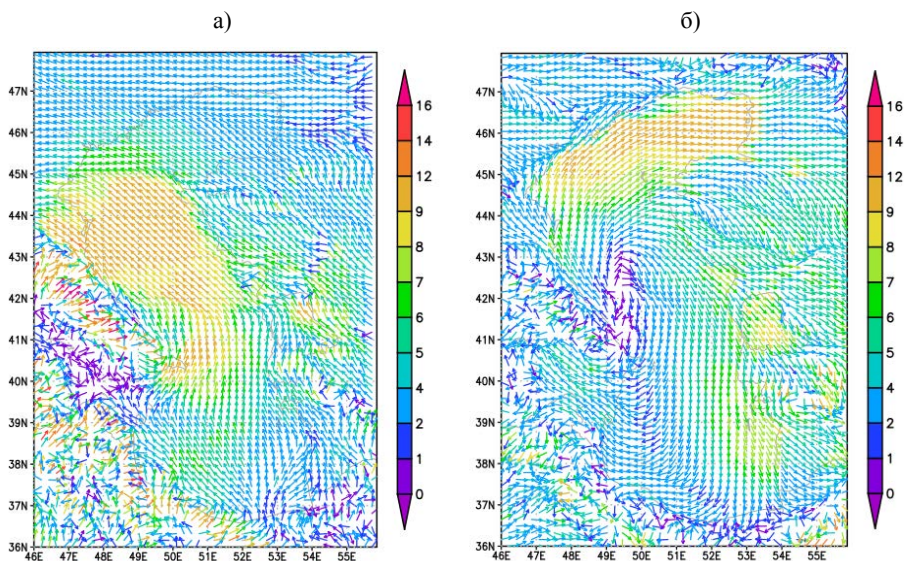


Рис. 4. Скорость и направление ветра на высоте 10 м: 05 ч 11 марта 1971 г. (а); 17 ч 8 июня 2021 г. (б).

Fig. 4. Wind speed and direction at 10 m height: 05 h 11 March 1971 (а); 17 h 8 June 2021 (б).

Выводы

В работе представлена реализация модели WRF для акватории Каспийского моря с пространственным разрешением 6 км. В качестве входной метеорологической информации используются данные глобального реанализа ERA5.

Рассмотрены различные конфигурации модели. Получено, что с использованием в качестве параметризации микрофизических процессов – Thompson graupel scheme, параметризации конвекции – Tiedtke, параметризаций длинноволновой и коротковолновой радиаций – RRTMG, параметризации пограничного слоя – MYJ, параметризации приземного слоя – Noah Land-Surface Model наблюдаются наилучшие результаты в воспроизведении метеорологических характеристик. Оценки точности

получены по результатам сравнения данных моделирования с данными наблюдений на прибрежных метеорологических станциях.

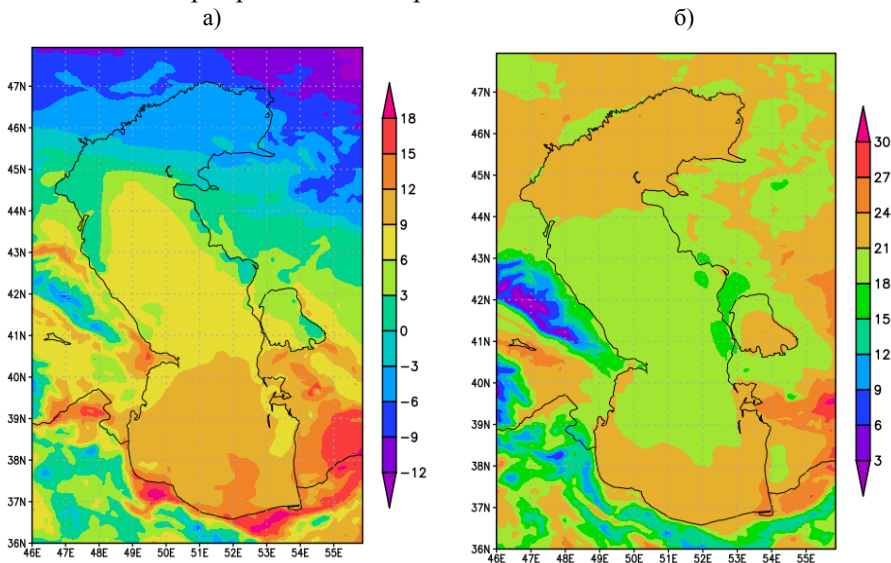


Рис. 5. Температура воздуха на высоте 2 м: 05 ч 11 марта 1971 г. (а); 17 ч 8 июня 2021 г. (б).

Fig. 5. Air temperature at 2 m height: 05 h 11 March 1971 (а); 17 h 8 June 2021 (б).

По результатам комплексного сравнения данных измерений с результатами моделирования метеорологических характеристик по модели WRF с горизонтальным разрешением 6 км получено хорошее соответствие результатов моделирования с данными измерений. Анализ модуля и направления скорости ветра показал, что модель хорошо воспроизводит не только средние характеристики скорости ветра, но и его наибольшие значения, что особенно важно при моделировании штормовых нагонов и сгонов на акватории Каспийского моря. При этом отмечено, что несколько худшие результаты наблюдаются для станций, расположенных в южной части Каспийского моря, что вероятнее всего вызвано двумя причинами: гористой местностью в южной части Каспийского моря и расположением станций, при котором модель WRF недостаточно точно учитывает орографию местности. Для более точного воспроизведения локальных особенностей полей ветра в указанных регионах требуется реализация модели WRF более высокого пространственного разрешения.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 22-27-00800.

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No22-27-00800.

Список литературы

1. *Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л.* Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 10. С. 53-59.

2. *Фомин В.В., Дианский Н.А.* Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 12. С. 69-80.

3. *Фомин В.В., Дианский Н.А., Коршенко Е.А., Выручалкина Т.Ю.* Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических характеристик Каспийского моря и оценка точности прогнозов по данным натурных измерений // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 9. С. 49-64.

4. *Шестакова А.А., Торопов П.А.* Моделирование экстремальных осадков зимнего периода для южного побережья Каспийского моря // *Вестник Московского Университета. Серия 5. География*. 2019. № 6. С. 51-59.

5. *Bruneau N., Toumi R.* A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea // *Ocean Modelling*. 2016. Vol. 107. P. 97-111. DOI: 10.1016/j.ocemod.2016.10.006

6. *Chou M.-D., Suarez M.J.* An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models // *NASA Techn. Memo.* 104606, vol. 3. 1994. 85 p.

7. *Fritsch J.M., Chappel C.F.* Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization // *J. Atmos. Sci.* 1980. Vol. 37, no.8. P. 1722-1733. DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2

8. *Ghanaian P.* Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian Sea lake-effect snow // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2021. Vol. 94. P. 101219. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2021.101219.

9. *Ghader S., Namin M., Chegini F., Bohluly A.* Hindcast of Surface Wind Field Over the Caspian Sea Using WRF Model // *The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS)*. 2014. P. 40-43.

10. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q J R Meteorol Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

11. *Hong S., Lim J-O J.* The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // *J. Korean Met. Society*. 2006. Vol. 42. P. 129-151.

12. *Hong S-Y., Pan H-L.* Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model // *Mon. Wea. Rev.* 1996. 124. P. 2322-2339. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2

13. *Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by longlived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2008. Vol. 113. P. D13103. DOI: 10.1029/2008JD009944

14. *Janjic Z.I.* The step-mountain coordinate: physical package // *Mon. Wea. Rev.* 1990. Vol. 118, no.7. P. 1429-1443. DOI: 10.1175/1520-0493(1990)118<1429:TSMCPP>2.0.CO;2

15. *Lin Y.-L., Farley R.D. and Orville H.D.* Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // *J. Clim. Appl. Meteor.* 1983. Vol. 22, no. 6. P. 1065-1092. DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2

16. *Masoud M., Pawlowicz R.* Currents generated by the sea breeze in the southern Caspian Sea // *Ocean Sci.* 2022. Vol. 18. P. 675-692. DOI: 10.5194/os-18-675-2022.

17. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102 (D14). P. 16663-16682. DOI: 10.1029/97JD00237.

19. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., ... Powers J.G.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // No. NCAR/TN-475+STR. University Corporation for Atmospheric Research. 2008. DOI:10.5065/D68S4MVH.

20. *Sridhar V., Elliot R.L., Chen F. and Brotzge J.D.* Validation of the NOAA-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. D20. P. 4418. DOI:10.1029/2001JD001306.

21. *Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // *Mon. Wea. Rev.* 2004. Vol. 132, no.2. P. 519-542. DOI: 10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2

22. *Zhang C., Wang Y.* Why is the simulated climatology of tropical cyclones so sensitive to the choice of cumulus parameterization scheme in the WRF model // *Clim. Dyn.* 2018. Vol. 51. P. 3613-3633. DOI: 10.1007/s00382-018-4099-1

18. *Nakanishi M., Niino H.* Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer // *J. Meteor. Soc. Japan.* 2009. Vol. 87. P. 895-912. DOI: 10.2151/jmsj.87.895

References

1. *Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L.* Statistical characteristics and modelling of storm surges in the North Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 664-669. DOI: 10.3103/S1068373918100059.

2. *Fomin V.V., Diansky N.A.* Simulation of extreme surges in the Taganrog Bay with the atmosphere and ocean circulation models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 12, pp. 843-851. DOI: 10.3103/S1068373918120051.

3. *Fomin V.V., Diansky N.A., Korshenko E.A., Vyruchalkina T.Y.* The marine hindcast and forecast system for diagnosis and prediction of hydrometeorological characteristics of the Caspian Sea and forecast verification based on field measurements. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 9, pp. 639-649. DOI: 10.3103/S1068373920090058.

4. *Shestakova A.A., Toropov P.A.* Modeling of extreme winter precipitation for the southern coast of the Caspian Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2019, no. 6, pp. 51-59 [in Russ.].

5. *Bruneau N., Toumi R.* A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea. *Ocean Modelling.*, 2016, vol. 107, pp. 97-111. DOI: 10.1016/j.ocemod.2016.10.006

6. *Chou M.-D., Suarez M.J.* An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *NASA Techn. Memo. 104606*, vol. 3. 1994. 85 p.

7. *Fritsch J.M., Chappel C.F.* Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1980, vol. 37, no. 8, pp. 1722-1733. DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2

8. Ghanaian P. Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian Sea lake-effect snow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2021, vol. 94, pp. 101219. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2021.101219.
9. Ghader S., Namin M., Chegini F., Bohluly A. Hindcast of Surface Wind Field Over the Caspian Sea Using WRF Model. The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS). 2014, pp. 40-43.
10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. *Q J R Meteorol Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
11. Hong S., Lim J-O J. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Met. Society*, 2006, vol. 42, pp. 129-151.
12. Hong S-Y., Pan H-L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model // *Mon. Wea. Rev.* 1996. 124. P. 2322–2339. DOI: 10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2
13. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by longlived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 2008, vol. 113, P. D13103. DOI: 10.1029/2008JD009944
14. Janjic Z.I. The step-mountain coordinate: physical package. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, vol. 118, no.7, pp.1429-1443. DOI: 10.1175/1520-0493(1990)118<1429:TSMCPP>2.0.CO;2
15. Lin Y.-L., Farley R.D. and Orville H.D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 1983, vol. 22, no. 6, pp. 1065-1092. DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
16. Masoud M., Pawlowicz R. Currents generated by the sea breeze in the southern Caspian Sea. *Ocean Sci.*, 2022, vol. 18, pp. 675-692. DOI: 10.5194/os-18-675-2022.
17. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave. *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102 (D14), pp. 16663-16682. DOI: 10.1029/97JD00237.
18. Nakanishi M., Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 2009, vol. 87, pp. 895-912. DOI: 10.2151/jmsj.87.895
19. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., ... Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. No. NCAR/TN-475+STR. University Corporation for Atmospheric Research. 2008. DOI:10.5065/D68S4MVH
20. Sridhar V., Elliot R.L., Chen F., Brotzge J.D. Validation of the NOAA-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma. *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, no. D20, pp. 4418. DOI:10.1029/2001JD001306.
21. Thompson G., Rasmussen R.M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, vol. 132, no. 2, pp. 519-542. DOI: 10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFOWPU>2.0.CO;2
22. Zhang C., Wang Y. Why is the simulated climatology of tropical cyclones so sensitive to the choice of cumulus parameterization scheme in the WRF model. *Clim. Dyn.*, 2018, vol. 51, pp. 3613-3633. DOI: 10.1007/s00382-018-4099-1

Поступила 04.08.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;

принята в печать 12.12.2023.

Submitted 04.08.2023; approved after reviewing 23.11.2023;

accepted for publication 12.12.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-86-104>

УДК 504.3.054+004.85+504.064

Постпроцессинг численных прогнозов концентраций приземного озона с использованием машинного обучения

Д.В. Борисов, И.Н. Кузнецова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;
lbj23.98@mail.ru*

Мониторинг качества прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на основе химических транспортных моделей (ХТМ) в действующей в Гидрометцентре России технологии указывает на целесообразность применения постпроцессинга. Впервые для коррекции модельных расчетов концентрации приземного озона использованы искусственные нейронные сети (ИНС). Обучающая выборка сформирована из ретроспективных часовых прогнозов ХТМ CHIMERE в период 2019–2023 гг. Проведены эксперименты по подбору оптимальной конфигурации ИНС. Представляются результаты экспериментального тестирования лучшей ИНС на недельном периоде летом с эпизодом высоких концентраций озона и в весеннем эпизоде повышенного содержания озона вследствие активного тропосферного перемешивания. Показана эффективность применения ИНС для улучшения модельного прогноза приземного озона и его суточной динамики.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, приземный озон, численный прогноз загрязнения, химическая транспортная модель, CHIMERE

Post-processing of ground-level ozone numerical forecasts using machine learning

D. V. Borisov, I. N. Kuznetsova

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
lbj23.98@mail.ru*

Monitoring the quality of air pollutant concentration forecasts based on chemical transport models (CTMs) currently used in the technology of the Hydrometcentre of Russia indicates the feasibility of the post-processing procedure application. For the first time, artificial neural networks (ANNs) were used to correct ground-level ozone model calculations. Retrospective hourly CTM CHIMERE forecasts for 2019-2023 formed the training dataset. Experiments were carried out to select the optimal ANN settings. Results of the experimental testing of the best ANN on a week-long summer period with an episode of high ozone concentrations and a spring period with an episode of high ozone concentrations due to active tropospheric mixing are presented. The effectiveness of using ANNs to improve model forecasts of ground-level ozone and its daily dynamics is shown.

Keywords: artificial neural networks, ground-level ozone, numerical forecast of pollution, chemical transport model, CHIMERE

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, озон (O_3) является одним из основных загрязняющих воздух веществ, которые представляют угрозу для здоровья населения (<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>); содержание озона в приземном воздухе – приоритетный показатель при оценке качества воздуха [3].

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана и реализована технология численного прогнозирования качества атмосферного воздуха на основе химической транспортной модели (ХТМ) CHIMERE. Расчеты концентраций загрязнителей воздуха CHIMERE проводятся ежедневно на 48 часов вперед с временным шагом 1 час в узлах регулярной сетки разрешением 2×2 км, покрывающей территорию московского региона. Для расчетов в технологии используется оперативный прогноз модели COSMO-Ru численного краткосрочного прогноза погоды (конфигурация COSMO-Ru2ETR) [8]. Для задания антропогенных эмиссий CHIMERE использует адаптированные региональные данные выбросов загрязняющих веществ в атмосферу кадастра ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme, <https://www.emep.int/>).

Регулярный мониторинг качества модельных расчетов CHIMERE проводится по данным автоматизированных измерений концентраций загрязнителей на более чем 50 автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» в Москве (<https://mosecom.mos.ru/>). Оценки успешности модельного прогноза концентраций приземного озона показывают в среднем удовлетворительное качество прогнозов максимальной и средней суточной концентрации озона. Вместе с тем выявлена сезонная особенность модельных отклонений – завышение концентрации озона летом, в т. ч. в «озоновых» эпизодах, когда наблюдаются самые высокие уровни озона [4, 7].

Успешность модельного расчета концентрации приземного озона во многом зависит от точности данных об эмиссиях предшественников. Как показал выполненный автором анализ, в кадастре ЕМЕП в последние годы отмечаются значительные изменения отраслевой структуры и объемов выбросов отдельных ингредиентов, что, безусловно, вписывается в наблюдаемую реальную динамику выбросов загрязняющих веществ в атмосферу [5]. И для приближения модельных расчетов к наблюдаемым концентрациям требуется регулярная актуализация начальных данных о выбросах на этапе препроцессинга. Заметим, что данные ЕМЕП обновляются с задержкой 2 года; в настоящее время доступны данные 2020 г. (<https://www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions>).

Другим способом повышения успешности прогнозов приземного озона является статистическая коррекция расчетов CHIMERE на этапе постпроцессинга.

В данном исследовании предлагается метод коррекции прогнозов концентраций приземного озона ХТМ SHIMERE путем обучения и применения искусственной нейронной сети (ИНС). Этот метод в настоящее время активно применяется в различных областях науки и практической деятельности. Аппарат нейронных сетей применительно к прогнозированию приземного озона одними из первых в нашей стране был апробирован сотрудниками Института оптики атмосферы и океана [2]. Авторы использовали многослойный перцептрон с тремя скрытыми слоями. Установлено, что нейронная сеть способна описать 70 % дисперсии среднего и 49 % дисперсии среднеквадратического отклонения среднесуточной приземной концентрации озона.

В целом ряде зарубежных научных публикаций последних лет приводятся результаты применения методов машинного обучения для прогнозирования и коррекции прогнозов качества воздуха; наибольшую эффективность показывают искусственные нейронные сети, в особенности глубокие нейронные сети [10–12].

Методы и данные

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – математическая модель, возникающая из попыток смоделировать обработку информации человеческим мозгом. Основным преимуществом ИНС является возможность и способность накапливать, обобщать большие объемы информации, т. е. обучаться. Базовыми составляющими ИНС являются искусственные нейроны, которые образуют слои.

На вход ИНС подается набор предикторов. Нейроны входного слоя ИНС обрабатывают набор предикторов так, что значение на выходе каждого нейрона представляет собой взвешенную линейную комбинацию входных предикторов; нейроны скрытых слоев дают на выходе взвешенные линейные комбинации выходных значений нейронов предыдущего слоя. Функция активации масштабирует выходные сигналы нейронов, обычно в интервалах $[0, 1]$ или $[-1, 1]$. Прогнозом ИНС является выходное значение нейрона последнего слоя. В случае задачи регрессии на выходном слое всегда задан один нейрон. На рис. 1 схематично представлен процесс обработки информации искусственной нейронной сетью.

Основными параметрами ИНС, от которых зависит точность прогноза, являются синаптические связи между нейронами, или веса ИНС (w на рис. 1). Весь процесс вывода прогноза ИНС с любым количеством слоев и нейронов из набора предикторов можно формализовать как

$$Y = f(X, W, b),$$

где Y – целевая переменная, прогноз ИНС; X – набор входных данных – предикторов; W – набор весов синаптических связей в слоях ИНС; b – смещения в слоях ИНС.

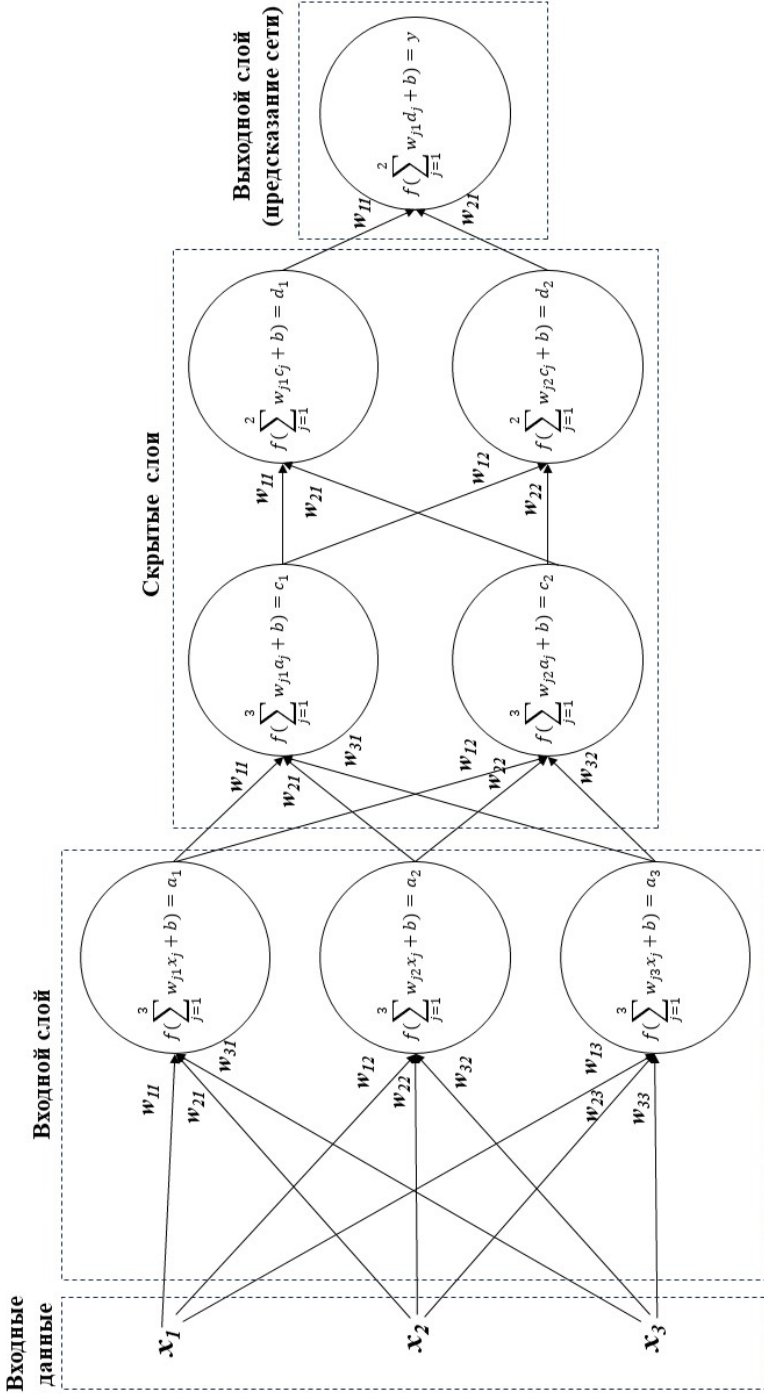


Рис. 1. Схематичное изображение процесса обработки данных искусственной нейронной сетью. Кружками обозначены нейроны, стрелками – синаптические связи между нейронами, или веса, w .
 Fig. 1. Schematic representation of the data processing carried out by an artificial neural network. Circles indicate neurons, arrows indicate synaptic connections between neurons, or weights, w .

Обучение ИНС заключается в оптимизации весов W с целью минимизации функции потерь. Для обучения необходима обучающая выборка формы (n записей \times m предикторов) и массив истинных значений целевой переменной формы (n записей).

Каждый шаг обучения состоит из нескольких этапов:

1) на вход ИНС подается *пакет данных* – подвыборка из обучающей выборки. Перед обучением задается размер пакета, обучающая выборка разбивается на $n = \frac{\text{размер обучающей выборки}}{\text{размер пакета}}$ пакетов данных, соответственно, обучение проходит в n шагов;

2) на выходе ИНС вычисляется функция потерь L , например, среднее абсолютное отклонение прогнозов ИНС от истинных значений целевой переменной;

3) вычисляется градиент функции потерь по весам ИНС $\frac{\partial L}{\partial w}$;

4) веса ИНС обновляются в сторону снижения функции потерь по правилу:

$$W_t = W_{t-1} - \eta \cdot \frac{\partial L}{\partial w},$$

где W_t – обновленные веса; W_{t-1} – веса на предыдущем шаге обучения; η – шаг обучения, или скорость обучения.

Проход всего обучающего набора данных через ИНС называется *эпохой обучения*.

Формирование обучающей выборки для коррекции прогнозов озона ХТМ CHIMERE производилось из доступных авторам ежедневных почасовых прогнозов ХТМ CHIMERE для территории московского региона на двое суток (48 часов) вперед за период 02 февраля 2019 года – 25 сентября 2023 года, что составляет ~ 5 лет прогнозов.

Вместе с прогнозами концентраций загрязнителей в обучающую выборку на той же регулярной сетке включены данные препроцессинга (прогнозы метеопараметров, данные об эмиссиях и др.), которые использует CHIMERE при построении прогнозов.

В обучающую выборку вошли 34848 часовых прогнозов CHIMERE на сетке разрешением 2×2 км за период 02.07.2019 – 25.09.2023; по техническим причинам отсутствуют прогнозы CHIMERE за период с 22.05 по 30.09.2021 – за теплый период, когда зачастую наблюдаются повышенные и высокие концентрации приземного озона (т.н. «озоновые эпизоды»). Также имеются длительные пропуски прогнозов во второй половине декабря 2019 г. и с середины сентября по середину октября 2022 г. Таким образом, в обучающей выборке содержатся модельные часовые концентрации приземного озона во все сезоны. Для формирования массива целевой переменной в выборку включены часовые данные измерений концентраций приземного озона на АСКЗА в г. Москве. В рассматриваемый период

измерения концентрации приземного озона проводились на 17 АСКЗА, расположенных в жилых и примагистральных районах Москвы (<https://mosecom.mos.ru/karta/>). В базу данных за ~5 лет внесены 516009 почасовых измерений концентраций приземного озона на АСКЗА различной функциональной принадлежности.

Список предикторов (или признаков) обучающей выборки составлялся из имеющихся представлений о физических связях озона с предшественниками в урбанизированной среде, зависимости изменчивости концентрации приземного озона от метеорологических факторов, включая тропосферный обмен [1, 3, 4, 6, 7, 9].

Список предикторов включает в себя следующие величины:

- Прогностические часовые концентрации O_3 и предшественников NO , NO_2 , по расчетам CHIMERE.

- Из данных препроцессинга – часовые прогностические значения метеорологических характеристик системы COSMO-Ru на сетке CHIMERE: температура на высоте 2 м, высота пограничного слоя, относительная влажность воздуха, осадки, скорость ветра на высоте 10 м, коротковолновая радиация, температурный градиент в слоях 2–200 м и 2–700 м, скорость ветра на высоте 700 м. Температурные градиенты и высотный ветер вычислялись из значений метеопараметров на соответствующих высотных уровнях сетки CHIMERE.

- Среднее многолетнее значение общего содержания озона (ОСО) в атмосферном столбе за каждый календарный день (предоставлены Центральной аэрологической обсерваторией), тип АСКЗА, месяц, день недели, час прогноза.

Обучающая выборка включает в себя 18 описанных выше предикторов. Часовые данные измерений озона на АСКЗА синхронизированы по времени с предикторами в ближайшем к координатам каждой АСКЗА узле модельной сетки, выбранными из данных препроцессинга (метеорологические параметры) и прогнозов CHIMERE.

Массив целевой переменной (Y) формировался как отклонение прогноза концентрации озона CHIMERE от соответствующих измерений на АСКЗА. После синхронизации прогнозов CHIMERE и данных измерений на АСКЗА объем обучающей выборки после удаления пропусков составил 428733 записи, которые охватывают все сезоны в ~5-летний период 02.07.2019 – 25.09.2023.

Следует отметить, что разработанный алгоритм формирования обучающих выборок, включая сбор, обработку и синхронизацию прогнозов CHIMERE и данных измерений концентраций на АСКЗА, добавление данных из внешних файлов, конструирование признаков и удаление некорректных данных (многократное превышение средних уровней, отрицательные значения концентраций озона), может использоваться для формирования любых обучающих выборок, а также для пополнения обучающих выборок

новыми данными. Алгоритм разработан на языке программирования Python с использованием библиотек Pandas, Numpy, netCDF4.

Также разработан отдельный алгоритм для проведения экспериментов по обучению и тестированию ИНС. Алгоритм разрабатывался с целью подбора такой конфигурации ИНС, которая показала бы лучшую точность и устойчивость при решении основной задачи исследования – уточнения численных прогнозов приземного озона CHIMERE.

Разработка алгоритма велась по принципам универсальности и автоматизации; он базируется на применении Python-функций, которые создают и обучают ИНС по заданным конфигурациям отдельно или в цикле. Этот алгоритм позволяет создавать ИНС с любым количеством полносвязных слоев и нейронов, добавлять в слои исключения (dropout), задавать любые схемы затухания скорости обучения, задавать импульс обновления весов, свободно задавать настройки процесса обучения – размер пакета, количество эпох обучения и др. При разработке алгоритма на языке программирования Python использовались библиотеки машинного обучения Keras и Tensorflow.

Эксперименты по обучению ИНС

В табл. 1 представлен перечень конфигураций ИНС, обученных в ходе проведения экспериментов по установлению лучших ИНС. Отметим, что эксперименты 1–3 были направлены на обучение различных архитектур ИНС; в экспериментах 4–7 опробованы дополнительные методы повышения эффективности процесса обучения – затухание скорости обучения, задание импульса обновления весов. В экспериментах 8–9 опробован метод исключения нейронов (англ. dropout) в слоях ИНС; в экспериментах 10–12 задана комбинация затухания скорости обучения и импульса обновления весов при различных архитектурах ИНС.

Алгоритм проводит обучение всех ИНС по принципу перекрестной проверки, с установкой количества блоков k . Перекрестная проверка подразумевает разбиение обучающей выборки на k блоков и обучение одной и той же вариации ИНС k раз. Каждый раз ИНС обучается на $k-1$ блоках данных, на оставшемся контрольном блоке, т. е. на независимой выборке, вычисляется оценка точности ИНС, например, среднее абсолютное отклонение прогнозов ИНС от истинных значений целевой переменной. Оценки точности вычисляются после каждой эпохи обучения.

В завершении оценки точности по эпохам осредняются по k блокам, таким образом сглаживаются флуктуации оценок точности ИНС на разных данных и повышается репрезентативность оценок. По осредненным оценкам строятся т. н. кривые обучения – графики точности ИНС на каждой эпохе обучения (см. рис. 2), по которым можно оценить эффективность обучения ИНС.

Таблица 1. Протокол экспериментов по обучению ИНС
Table 1. Protocol of ANN training experiments

№ эксперимента	Архитектура в формате (кол-во нейронов в слое 1, кол-во нейронов в слое 2 ...)	Исключение (доля исключенных нейронов)	Начальная скорость обучения	Затухание скорости обучения	Коэффициент импульса обновления весов	Кол-во весов ИНС
1	(10,1)	-	0.001	-	-	621
2	(100, 1)	-	0.001	-	-	6201
3	(100, 50, 1)	-	0.001	-	-	11201
4	(100, 50, 1)	-	0.1	Ступенчатое	-	11201
5	(100, 50, 1)	-	0.1	Линейное	-	11201
6	(100, 50, 1)	-	0.1	Полиномиальное	-	11201
7	(100, 50, 1)	-	0.001	-	0,9	11201
8	(200, 100, 50, 1)	Вход – 0.2 Слой 1 – 0.5 Слой 2 – 0.5 Слой 3 – 0.5	0.001	-	0,9	37401
9	(400, 200, 100,50, 20, 1)	Вход – 0.2 Слой 1 – 0.5 Слой 2 – 0.5 Слой 3 – 0.5 Слой 4 – 0.5 Слой 5 – 0.5	0.1	Линейное	0,99	130791
10	(100, 50, 1)	-	0.1	Линейное	0,9	11201
11	(100, 50, 25, 1)	-	0.1	Линейное	0,9	12451
12	(100, 50, 1)	-	0.1	Линейное*	0,9	11201

Тестирование обученных ИНС на независимых выборках

Ключевым этапом проведения экспериментов является тестирование обученных ИНС на независимых выборках. Независимые выборки представляют собой временные ряды данных в определенном пункте – на АСКЗА, что позволяет проводить сравнение качества первичных и скорректированных ИНС прогнозов CHIMERE с измеренными на АСКЗА концентрациями приземного озона.

Блок тестирования включает в себя:

1. Задание набора тестовых подвыборок вида «временной период – АСКЗА».

2. Вырезка подвыборок из обучающей выборки, т.к. тестовые данные никак не должны участвовать в обучении ИНС.

3. Прогон тестовых данных через обученные ИНС и получение рядов скорректированных прогнозов.

4. Расчет статистических показателей качества первичных модельных и скорректированных ИНС прогнозов озона. Показатели успешности применения ИНС определяются как по отдельным подвыборкам вида «временной период – АСКЗА», так и осредняются по всей выборке, по заданным временным периодам, по типовым АСКЗА.

5. Визуализация результатов тестирования.

Наибольший интерес представляет установление эффективности коррекции ИНС в периоды высоких концентраций озона, которые весной связаны чаще всего со значительным притоком озона из верхних слоев атмосферы, а летом образуются из-за активной фотохимической генерации озона в жаркую погоду в загрязненном городском воздухе [3, 4, 9]. Также отдельный интерес представляют изменения конфигураций ИНС в условиях различной антропогенной нагрузки, что определило задачу оценки результатов отдельно по АСКЗА транспортного, жилого, смешанного и условно фоновому типу.

Общий объем тестовой (независимой) выборки составил 3282 записи данных; из них сформировано 20 периодов семисуточной продолжительности. Для тестирования экспериментальных ИНС отобраны два летних и три весенних семисуточных периодов в разные годы. Для каждого из периодов выбраны данные четырех типов АСКЗА (табл. 2).

Обсуждение результатов

По итогам обучения экспериментальных ИНС (табл. 1) по анализу кривых обучения лучшие результаты показали ИНС 4–7 и 10–12 – двух- и трехслойные ИНС с включением затухания скорости обучения и импульса обновления весов, среднее абсолютное отклонение (САО) которых на 100 эпохе достигает значений в пределах 8–9. Менее успешные результаты показали ИНС 1–3 с вариациями архитектур полносвязных слоев – САО

на 100 эпохе достигает значений 9–11; худшие результаты показали ИНС 8 и 9 с исключениями нейронов в слоях – САО на 100 эпохе 12.36 и 18.76 в эксперименте 8 и 9 соответственно. На рис. 2 для сравнения приведены кривые обучения ИНС-7 и ИНС-9.

Таблица 2. Временные ряды данных на АСКЗА, составляющие независимую выборку для тестирования экспериментальных конфигураций ИНС

Table 2. ASKZA data time series constituting an independent sample for experimental ANN configurations testing

Временные периоды		Типовая принадлежность АСКЗА			
Начало периода	Конец периода	Транспортная	Смешанная	Жилая	Фоновая
5.06.2019	11.06.2019	Хамовники	Марьино	Спиридоновка	МГУ
10.05.2022	16.05.2022	МАДИ	Марьино	Толбухина	МГУ
13.04.2021	19.04.2021	Площадь Гагарина	Кожухово	Спиридоновка	МГУ
16.03.2020	22.03.2020	Хамовники	Марьино	Туристская	МГУ
28.06.2022	04.07.2022	Площадь Гагарина	Марьино	Спиридоновка	МГУ

В табл. 3 представлены общие – осредненные по всем тестовым подвыборкам (табл. 2) – статистические показатели качества первичных модельных и скорректированных ИНС прогнозов озона для каждой обученной в ходе экспериментов ИНС.

Используемые в табл. 3 обозначения:

- средняя за период концентрация озона: OBS – измерения на АСКЗА, Chim – прогноз CHIMERE, ANN – скорректированная ИНС.

- Bias, ABS, RMS, R – среднее отклонение, среднее абсолютное отклонение, стандартное отклонение ошибки, коэффициент корреляции прогнозов CHIMERE (Chim) / скорректированных ИНС прогнозов (ANN) и измерений на АСКЗА.

Обращают на себя внимание знаки средних отклонений: при том что CHIMERE в среднем завышает концентрации озона по сравнению с измерениями, расчеты всех 12 тестируемых ИНС приводят к занижению концентраций, но оно по величинам меньше, чем завышения ХТМ CHIMERE (за исключением экспериментов 1, 2, 8, 9). Наименьшие и близкие к 0 средние отклонения «расчет-наблюдение» оказались свойственными для ИНС 5 и 7, 11 и 12.

Отметим, во всех экспериментах (кроме 9) наблюдается снижение средней абсолютной ошибки прогноза CHIMERE после коррекции ИНС. Наибольшее уменьшение среднего абсолютного отклонения – практически в 2 раза – показывали ИНС 4–7 и 10–12, то есть двух- и трехслойные ИНС

с применением затухания скорости обучения и импульса обновления весов. Эти же ИНС показывают наибольшее снижение стандартного отклонения ошибки прогноза.

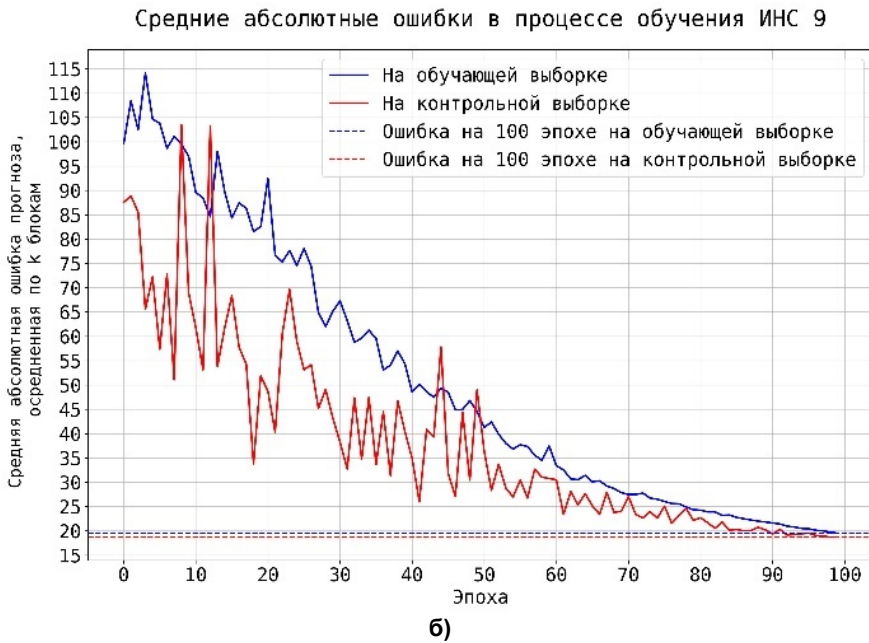
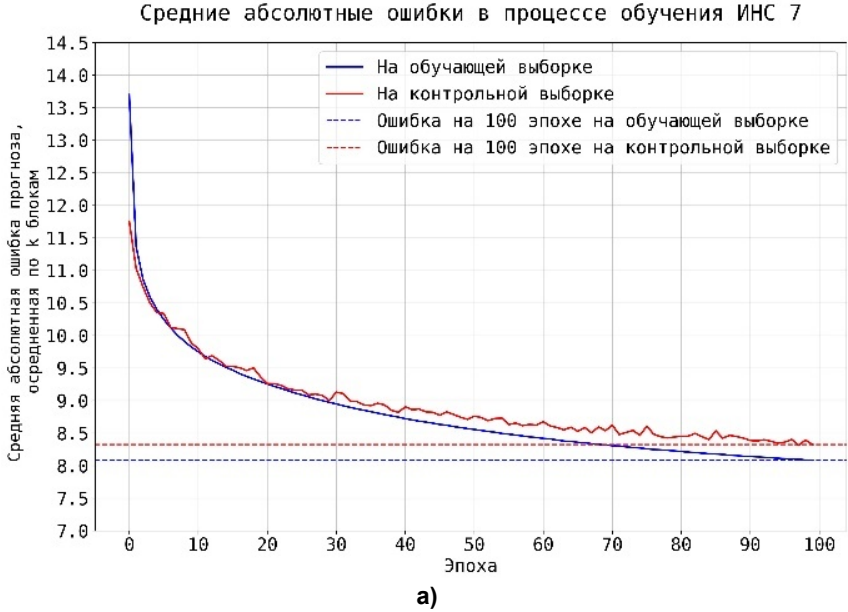


Рис. 2. Кривые обучения ИНС конфигураций 7 (а) и 9 (б).
Fig. 2. Learning curves of ANN configurations 7 (a) and 9 (б).

Таблица 3. Статистические показатели качества первичных модельных и скорректированных экспериментальными ИНС прогнозов озона**Table 3.** Statistical indicators of the quality of primary model and experimentally ANN corrected ozone forecasts

Эксперимент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средняя за период концентрация озона												
OBS	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67	56,67
Chim	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21	62,21
ANN	49,02	50,78	53,47	53	54,23	54,06	55,72	48,49	42,14	53,39	54,26	53,91
Bias												
Chim	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54
ANN	-7,65	-5,88	-3,2	-3,66	-2,44	-2,61	-0,94	-8,17	-14,52	-3,27	-2,41	-2,75
ABS												
Chim	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61	23,61
ANN	17,14	16,21	15,05	13,45	13,4	13,36	13,18	17,5	24,02	13,82	13,49	13,96
RMS												
Chim	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87	28,87
ANN	21,56	20,5	19,23	17,19	17,41	17,28	17,14	21,72	27,97	17,75	17,44	18
R												
Chim	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
ANN	0,77	0,8	0,82	0,86	0,86	0,86	0,87	0,77	0,56	0,85	0,86	0,85

Для коррекции всех ИНС, кроме ИНС-9, характерно увеличение коэффициента корреляции (R) «прогноз – измерение» по сравнению с первичными прогнозами CHIMERE, наибольшее увеличение с $R=0.57$ до $R=0.85-0.87$ показали те же ИНС 4–7 и 10–12.

В среднем по тестовой выборке наилучшие результаты по всем полученным оценкам – снижение Bias, ABS, RMS; увеличение R – показала ИНС-7 – двуслойная ИНС 100–50 нейронов со значением импульса обновления весов 0.9. Худшие результаты с увеличением средних отклонений (по модулю) и снижением коэффициента корреляции после коррекции показали ИНС 8 и 9 – с исключениями нейронов в слоях.

Далее обсуждаются результаты коррекции прогнозов CHIMERE с помощью лучшей ИНС-7 в летнем и весеннем эпизодах на отдельных подвыборках вида *временной период-АСКЗА*.

Как видно в табл. 4, по всем осредненным за летний эпизод 5–11 июня 2019 г. показателям и критериям расчеты ИНС-7 имеют преимущества перед первичными прогнозами CHIMERE.

Таблица 4. Средняя за период концентрация приземного озона ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) – измеренная (OBS), рассчитанная по XTM CHIMERE (Chim) и ИНС-7 (ANN), статистические характеристики качества прогнозов CHIMERE и ИНС-7. Эпизод 5-11 июня 2019 г.
Table 4. Period-average ground-level ozone concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – measured (OBS), calculated using CHIMERE (Chim) and ANN-7 (ANN), statistical characteristics of the quality of CHIMERE and ANN-7 forecasts. June 5-11, 2019 episode

Эксперимент	АСКЗА			
	Хамовники Транспортная	Марьино Смешанная	Спиридоновка Жилая	МГУ Фоновая
OBS	59,11	60,85	70,37	76,77
Chim	47	45,16	42,76	45,55
ANN	51,27	65,31	67,8	60,98
Bias Chim	-12,11	-15,69	-27,61	-31,22
Bias ANN	-7,84	4,46	-2,57	-15,79
ABS Chim	17,59	20,55	28,23	35,2
ABS ANN	13,77	12,13	14,36	20,46
RMS Chim	19,28	21,42	20,47	27,86
RMS ANN	16,03	14,56	17,05	20,34
R Chim	0,89	0,9	0,92	0,86
R ANN	0,93	0,96	0,94	0,92

На фоне хороших средних за период показателей качества коррекции первичных прогнозов XTM с помощью ИНС-7, при анализе временного хода модельных расчетов и измеренных концентраций можно отметить некоторые особенности. На рис. 3 иллюстрируются расчеты XTM, ИНС-7 для станций четырех типов (см. табл. 4).

Обсуждаемый летний эпизод характеризуется высокими уровнями озона, превысившими 6 и 7 июня ПДК_{м.р.}, (равная $160 \mu\text{г}/\text{м}^3$, отмечено черной пунктирной линией на рис. 3). Повышенные концентрации наблюдались в послеполуденные часы, что объясняется фотохимическим производством озона в приземном слое в присутствии предшественников – оксидов азота, при высокой УФ-облученности. В темное время суток концентрация приземного озона уменьшалась по наблюдениям и модельным расчетам до $1-10 \mu\text{г}/\text{м}^3$.

Как видно на рис. 3, в данном эпизоде CHIMERE занижает концентрации озона по сравнению с измерениями на всех АСКЗА, больше всего – на АСКЗА жилого и фоновых типов. В то же время CHIMERE довольно точно воспроизводила суточную изменчивость озона, время дневных максимумов и ночных минимумов, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции между измерениями и прогнозами на всех АСКЗА ($R_{\text{Chim}} = 0.86-0.92$).

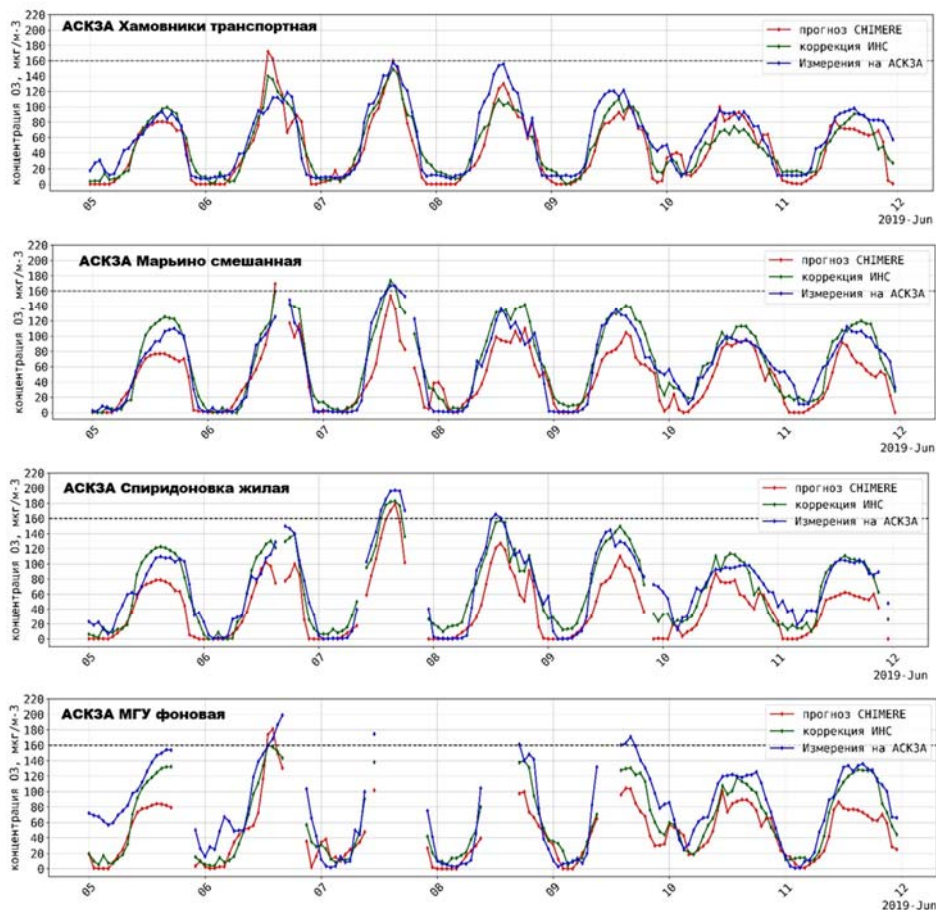


Рис. 3. Временной ход концентрации приземного озона по измерениям на АСКЗА, прогнозам CHIMERE и скорректированным ИНС-7 прогнозам в период 5-11 июня 2019 г.

Fig. 3. Dynamics of ground-level ozone concentration according to measurements at ASKZA, CHIMERE forecasts and adjusted with ANN-7 forecasts for the June 5-11, 2019 period.

ИНС заметно корректирует прогноз концентраций озона по ХТМ CHIMERE – на всех АСКЗА уменьшила модельные занижения, приблизив значения прогноза к измерениям. Наиболее выраженная эффективность коррекции ИНС установлена для АСКЗА смешанного и жилого типа (Марьино и Спиридоновка). На АСКЗА транспортного типа Хамовники обнаружены ошибочные занижения ИНС-7 8 и 10 июня. На фоновой станции МГУ ИНС-7 почти вдвое уменьшила отрицательное отклонение прогноза CHIMERE. В целом следует отметить, что в данном эпизоде ИНС-7 повысила

точность прогноза максимумов и суточных циклов концентрации приземного озона, также на всех АСКЗА увеличился коэффициент корреляции «прогноз – измерение» до 0,92–0,96.

Выше рассматривался летний период с зафиксированными «озоновыми» эпизодами фотохимического происхождения. Отдельный интерес представляет анализ возможностей моделирования и коррекции с помощью ИНС в эпизоде весеннего значительного повышения содержания озона в приземном воздухе вследствие усиления притока тропосферного озона. Один из таких эпизодов наблюдался в середине апреля 2021 г., что хорошо видно на рис. 4.

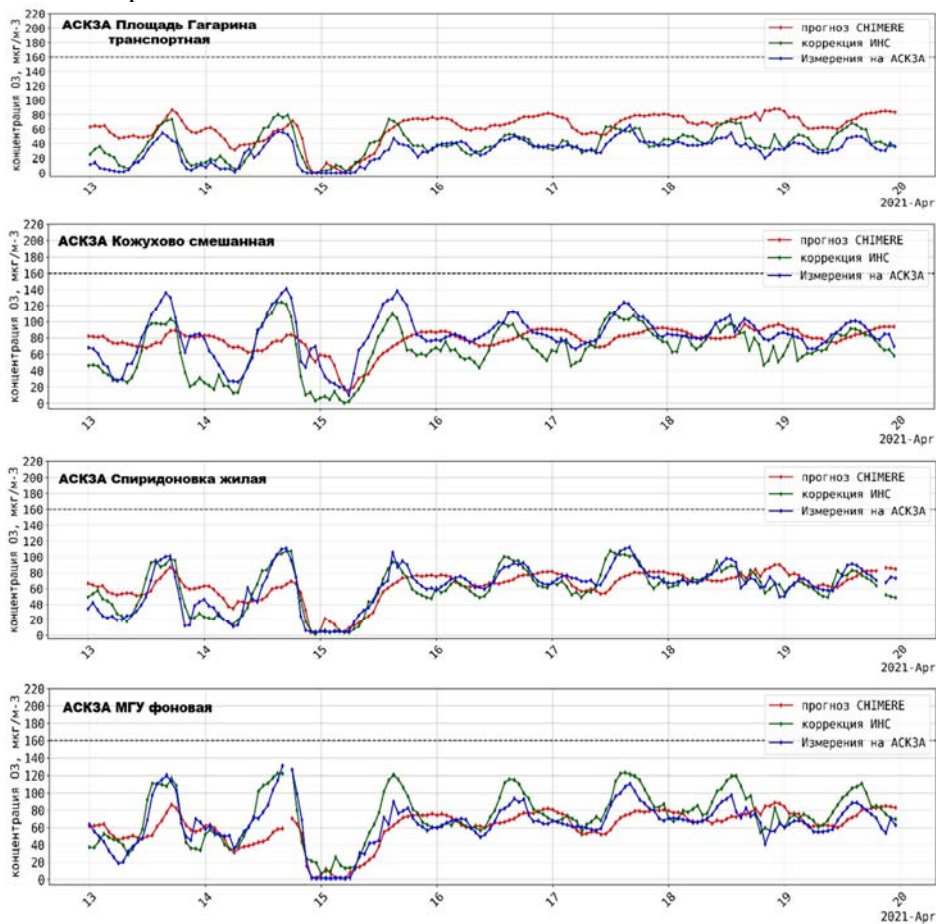


Рис. 4. Временной ход концентрации приземного озона по измерениям на АСКЗА, прогнозам CHIMERE и скорректированным ИНС-7 прогнозам в период 13-19 апреля 2021 г.

Fig. 4. Dynamics of ground-level ozone concentration according to measurements at ASKZA, CHIMERE forecasts and adjusted with ANN-7 forecasts for the period April 13-19, 2021 period

Рассматриваемый весенний эпизод содержит два режима приземного озона: 13–15 апреля наблюдался близкий к типовому суточный ход с хорошо выраженной амплитудой озона до 80–100 мкг/м³; вторая половина эпизода 16–19 апреля отражала характерный для ветреной неустойчивой погоды режим приземного озона с небольшими внутрисуточными колебаниями концентрации на повышенном фоне.

Как видно на рис. 4, расчеты ИНС-7 имеют явное преимущество над прогнозами концентрации приземного озона CHIMERE на всех типовых АСКЗА. CHIMERE так же, как в предыдущем эпизоде, чаще всего искажает суточную динамику концентраций озона. ИНС-7 на АСКЗА транспортного типа (пл. Гагарина) уменьшает завышенные прогнозы CHIMERE и корректирует суточную изменчивость озона. На АСКЗА смешанного типа (Кожухово) ИНС ошибочно занижает прогнозы CHIMERE, которые оказались в среднем близки к измерениям, но улучшает воспроизведение суточной изменчивости концентраций озона ($R_{\text{Chim}} = 0,38$, $R_{\text{ANN}} = 0,87$). При этом следует отметить, что на этой АСКЗА, расположенной за пределами МКАД, измеренные концентрации озона почти на 20 мкг/м³ превышали уровень озона на городских станциях (табл. 5).

Таблица 5. Средняя за период концентрация приземного озона (мкг/м³) – измеренная (OBS), рассчитанная по ХТМ CHIMERE (Chim) и ИНС-7 (ANN), статистические характеристики качества прогнозов CHIMERE и ИНС-7. Эпизод 13–19 апреля 2021 г.

Table 5. Period-average ground-level ozone concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – measured (OBS), calculated using CHIMERE (Chim) and ANN-7 (ANN), statistical characteristics of the quality of CHIMERE and ANN-7 forecasts. April 13-19, 2021 episode

Эксперимент	АСКЗА			
	Площадь Гагарина Транспортная	Кожухово Смешанная	Спиридоновка Жилая	МГУ Фоновая
OBS	30,4	82,34	62,16	64,8
Chim	61,59	77,39	63,31	61,27
ANN	39,37	65,62	61	73,72
Bias Chim	31,19	-4,94	1,15	-3,53
Bias ANN	8,97	-16,71	-1,16	8,92
ABS Chim	31,19	19,64	15,35	14,13
ABS ANN	10,34	17,37	8,96	12,64
RMS Chim	14,85	24,82	18,88	18,72
RMS ANN	9,77	14,33	10,96	13,17
R Chim	0,68	0,38	0,71	0,68
R ANN	0,85	0,87	0,92	0,89

На АСКЗА жилого типа (Спиридоновка) CHIMERE довольно точно спрогнозировала средний уровень озона, но ИНС успешнее отразила суточную изменчивость прогнозов CHIMERE ($R_{\text{Chim}} = 0,71$, $R_{\text{ANN}} = 0,92$). На АСКЗА фоновом типа МГУ ИНС-7 ошибочно завысила прогнозы CHIMERE, в то же время значительно улучшила воспроизведение суточной динамики прогностических концентраций ($R_{\text{Chim}} = 0,68$, $R_{\text{ANN}} = 0,89$).

По результатам тестовых сравнений первичных модельных прогнозов концентрации приземного озона по ХТМ CHIMERE с расчетами ИНС в двух недельных эпизодах выявлена и подтверждена количественными показателями эффективность применения ИНС для уточнения суточной динамики и уровня озона на большинстве АСКЗА.

Заключение

Выполнен анализ возможностей применения ИНС в области прогнозирования качества воздуха. Изучены методы построения ИНС, разработаны авторские алгоритмы формирования обучающих выборок; создания, обучения и тестирования конфигураций ИНС для выбора оптимальных моделей коррекции прогнозов атмосферных загрязнений.

Впервые для статистической коррекции модельных прогнозов концентрации приземного озона, рассчитываемых на основе ХТМ CHIMERE, применены ИНС. Для разработки ИНС сформирована база данных часовых модельных прогнозов озона, его предшественников и наблюдений в период 2019–2023 гг. Используются непрерывные измерения концентраций приземного озона на АСКЗА «Мосэкомониторнг». Проведены эксперименты по построению, обучению и тестированию ИНС с вариациями конфигураций ИНС.

Экспериментальное тестирование всех созданных ИНС показало целесообразность применения метода для повышения качества прогноза приземного озона.

Авторы выражают признательность и благодарность руководству ГПБУ «Мосэкомониторинг» за предоставление данных, позволяющее выполнять научно-практические разработки на современном уровне.

Список использованных источников

1. Антохин П.Н., Белан Б.Д. Регулирование динамики тропосферного озона через стратосферу // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 890-895.
2. Антохин П.Н., Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Сравнение различных методов статистического прогнозирования суточной динамики приземной концентрации озона // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1082-1089.
3. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
4. Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 122-135.

5. Борисов Д.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Изменения кадастровых данных о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ в московском регионе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 156-173. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-156-173>.

6. Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Известия РАН. ФАО. 2022. Т. 58, № 1. С. 92-108.

7. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Курсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147-170. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-147-170>.

8. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Курсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Татарникович Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 27-53.

9. Borisov D.V., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Y., Nahaev M.I., Lezina E.A., Lapchenko V.A. Monitoring of surface ozone in the Moscow region // Тезисы конференции QOS (Online Meeting Quadrennial Ozone Symposium). 3–9 October 2021.

10. Freeman B.S., Taylor G., Gharabaghi B., Th'e J. Forecasting air quality time series using deep learning // J. Air Waste Manag. Assoc. 2018. Vol. 68, no. 8. P. 866-886. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1459956>.

11. Masood A., Kafeel A. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 322. P. 129072. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129072.

12. Min Xu et al. Machine learning based bias correction for numerical chemical transport models // Atmospheric Environment. 2021. Vol. 248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118022>.

References

1. Antokhin P.N., Belan B.D. Control of the Dynamics of Tropospheric Ozone through the Stratosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 3, pp. 207-213.

2. Antokhin P.N., Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N. The comparison of different methods of statistical prediction of diurnal dynamics in the ground ozone concentration. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 12.

3. Belan B.D. Ozon v troposphere [Ozone in the troposphere]. Tomsk, IOA SO RAN publ., 2010, 488 p. [in Russ.].

4. Borisov D.V., Shalygina I.Yu., Lezina E.A. Studying seasonal and daily variability of surface ozone. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 377, no. 3, pp. 122-135 [in Russ.].

5. Borisov D.V., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Changes in inventory data on pollutant emissions into the atmosphere over the Moscow region. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023,

vol. 388, no. 2, pp. 156-173. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-156-173> [in Russ.].

6. Elansky N.F., Shilkin A.V., Ponomarev N.A., Zakharova P.V., Kachko M.D., Poliakov T.I. Spatiotemporal variations in the content of pollutants in the Moscow air basin and their emissions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 80-94.

7. Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Tkacheva Yu.V., Rivin G.S., Lezina E.A. Testing and prospects of air pollution prediction technology based on CHIMERE and COSMO-Ru2ART chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 386, pp. 147-170. DOI: [10.37162/2618-9631-2022-4-147-170](https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-147-170) [in Russ.].

8. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no.4, pp. 27-53 [in Russ.].

9. Borisov D.V., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Y., Nahaev M.I., Lezina E.A., Lapchenko V.A. Monitoring of surface ozone in the Moscow region. Online Meeting Quadrennial Ozone Symposium. 3–9 October 2021.

10. Freeman B.S., Taylor G., Gharabaghi B., Th'e J. Forecasting air quality time series using deep learning. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 2018, vol. 68, no. 8, pp. 866-886. DOI: [10.1080/10962247.2018.1459956](https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1459956).

11. Masood A., Kafeel A. A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 322, pp. 129072. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.129072](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072).

12. Min Xu et al. Machine learning based bias correction for numerical chemical transport models. *Atmospheric Environment*. 2021, vol. 248. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2020.118022](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118022).

Поступила 17.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.

Submitted 17.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-105-117>

УДК 551.467

Анализ ледовых условий на судоходных трассах Каспийского моря

Е.С. Нестеров¹, А.А. Максимов², А.В. Федоренко¹

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

*²Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
г. Москва, Россия
nesterov@mecom.ru*

Представлен анализ ледовых условий на судоходных трассах северной части Каспийского моря. Рассматриваются толщина и сплоченность льда в зимние сезоны 2011/2012, 2015/2016 и 2022/2023 годов. Наиболее тяжелые ледовые условия были в сезон 2011/2012 гг. На основе спутниковой информации даны примеры распространения стамух – опасных для судоходства ледяных образований.

Ключевые слова: Каспийское море, ледяной покров, судоходные трассы, толщина и сплоченность льда, стамухи

Analysis of ice conditions on the Caspian Sea shipping routes

E.S. Nesterov¹, A.A. Maksimov², A.V. Fedorenko¹

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

*²Scientific Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow, Russia
nesterov@mecom.ru*

An analysis of ice conditions on the shipping routes in the northern part of the Caspian Sea is given. The thickness and concentration of sea ice on the routes in the winter seasons of 2011/2012, 2015/2016, and 2022/2023 are considered. The most severe ice conditions were observed in the winter season of 2011/2012. On the basis of satellite information, examples of the spread of stamukhas, which are the ice structures, dangerous for navigation, are given.

Keywords: Caspian Sea, ice cover, shipping routes, thickness and concentration of sea ice, stamukhas

Введение

В северной части Каспийского моря (далее Северный Каспий) ведется активная деятельность по разведке, добыче и транспортировке углеводородов. Наличие ледяного покрова является лимитирующим фактором для этой деятельности. Интенсивный дрейф ледяных полей, заторы и торосение льда снижают скорость движения судов. Активное торосение, в результате которого образуются ледяные торосистые образования, и припай

могут значительно препятствовать судоходству. Также под влиянием интенсивных подвижек и торошения льда происходит образование большого количества стамух (торосистых образований, сидящих на грунте) [4]. В январе суровых и умеренных зим преобладающая торосистость на трассах Северного Каспия составляет 1–2 балла, в феврале – 2–3 балла [7].

Опасность для морских операций представляет также появление льда или припая в ранние сроки в мелководных районах Северного Каспия. Когда самостоятельное движение грузовых судов становится небезопасным, из них формируются караваны для проводки за ледоколами. Скорость движения каравана зависит от толщины, сплоченности, торосистости льда и других факторов.

Основные судоходные трассы Каспийского моря представлены на рис. 1.

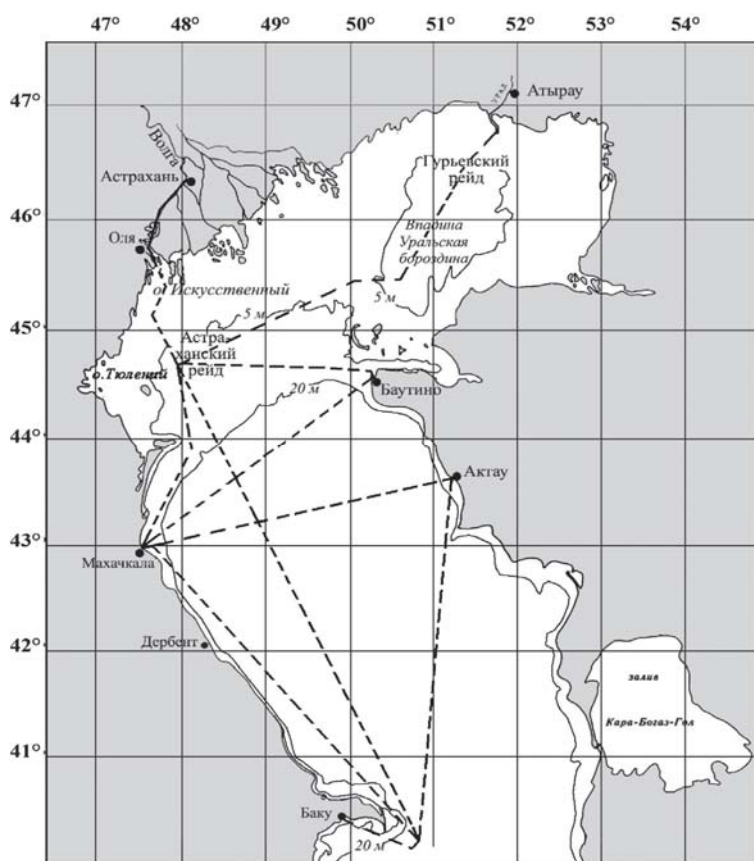


Рис. 1. Основные судоходные трассы (пунктир) в Северном и Среднем Каспии [9].

Fig.1. The main shipping routes (dotted line) in the Northern and Middle Caspian Sea [9].

В данной работе основное внимание будет уделено трассам: порт Оля – Астраханский рейд – Махачкала (протяженность около 170 морских миль), Астраханский рейд – Баутино (90 миль), Астраханский рейд – Гурьевский рейд – Атырау (около 200 миль). Глубина моря на данных трассах не превышает 20 м. Трассы Астраханский рейд – Баутино и Астраханский рейд – Атырау проходят над глубинами от 2 до 10 метров.

Некоторая информация о ледовых условиях на этих трассах приведена в монографии [5]. Так, трасса Астраханский рейд – Гурьевский рейд – Атырау в суровые зимы бывает полностью покрыта припаем, в мягкие зимы припай занимает одну треть трассы. Трасса Астраханский рейд – Баутино в суровые зимы в феврале также покрыта припаем, разрушение которого происходит под действием восточных и юго-восточных ветров, при этом усиливается дрейф льда. На трассе Астраханский рейд – Махачкала в умеренные зимы в январе-феврале помимо местного льда появляется лед, дрейфующий с севера и достигающий устья реки Сулак [7]. В аномально холодную зиму 2011–2012 гг. под действием сильного северо-западного ветра дрейфующий лед распространился вдоль западного побережья до Апшеронского полуострова [1].

Наиболее сложные ледовые условия в Каспийском море для судов складываются на участке трассы Астраханский рейд – Гурьевский рейд – Атырау. Особое внимание необходимо уделять освещению обстановки в районе Гурьевского рейда, так как именно в этой части Северного Каспия наблюдаются динамические подвижки льда, торошение, наслоение, сжатие, что приводит к образованию крупных стамух, гряд торосов, представляющих большую опасность не только для судов, но и для гидротехнических сооружений.

Для некоторых из этих трасс в [7] были получены оценки сплоченности дрейфующего льда в месяцы с декабря по март для разных типов зим (суровая, умеренная, мягкая). Показано, что сплоченность увеличивается при ветрах южной четверти, когда происходит перемещение дрейфующего льда от прикромочной зоны к границе припая.

Важной частью трассы от порта Оля до Астраханского рейда является Волго-Каспийский морской судоходный канал (ВКМСК). Протяженность морской части канала 102 км, максимальная ширина 100 м, глубина 4,5 м [5]. В районе ВКМСК преобладают ветры восточных и юго-восточных направлений. В зимний период они способствуют поступлению в зону канала дрейфующего льда, который, уплотняясь и смерзаясь, становится препятствием для прохода судов.

В суровую зиму толщина припая в канале может достигать 35–45 см, сплоченность дрейфующего льда 7–9 баллов. В умеренную зиму толщина припая составляет 20–30 см при сплоченности дрейфующего льда 9–10 баллов, в мягкую зиму соответственно 5–10 см и 5–7 баллов. Продолжительность ледового периода в ВКМСК составляет около 50 суток в мягкие зимы и до 100 суток в суровые [9].

Характеристики ледяного покрова на судоходных трассах Северного Каспия

Характеристики ледяного покрова на трассах будем рассматривать для трех зимних сезонов: холодного и длительного 2011/2012 гг., теплого и короткого 2015/2016 гг. и умеренного 2022/2023 гг. Их длительность (наличие льда на поверхности моря) в сезон 2011/2012 гг. составила 146 дней, 2015/2016 гг. – 86, 2022/2023 гг. – 88 дней.

Максимальная толщина льда зимой 2011/2012 гг. была 50 см, зимой 2015/2016 гг. – 20 см, зимой 2022/2023 гг. – 42 см. Площадь ледяного покрова в сезон 2011/2012 гг. составила 90 000 км², 2015/2016 гг. – 46 600 км² [13].

По методике оценки площади ледяного покрова, применяемой в ФГБУ «Гидрометцентр России», площадь ледяного покрова выражается в процентах от всей площади рассматриваемой акватории. За площадь Северного Каспия принята акватория, лежащая севернее линии о. Чечень – северо-западная часть полуострова Мангышлак [9]. Согласно этой методике, максимальные значения площади ледяного покрова составили зимой 2011/2012 гг. 98 %, зимой 2015/2016 гг. – 86 %, зимой 2022/2023 гг. – 92 %.

Коротко опишем основные особенности эволюции ледяного покрова Северного Каспия в эти сезоны. Если в 2011/2012 гг. формирование ледяного покрова началось уже в третьей декаде ноября, то в 2015/2016 гг. начальные формы льда появились только во второй декаде декабря. К концу января 2012 г. почти вся акватория Северного Каспия была покрыта льдом (рис. 2а), толщина припая в северо-восточной части достигала 35 см, в 2016 г. – 20 см.

Если в феврале 2012 г. ледяной покров Северного Каспия продолжал оставаться устойчивым, то в феврале 2016 г. началось его разрушение (рис. 2б) и к середине марта лед исчез. В 2012 г. это произошло на месяц позже.

Ледообразование в 2022 г. началось в третьей декаде ноября и было очень активным в декабре. Ледовитость Северного Каспия к концу первой декады декабря составила 73 %, а в середине февраля достигла 92 % (рис. 2в). На момент максимального развития ледяного покрова преобладал тонкий однолетний и серо-белый дрейфующий лед. В дельте Волги и к востоку от дельты у побережья наблюдался обширный припай толщиной в районе Лагани – 26 см, Жамбая – 38 см, о. Пешной – 40–42 см. В третьей декаде февраля лед начал разрушаться и таять, ледовитость сократилась до 75 %, во второй декаде марта до 21 %. К концу марта на северо-востоке сохранялись отдельные стамухи, к началу апреля акватория моря полностью очистилась ото льда.

Таким образом, ледовые условия зимы 2011/2012 гг. на Северном Каспии были тяжелее ледовых условий зим 2015/2016 и 2022/2023 гг. как по ледовитости, так и по толщине льда (рис. 2).

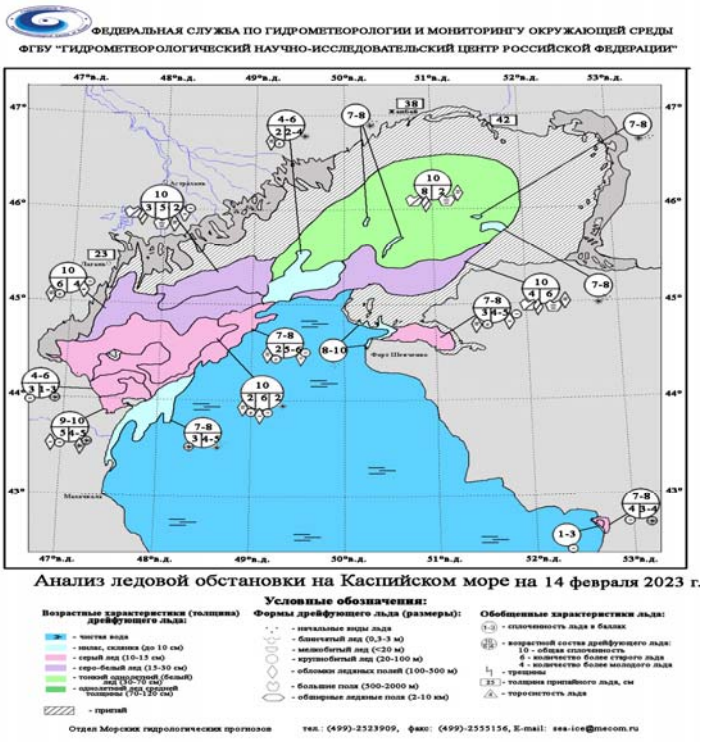
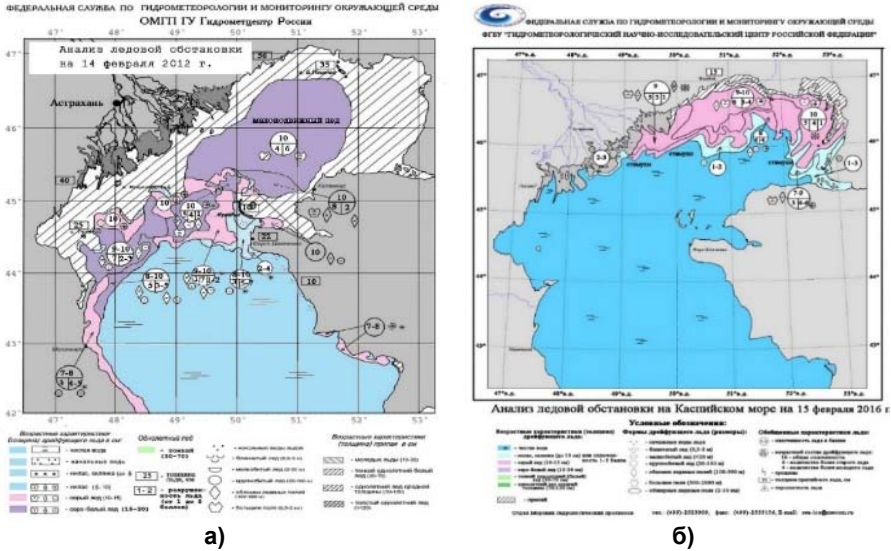


Рис. 2. Ледовая обстановка в Северном Каспии в феврале 2012 г.(а), 2016 г. (б) и 2023 г. (в).

Fig. 2. The ice situation in the Northern Caspian in February 2012 (a), 2016 (б) and 2023 (в).

Анализ толщины и сплоченности ледяного покрова в Северном Каспии

Наибольший интерес для судоходства представляют такие характеристики ледяного покрова, как толщина и сплоченность. В данной работе толщина льда H рассчитывалась на основе архива ледовых карт по формуле:

$$H = \frac{(s_1 * h_1 + s_2 * h_2 + s_3 * h_3)}{10},$$

где s_1, s_2, s_3 – частные сплоченности дрейфующего льда в исследуемой ледовой зоне; h_1, h_2, h_3 – толщины дрейфующего льда соответствующей сплоченности. На рис. 3 представлена толщина льда в Северном Каспии в зимы 2011/2012, 2015/2016 и 2022/2023 гг.

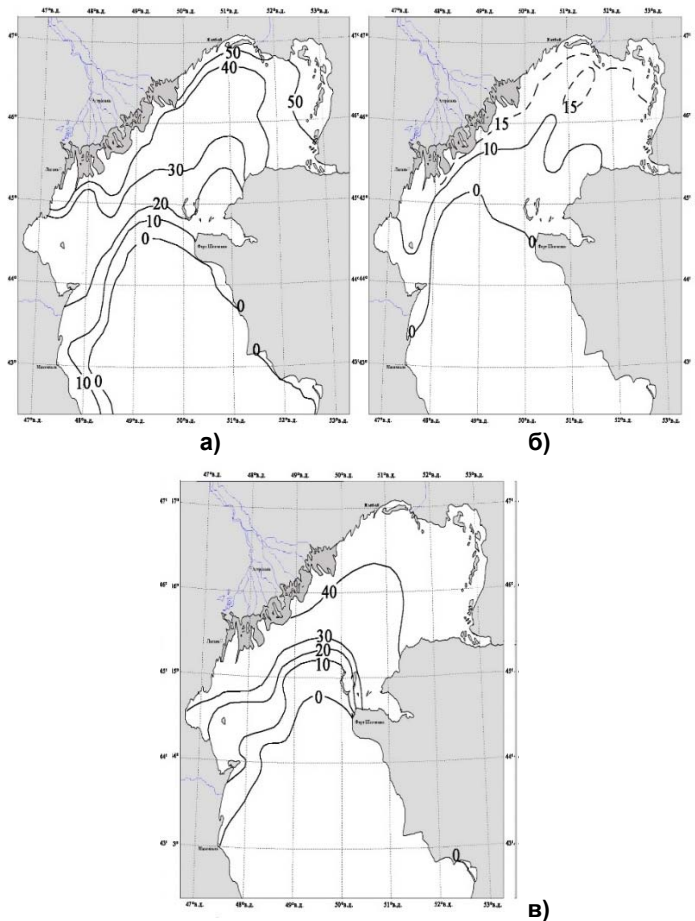


Рис. 3. Толщина льда в северной части Каспийского моря в период максимального развития ледяного покрова зимой 2011/2012 г. (а); 2015/2016 г. (б); 2022/2023 г. (в).

Fig. 3. Ice thickness in the northern part of the Caspian Sea during the period of maximum ice cover development in winter 2011/2012 (a); 2015/2016 (b); 2022/2023 (c).

Как следует из рис. 3, наиболее тяжелыми ледовые условия на всех трассах были зимой 2011/2012 гг. На трассе порт Оля – Махачкала область со льдом толщиной 30 см и больше наблюдалась от порта Оля до Астраханского рейда, включая район ВКМСК, южнее до подходов к Махачкале преобладал дрейфующий лед толщиной от 10 до 27 см. По трассе Астраханский рейд – Баутино в районе Астраханского рейда его толщина была 20–27 см, на подходах к Баутино 10–15 см. Наиболее тяжелыми условия были на трассе Астраханский рейд – Атырау, где на подходах к Атырау толщина доходила до 45–50 см.

В сезон 2015/2016 гг. льда на подходах к Махачкале не было; севернее, включая акваторию ВКМСК, толщина льда не превышала 10–15 см. По трассе Астраханский рейд – Баутино толщина льда не превышала 5 см, на подходах к Баутино льда не было. На большей части трассы Астраханский рейд – Атырау толщина льда была 10–15 см.

В сезон 2022/2023 гг. в северной части трассы порт Оля – Махачкала толщина льда достигала 30 см, в районе Астраханского рейда 7–12 см, в южной части трассы не превышала 7 см. По трассе Астраханский рейд – Баутино в области к востоку от Астраханского рейда до подходов к Баутино лед отсутствовал, на подходах к Баутино толщина льда составляла 4–6 см. На трассе Астраханский рейд – Атырау толщина льда составляла от 10 до 25 см в западной части трассы и более 30 см в области к юго-западу от Атырау.

Помимо толщины льда, важное значение для судоходства имеет сплоченность дрейфующего льда, которая на трассах в начале и в конце ледового сезона меняется достаточно быстро от 0 до 10 баллов. Увеличение сплоченности льда на 1 балл приводит к уменьшению скорости судна на 0,5 узла, а при сплоченности более 5 баллов — на 1 узел [6].

На рис. 4 представлена сплоченность дрейфующего льда толщиной 10 см и более в зимы 2011/2012, 2015/2016 и 2022/2023 гг. на момент максимального развития ледяного покрова.

Из анализа рис. 4 следует, что в зимы, близкие умеренным, области очень сплоченного льда толщиной 10 см и более имеют хорошо очерченные границы. Так, в 2011/2012 гг. область с толщиной более 10 см распространялась в западной части моря до Дербента. Зимой 2015/2016 гг. на большей части трасс сплоченность льда толщиной 10 см и более не превышала 8 баллов, за исключением северной части трассы Астраханский рейд – Атырау, где она составляла 10 баллов, но там помимо дрейфующего льда наблюдался и припай.

Зимой 2022/2023 гг. на трассе порт Оля – Махачкала до Астраханского полуострова и острова Чечень преобладал очень сплоченный дрейфующий лед. В районе Астраханского рейда сплоченность льда толщиной до 10 см не превышала 6 баллов, однако южнее возрастала от 8 до 10 баллов. При этом области с пониженной сплоченностью распространялись на северо-восток уже до параллели 46° с. ш.

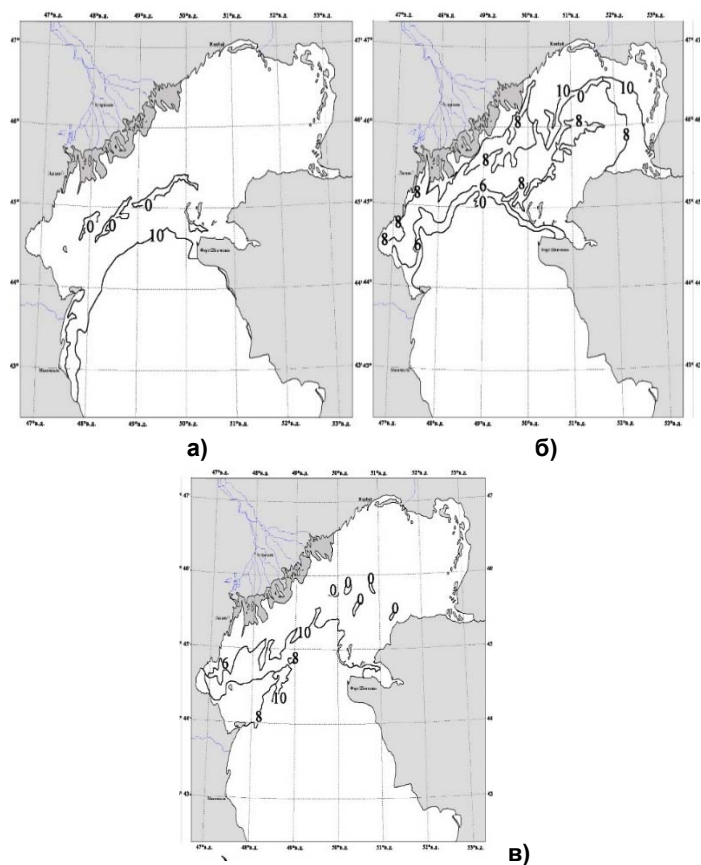


Рис. 4. Сплоченность льда толщиной 10 см и более в северной части Каспийского моря зимой 2011/2012 (а), 2015/2016 (б), 2022/2023 гг. (в).

Fig. 4. The concentration of ice with a thickness of 10 cm or more in the northern part of the Caspian Sea in the winter of 2011/2012 (а), 2015/2016 (б), 2022/2023 (в).

Таким образом, степень суровости зимы влияет не только на толщину льда, но и на его сплоченность, а значит и на стабильность ледяного покрова, особенно на самой протяженной трассе Астраханский рейд – Атырау, где в мягкие зимы сплоченность льда в 9–10 баллов может соседствовать с крупными зонами редкого и разреженного дрейфующего льда.

Суда испытывают серьезное затруднение при движении в припаях, который в зимний период занимает большие площади в акватории Северного Каспия, особенно в умеренные и суровые зимы. Так, например, в зиму 2022/2023 гг., которая относится к умеренной, площадь припая в период максимального развития ледяного покрова составила 40 % от всей акватории Северного Каспия. На спутниковом изображении космического

аппарата «Метеор-М» №2-2 отчетливо прослеживается граница дрейфующего льда и припая, который сформировался обширной зоной вдоль побережья от Кизлярского залива до полуострова Бузачи (рис. 5).

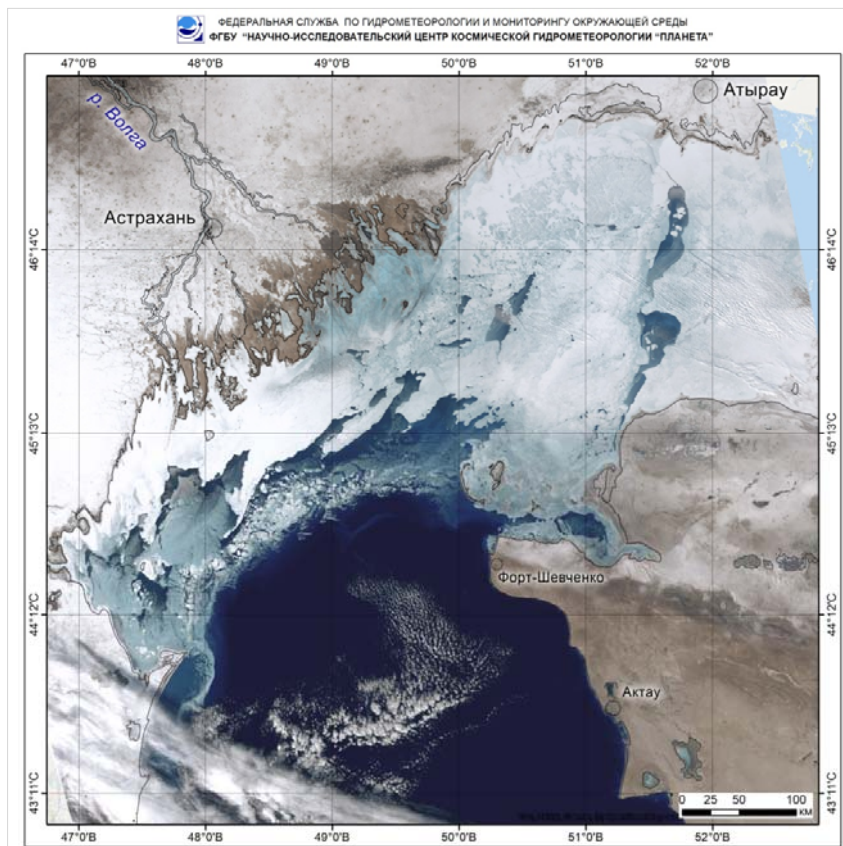


Рис. 5. Спутниковое изображение ледовой обстановки северной части Каспийского моря. ИСЗ «Метеор-М» №2-2 10 февраля 2023 г.

Fig. 5. Satellite image of the ice situation in the northern part of the Caspian Sea. Meteor-M ISS No. 2-2 February 10, 2023.

Как видно из рис. 5, на большей части трассы порт Оля – Астраханский рейд наблюдается зона обширного припая возраста от серо-белого до тонкого однолетнего льда. В то же время в западной части трассы Астраханский рейд – Баутино наблюдается зона молодого (серого, серо-белого) дрейфующего льда, в том числе дрейфующего с севера. Остальная часть трассы, как правило, даже в умеренные зимы остается свободной ото льда, за исключением подходов к Баутино, где в умеренные зимы образуется нилас и серый лед толщиной до 10 см.

На трассе Астраханский рейд – Махачкала до острова Чечень наблюдается дрейфующий молодой лед сплоченностью 8–10 баллов. Вдоль Аграханского полуострова – чистая вода, но мористее наблюдается выносимый с северо-запада ниласовый и серый дрейфующий лед, который при смене направления ветра может быть поджат к побережью Аграханского полуострова, что создаст определенные трудности для судов. Наиболее сложная ледовая обстановка складывалась на трассе Астраханский рейд – Гурьевский рейд. Особенно стоит отметить участок трассы севернее 42° с. ш., где наблюдалась обширная зона восторошенного тонкого однолетнего дрейфующего льда сплоченностью до 9–10 баллов

Также необходимо отметить, что в связи с падением уровня Каспия и уменьшением глубин в мелководной северной части моря возрастет интенсивность процессов торошения льда. Особую угрозу будут представлять сплоченные льды, выносимые ветром и течениями в среднюю часть моря и дрейфующие вдоль берегов на юг [11].

Характеристики стамух на основе спутниковой информации

Эффективным источником информации о ледовой обстановке и опасных ледяных образованиях (стамухи, торосы и др.) являются спутниковые данные [1–3, 9, 10, 12, 13]. Снимки высокого (2–50 м) пространственного разрешения позволяют определять не только местоположение (координаты) стамух, но и оценивать их геометрические размеры. Стамухи на таких изображениях выделяются среди полей дрейфующего льда своей округлой формой с «обточенными» границами и четко выраженными неоднородностями в виде нагромождений льда (парус стамух, торосы), а также тенью от них.

Дешифрирование стамух, находящихся в окружении полей дрейфующего льда, осуществляется на спутниковых снимках по следующим признакам:

- постоянное географическое положение ледяного образования относительно находящегося в движении дрейфующего льда;
- наличие вытянутого по направлению дрейфа водного пространства, образующегося на подветренной стороне стамухи. В некоторых литературных источниках находящееся за стамухой водное пространство называют «водяной тенью»;
- большое количество мелкобитого льда перед стамухой среди больших ледяных полей дрейфующего льда.

Характерной особенностью в период таяния дрейфующего льда в северной части Каспийского моря является то, что даже после очищения акватории большое количество стамух продолжает существовать довольно продолжительный период.

По результатам спутникового мониторинга во время очищения Северного Каспия в период с 10 по 26 марта 2023 г. было обнаружено более

600 стамух, в том числе в непосредственной близости от трассы Астраханский рейд – Гурьевский рейд (рис. 6). Размеры этих стамух составляли от 80 до 1180 м, длина самой большой стамухи с собственным припаем – 2689 метров.

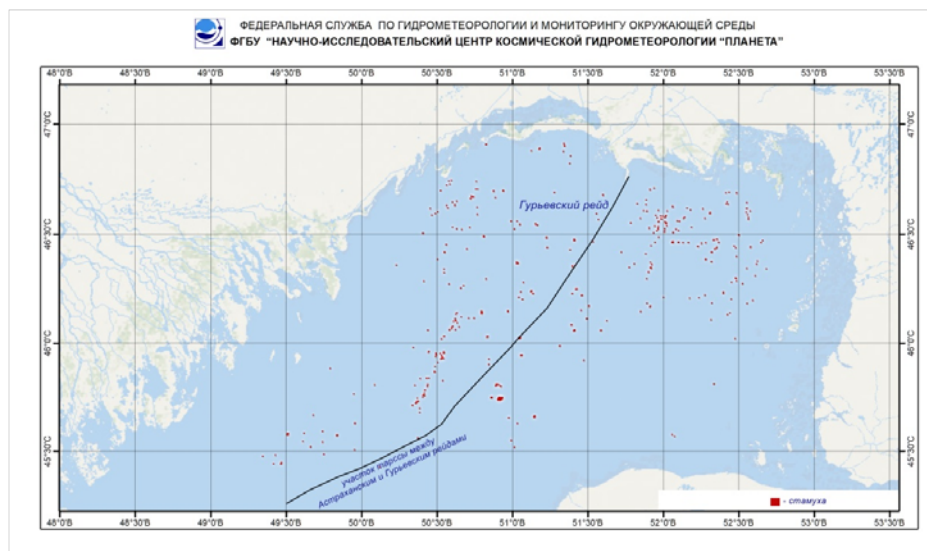


Рис. 6. Местоположение стамух в северной части Каспийского моря, обнаруженных по спутниковым данным в период с 10 по 26 марта 2023 г.

Fig. 6. The location of the stamukhas in the northern part of the Caspian Sea, detected by satellite data in the period from March 10 to March 26, 2023.

Заключение

Из анализа ледовых условий на судоходных трассах в зимние сезоны 2011/2012, 2015/2016 и 2022/2023 гг. следует, что сезон 2011/2012 гг. был самой тяжелой. Наиболее трудные ледовые условия во все сезоны наблюдаются на трассе Астраханский рейд – Атырау, а наиболее легкие – на самой короткой трассе Астраханский рейд – Баутино. Наиболее изменчивые ледовые условия характерны для трассы порт Оля – Махачкала, где в отдельные зимы южнее Астраханского рейда может наблюдаться чистая вода, а на подходах к Махачкале – сплоченный дрейфующий лед. На большей части трасс наблюдаются локальные зоны достаточно резких изменений толщины и сплоченности льда: это район Астраханского рейда и район к северо-западу от Тюленьих островов на подходах к наиболее глубокой части Северного Каспия – Уральской бороздине.

Опасными для судоходства являются такие ледяные образования, как стамухи. Даже после очищения акватории Северного Каспия ото льда

большое количество стамух продолжает существовать довольно продолжительный период. Например, в период 10–26 марта 2023 г. было обнаружено более 600 стамух, в том числе в непосредственной близости от судоходной трассы Астраханский рейд – Гурьевский рейд.

Список литературы

1. Антонюк А.Ю. Особенности океанологических процессов в Каспийском море, выявленные с помощью дистанционного зондирования // Труды ГОИН. 2014. Вып. 215. С. 302-318.

2. Асмус В.В., Василенко Е.В., Затягалова В.В., Иванова Н.П., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. Космический мониторинг ледяного покрова и состояния водной среды Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 81-95.

3. Асмус В.В., Волгутов Р.В., Дерюгина В.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Милехин О.Е., Тренина И.С. Использование космических средств и технологий для решения гидрометеорологических задач в Арктике // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 54-69.

4. Бухарицин П.И. Особенности процессов торошения ледяного покрова северной части Каспийского моря // Водные ресурсы. 1984. № 6. С. 15-123.

5. Бухарицин П.И., Болдырев Б.Ю., Новиков В.И. Система гидрометеобеспечения безопасности мореплавания на Каспии // Комплекс мероприятий по гидрометеорологическому обеспечению безопасности мореплавания и работы портов. Werlag: Palmarium Academic Publising, 2015. 318 с.

6. Валлер Ф.И. Некоторые черты ледового режима северной части Каспийского моря // Сб. работ Астраханской ГМО. 1970. № 1. С. 112-131.

7. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI. Каспийское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 359 с.

8. Глушков С.В. Планирование ледокольных проводок судов в Волго-Каспийском бассейне // Научные проблемы водного транспорта. 2018. № 56. С. 112-119.

9. Думанская И.О. Ледовые условия морей Европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.

10. Максимов А.А., Тренина И.С. Мониторинг ледяного покрова Каспийского моря по спутниковой информации // Комплексные исследования Мирового океана. 2017. С. 162-163.

11. Новиков В.И., Бухарицин П.И. Влияние гидрометеорологических факторов на работу портовых комплексов Астраханской области // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2009. № 2. С. 73-81.

12. Фролов А.В., Асмус В.В., Землянов И.В., Зильберштейн О.И. и др. Комплексные исследования гидрометеорологической и ледовой обстановки в северо-западной части шельфа Каспийского моря на основе данных спутниковых и экспедиционных наблюдений и модельных расчетов // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 20-34.

13. Lavrova O.Y., Kostianoy A.G., Mityagina M.I., Strockhov A.Y. et al. Remote sensing of sea ice in the Caspian Sea // Proc. SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, 2019. DOI: 10.1117/12.2532136.

References

1. Antonyuk A.Yu. Osobennosti okeanologicheskikh processov v Kaspijskom more, vyyavlennye s pomoshch'yu distancionnogo zondirovaniya. *Trudy GOIN*, 2014, vol. 215, pp. 302-318 [in Russ.].
2. Asmus V.V., Vasilenko E.V., Zatyagalova V.V., Ivanova N.P., Krovotyntsev V.A., Maksimov A.A., Trenina I.S. Satellite Monitoring of Sea Ice Cover and Water Parameters for the Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 686-696. DOI: 10.3103/S1068373918100084.
3. Asmus, V.V., Volgutov, R.V., Deryugina, V.V., Krovotyntsev V.A., Maksimov A.A., Milekhin O.E., Trenina I.S. Satellite Technologies Applied to Hydrometeorological Problems in the Arctic Region. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2019, vol. 44, no. 4, pp. 250-261. DOI: 10.3103/S1068373919040046.
4. Buharicin P.I. Osobennosti processov torosheniya ledyanogo pokrova severnoj chasti Kaspijskogo moray. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 1984, no. 6, pp. 15-123 [in Russ.].
5. Buharicin P.I., Boldyrev B.Yu., Novikov V.I. Sistema gidrometobespecheniya bezopasnosti moreplavaniya na Kaspii. Kompleks meropriyatij po gidrometeorologicheskomu obespecheniyu bezopasnosti moreplavaniya i raboty portov. Werlag, Palmarium Academic Publ., 2015, 318 p. [in Russ.].
6. Valler F.I. Nekotorye cherty ledovogo rezhima severnoj chasti Kaspijskogo moray. *Sb. rabot Astrahanskoy GMO*, 1970, no. 1, pp. 112-131 [in Russ.].
7. Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej. Tom VI. Kaspijskoe more. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 359 p. [in Russ.].
8. Glushkov S.V. Planning icebreaker shipments in the Volga-Caspian basin. *Nauchnye problemy vodnogo transporta [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport]*, 2018, no. 56, pp. 112-119 [in Russ.].
9. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morej Evropejskoj chasti Rossii. Moscow; Obninsk, IG-SOCIN Publ., 2014, 608 p. [in Russ.].
10. Maksimov A.A., Trenina I.S. Monitoring ledyanogo pokrova Kaspijskogo morya po sputnikovoj informacii. *Kompleksnyye issledovaniya Mirovogo okeana*, 2017, pp. 162-163 [in Russ.].
11. Novikov V.I., Bukharitsin P.I. Influence of Hydro-Meteorological factors on the work of port complexes of the Astrakhan region. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies]*, 2009, no.2, pp. 73-81 [in Russ.].
12. Frolov A.V., Asmus V.V., Zemlyanov I.V., Zil'bershtein O.I., Krovotyntsev V.A., Martyshchenko V.A., Mironov E.A. Complex studies of hydrometeorological and ice conditions on the northwestern shelf of the Caspian Sea based on satellite and expedition observational data and model calculations. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, pp. 148-158. DOI: 10.3103/S1068373909030029.
13. Lavrova O.Y., Kostianoy A.G., Mityagina M.I., Strockov A.Y. et al. Remote sensing of sea ice in the Caspian Sea. *Proc. SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2019. DOI: 10.1117/12.2532136.

Поступила 17.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.

Submitted 17.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-118-137>

УДК 633.1+551.5

Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах восточной части Сибирского федерального округа

***А.И. Страшная, А.В. Павлова,
Т.В. Кулакова, П.С. Кланг***

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

Представлены результаты исследований агрометеорологических условий и возможности использования спутниковой информации для оценки и прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах восточной части Сибирского федерального округа. Показана целесообразность использования спутниковой информации в комплексе с наземными данными для разработки метода прогноза урожайности в Красноярском крае, где установлена тесная связь урожайности с нормализованным спутниковым индексом NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В республиках Хакасия, Тыва и Иркутской области значимых связей NDVI с урожайностью не выявлено. Показано значение улучшения культуры земледелия и роль метеорологических факторов, в разной степени способствующих повышению урожайности в субъектах в период 2001–2020 гг. С использованием метода корреляционно-регрессионного анализа исследованы и отобраны метеорологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на урожайность. Представлены регрессионные модели, разработанные на основе совместного использования спутниковых и наземных данных, для прогнозирования средней урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае, а для республик Хакасия, Тыва и Иркутской области – для зерновых культур на основе наземных данных.

Ключевые слова: агрометеорологические условия, зерновые культуры, урожайность, спутниковая информация, прогноз

Agrometeorological conditions and prediction of the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the eastern Siberian Federal District

***A.I. Strashnaya, A.V. Pavlova,
T.V. Kulakova, P.S. Klang***

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

The results of studying agrometeorological conditions and the possibility of using satellite data to evaluate and predict the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the eastern part of the Siberian Federal District are presented. Reasonability of using satellite information in combination with surface data for the development of a method

for forecasting the yield in the Krasnoyarsk krai, where a high correlation between the yield and the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was found, is shown. In the Republics of Khakassia, Tyva and the Irkutsk oblast, no significant correlations between the NDVI and the yield was detected. The importance of improving agricultural standards and the role of meteorological factors differently contributing to an increase in the yield in the regions during 2001-2020 are shown. Using the correlation and regression analysis, the meteorological factors that have the greatest impact on the yield were investigated and selected. Regression models developed on the basis of the joint use of satellite and ground-based data are presented to predict the average yield of grain crops and spring wheat in the Krasnoyarsk krai, and those based on surface data are presented to predict the yield of grain crops in the republics of Khakassia, Tyva and the Irkutsk oblast.

Keywords: agrometeorological conditions, grain crops, yield, satellite data, forecast

Введение

В последние десятилетия в связи с нарастающей изменчивостью погодных и агрометеорологических условий задача оценки состояния и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур является одной из наиболее актуальных в области земледелия и экономического планирования в аграрной отрасли. Для ее решения необходимо получение достаточного количества надежных характеристик состояния посевов. Получение таких характеристик стало возможным при использовании данных спутниковых наблюдений на больших площадях в режиме реального времени, а также накопленных архивных данных, представляемых на сервисе ВЕГА-PRO, разработанном в ФГБУН «ИКИ РАН» [1, 8, 17]. Их использование оказалось достаточно эффективным для разработки методов прогноза урожайности зерновых культур, основанных на спутниковой информации или в комплексе с наземными наблюдениями. В настоящее время такие методы прогнозов урожайности зерновых культур разработаны для преобладающей территории зернового пояса на Европейской территории России [6, 9, 11, 13, 15, 16].

Для азиатской территории таких методов пока предложено мало, и они предназначены в основном для отдельных конкретных полей и административных районов. Как известно, в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «Планета», в ФГБУ «СибНИГМИ», Новосибирском государственном университете и других научных учреждениях успешно ведутся исследования по разработке и совершенствованию спутникового мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур, разработаны методы прогнозов урожайности отдельных зерновых культур для Западной Сибири [10], в основном яровой пшеницы. В [3] предложена математическая модель развития растений для прогноза урожайности яровой пшеницы с использованием спутниковых данных по ряду южных районов Западной Сибири, позволяющая прогнозировать урожайность в разрезе поля за месяц до уборки с точностью 1–2 ц/га. В разработанной регрессионной прогнозностической модели [2] для отдельных культур (пшеница, картофель, овощи) используются спутниковые данные (набор вегетационных индексов),

например, значения NDVI в период вегетации. В [19] излагается метод прогноза урожайности яровой пшеницы (и построение карт урожайности) на полях Сухобузимского района Красноярского края, основанный на спутниковых и беспилотных данных, что оказалось весьма полезным для конкретных хозяйств.

Использование ДЗЗ и беспилотных аппаратов, по данным [21], является перспективным для точного земледелия, так как позволяет детально проанализировать состояние посевов на конкретных полях, выявить неоднородность посевов и участки, где необходимо провести агрохимобработку, подкормку и др., т. е. можно непосредственно управлять процессом производства продукции. Это, на наш взгляд, особенно важно для территорий со сложным рельефом, таких как субъекты восточной части Сибирского федерального округа (СФО). Нами [14] предложен метод прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур, основанный на наземных и спутниковых данных по субъектам западной части СФО и юга Урала. Для субъектов восточной части СФО аналогичные методы средней по субъектам урожайности, необходимые для руководства и управления АПК, пока не разработаны, хотя они имеют важное значение для этих территорий, так как являются значимой поддержкой для решения проблем самообеспечения регионов, определения необходимых объемов межрегиональных обменов, а также планирования рынков сбыта (закупки) продукции. Имеющиеся для этой территории методы прогноза урожайности зерновых культур, используемые в настоящее время в Росгидромете, разработаны по наземным данным в основном в восьмидесятые годы и во многих случаях имеют низкую оправдываемость, что вызвало необходимость создания новых методов, разработанных на основе современных (изменившихся) агроклиматических условий в последние десятилетия и изменившейся культуры земледелия [4, 7]. Кроме того, в данной работе, которая является продолжением исследований по теме 1.1.1.7 плана НИР Росгидромета, ставилась задача изучения возможности использования спутниковой информации для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур в субъектах восточной части СФО.

В восточную часть СФО входят Красноярский край, республики Хакасия и Тыва, Иркутская область. На территории этих субъектов зерновые культуры возделываются на площади около 1450,0 тыс. га, что составляет 16 % всей посевной площади этих культур в СФО. Из них более 10 %, или около 950,0 тыс. га, приходится на Красноярский край, около 430,0 тыс. га (примерно 5 %) на Иркутскую область; в республиках Хакасия и Тыва площади зерновых культур небольшие и составляют, соответственно, около 80,0 и 15,0 тыс. га. Вклад этих субъектов в валовой сбор зерна в СФО составляет в среднем за последние пять лет 3,4 млн т, или более 21 % валового сбора зерна в округе. Изменчивость средней урожайности в субъектах значительна, коэффициенты вариации составляют от 19 до 32 %. Сильно

колеблются по годам и валовые сборы зерна. В Красноярском крае, например, где урожайность самая высокая в округе [18], наиболее низкий за рассматриваемый нами период 2001–2020 гг. валовой сбор зерна (1,49 млн т) наблюдался в 2006 году, когда первая половина вегетационного периода была засушливой, а максимальный сбор зерна (2,67 млн т) получен в достаточно благоприятном по погодным условиям 2020 году.

При анализе динамики урожайности зерновых культур за рассматриваемый период выявлено, что значительный рост урожайности наблюдался во всех субъектах восточной части СФО. Наибольшим он был в Республике Хакасия, где урожайность от начала к концу периода увеличилась на 10,7 ц/га, в Красноярском крае она увеличилась на 8,9 ц/га, а в Республике Тыва и Иркутской области, соответственно, на 6,1 и 5,8 ц/га. Скорость роста урожайности (погодичный прирост) составляла в субъектах в основном от 0,33 до 0,54 ц/га. Приведенные данные указывают на большое значение улучшения культуры земледелия (использование новых сортов с более высоким потенциалом продуктивности, применение инновационных технологий). Коэффициенты детерминации (R^2) уравнений трендов, рассчитанных нами в виде полиномов первой или второй степени, составляли в основном 0,50–0,68, что также свидетельствует о большом значении культуры земледелия. Однако и отклонения урожайности от тренда (ΔY) по годам за счет погодных условий были значительными даже в смежные годы, когда культура земледелия практически не менялась. Как показал анализ трендов и метеоусловий, чаще всего большие отрицательные отклонения наблюдались при ухудшении условий увлажнения в июне или в мае-июне. Так, например, в Иркутской области в благоприятный по погодным условиям 2013 год (количество осадков в июне более чем на четверть превысило норму, а ГТК₆ составлял 1,55) средняя урожайность зерновых культур была 20,1 ц/га, а в 2015 г., когда в июне осадков выпало значительно меньше нормы, – 16,4 ц/га. В Республике Хакасия в 2019 г., когда июнь был теплым и влажным, ГТК₆ составлял 1,46, урожайность была 19,4 ц/га, а в смежном 2018 г. при дефиците осадков в июне наблюдалась атмосферная засуха средней интенсивности (ГТК₆ = 0,73) и урожайность была всего 12,3 ц/га. В Красноярском крае в недостаточно влажном в первый период вегетации 2018 году в июне также наблюдалась атмосферная засуха (ГТК₆ = 0,64) и урожайность составила 20,5 ц/га, а в достаточно влажном 2020 г, когда в июне осадков выпало в два раза больше нормы (103 мм), – 28,8 ц/га. По данным [20], при засухах в июне средней интенсивности (ГТК₆ = 0,61–0,80) урожайность зерновых культур может снижаться на 20–25 % и более. В приведенных нами примерах по Иркутской области, Республике Хакасия, Красноярскому краю в засушливых условиях урожайность снижалась, соответственно, на 22, 37 и 27 %. Для определения вероятности снижения урожайности в годы, когда в июне наблюдается засуха средней интенсивности, нами рассчитана повторяемость таких засух (ГТК₆ = 0,61–0,80) за период 2001–2020 годов.

Из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод о том, что атмосферные засухи в июне (когда можно ожидать существенное снижение урожайности) в Красноярском крае и Иркутской области наблюдаются 2–3 раза в 10 лет, в Республике Хакасия – 1 раз, а в Республике Тыва – 4 раза в 10 лет. Повторяемость слабых засух в отдельных субъектах (например, в Республике Тыва) также значительна, но их влияние на урожайность было небольшим.

Таблица 1. Повторяемость атмосферных засух средней (ГТК = 0,61–0,80) и слабой (ГТК = 0,81–0,99) интенсивности в июне в субъектах СФО

Table 1. The frequency of medium- (HTC = 0.61–0.80) and low-intensity (HTC = 0.81–0.99) atmospheric droughts in the SFO subjects in June

Территория	Значения ГТК ₆			
	0,61–0,80		0,81–0,99	
	число случаев	%	число случаев	%
Красноярский край	3*	15	4	20
Иркутская область	5**	25	3	15
Республика Хакасия	2	10	1	5
Республика Тыва	8***	40	7	35

Примечание. * Из них одна сильная, ** две сильных, *** четыре сильных (ГТК₆ ≤ 0,60)

Проведенный анализ динамики тепло- и влагообеспеченности зерновых культур за период с 2001 по 2020 год в основной период вегетации (май-июнь) выявил улучшение условий увлажнения, так как ГТК₅₋₆ от начала к концу периода в основном увеличился на 0,26–0,86, а ГТК₆ в большинстве субъектов (кроме Красноярского края) – на 0,10–0,58 (табл. 2). Это, как и повышение культуры земледелия, способствовало росту урожайности в рассмотренный период. Положительным было и снижение (кроме Иркутской области) средней за май-июнь температуры воздуха (Т₅₋₆). Однако сдерживающим, или негативным фактором в большинстве субъектов, особенно в Красноярском крае и Иркутской области, где большие посевные площади, оказалось повышение температуры воздуха в июне (Т₆), а это наиболее важный период для формирования колоса яровых зерновых культур, преобладающих в регионе (табл. 2). Таким образом, анализ трендов урожайности и метеорологических условий в рассмотренный период показал, что при разработке метода прогноза урожайности зерновых культур необходимо учитывать две составляющие урожайности: рост урожайности за счет улучшения культуры земледелия и колебания урожайности вследствие складывающихся погодных условий в конкретные годы.

Таблица 2. Изменение условий увлажнения в июне (ГТК₆), в мае-июне (ГТК₅₋₆) и температуры воздуха в июне (Т₆, °С) и в мае-июне (Т₅₋₆, °С) в субъектах СФО

Table 2. The change in moistening conditions in June (HTC₆), May-June (HTC₅₋₆) and air temperature in June (T₆, °C) and May-June (T₅₋₆, °C) in the SFO subjects

Значения метеорологических элементов по тренду (2001–2020 гг.)							
2001-2020	Разница	2001-2020	Разница	2001-2020	Разница	2001-2020	Разница
Т₆°С		ГТК₆		Т₅₋₆°С		ГТК₅₋₆	
Красноярский край							
16,9-17,2	0,30	1,31-1,08	-0,23	13,6-12,9	-0,7	1,32-1,76	0,44
Республика Хакасия							
17,8-17,0	-0,80	1,22-1,80	0,58	14,6-13,9	-0,7	1,51-2,37	0,86
Республика Тыва							
16,6-16,7	0,10	0,81-0,96	0,15	13,5-13,2	-0,3	0,80-0,85	0,05
Иркутская область							
16,5-16,8	0,33	1,22-1,32	0,1	12,8-12,9	0,1	1,27-1,53	0,26

Поскольку в работе ставилась задача исследовать возможность использования спутниковой информации для разработки метода прогнозирования урожайности зерновых культур в субъектах восточной части СФО, нами была сформирована база данных спутниковых наблюдений за 2001–2020 гг. В нее вошли архивные и текущие осредненные по субъектам значения одного из наиболее распространенных индикаторов роста и плотности посева – вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), а также урожайность зерновых культур по данным Росстата (с убранный площади). На рис. 1 приведена динамика средних многолетних значений NDVI, рассчитанных нами за указанный период. Можно видеть существенные различия в ходе кривых, описывающих динамику NDVI в субъектах в течение вегетационного периода, а также разницу средних максимальных значений этого показателя. В Красноярском крае, который по данным [18] «является лидером по урожайности зерновых культур в СФО», максимальное значение NDVI составляет (в среднем за рассмотренный период) 0,75, т. е. даже выше, чем в субъектах Западной Сибири [14].

В Иркутской области, занимающей второе место по уровню урожайности в СФО, максимальное значение NDVI составляет 0,71, а в республиках Хакасия и Тыва, где урожайность зерновых культур сравнительно низкая, соответственно, 0,63 и 0,50. Таким образом, можно полагать, что на рассматриваемой территории средние максимальные значения NDVI, на наш взгляд, в определенной степени характеризуют потенциальные возможности для формирования урожая в конкретных почвенно-климатических условиях субъекта. Отмечаются и различия в сроках наступления

средних максимальных значений: в Красноярском крае максимум NDVI отмечается в 27 неделю вегетации (отсчет недель с начала календарного года), в Республике Хакасия и Иркутской области – в 28 неделю, а в Республике Тыва – в 30 неделю.

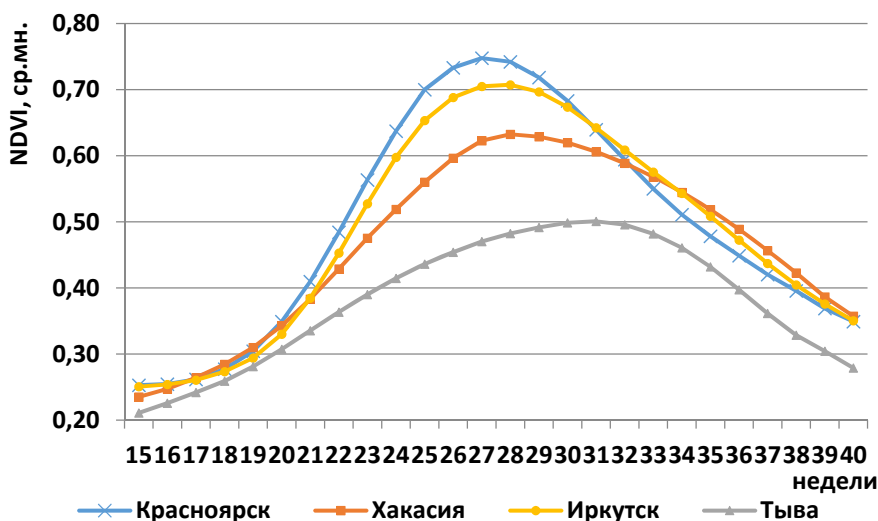


Рис. 1. Динамика средних многолетних значений NDVI по неделям вегетации в субъектах СФО (2001–2020 гг.).

Fig. 1. The dynamics of average long-term NDVI for different vegetation weeks in the SFO subjects (2001–2020)

Выше мы отмечали большую разницу в уровне урожайности зерновых культур в разные по погодным условиям (даже смежные) годы. В результате проведенных исследований выявлено, что и максимальные значения NDVI в такие годы сильно различаются. Так, в Красноярском крае, где, как сказано ранее, самые большие посевные площади зерновых культур, в благоприятный по погодным условиям 2020 год максимальное значение NDVI составило 0,77, или 103 % от среднего многолетнего максимума, а в неблагоприятный 2018 год – 0,71–95 % (рис. 2).

По данным [17], по величине отклонений NDVI от среднего многолетнего значения можно на качественном уровне делать выводы о состоянии посевов. При этом положительное отклонение свидетельствует о том, что состояние посевов зерновых культур лучше среднего в данном субъекте и наоборот. Понятно, что основное значение для формирования продуктивности зерновых культур имеют складывающиеся погодные условия, в которых происходит рост и развитие растений, формирование биомассы и колоса и в конечном итоге – урожайности [4, 20]. Так, на рис. 2 показано, что в 2018 г. в июне осадков выпало лишь 53 %, а в 2020 г. – 170 % нормы,

ГТК₆ в 2020 г. составил 169 %, а в 2018 г. – только 52 % нормы. Средняя температура воздуха в 2020 г. была ниже нормы (91 %), а в 2018 г. на 15 % превысила норму. В итоге, как отмечалось выше, урожайность зерновых культур в среднем по краю в 2020 г. была 28,8 ц/га, а в 2018 г. – лишь 20,5 ц/га.

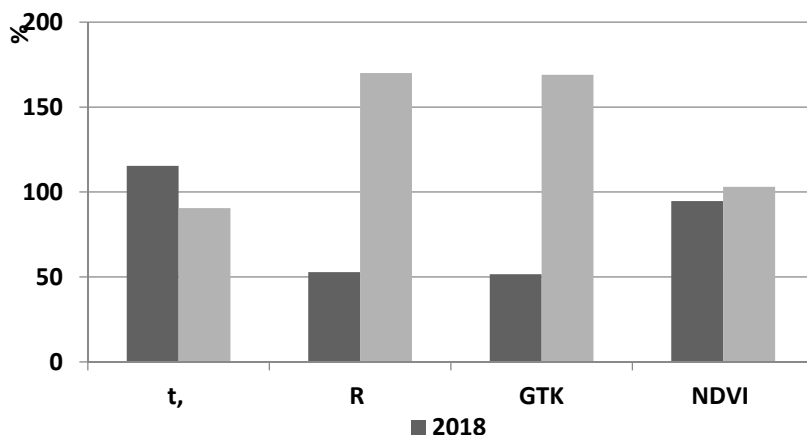
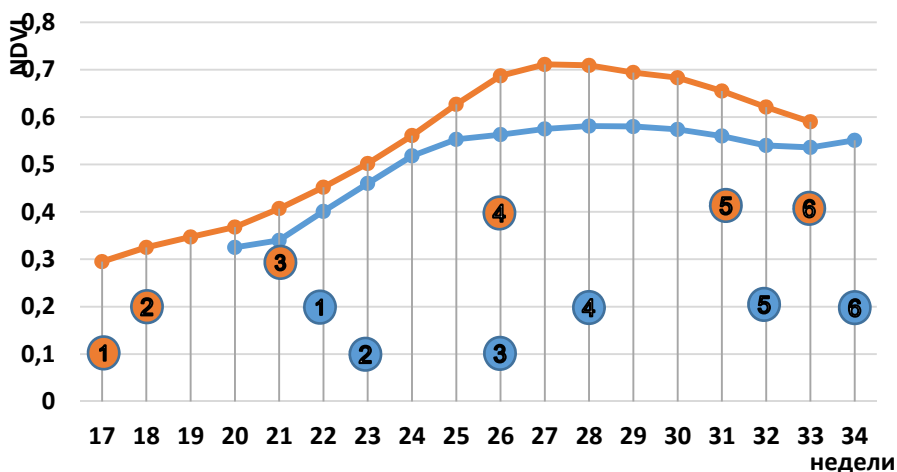


Рис. 2. Значение метеорологических факторов и NDVI (в % от средних многолетних) в июне 2018 и 2020 гг. в Красноярском крае.

Fig. 2. The values of meteorological factors and NDVI (% of the normal) in June in 2018 and 2020 in the Krasnoyarsk krai.

Проведенные исследования показали, что в субъектах, где площади зерновых культур небольшие, на конкретных полях сравнительно четко прослеживается связь агрометеорологических условий с NDVI в период формирования колоса (фазы «выход в трубку – колошение») в разные по погодным условиям годы (рис. 3). Так, в 2018 г. в Республике Хакасия (данные опорной ГМС Таштып) средняя температура воздуха за период «выход в трубку – колошение» составила 19,4 °С, количество осадков – 17,7 мм, а продолжительность этого периода составила всего 16 дней. В 2020 г. средняя за аналогичный период температура воздуха составила 15,1 °С, количество осадков – 33,5 мм, а продолжительность этого периода оказалась почти вдвое больше, что способствовало образованию количества колосков в колосе на 15 % больше средних значений и, следовательно, более высокому урожаю яровой пшеницы (23,1 ц/га, тогда как в 2018 г. урожайность была 12,9 ц/га).

Такие резко различные агрометеоусловия адекватно отражали состояние растений и значения NDVI. На даты колошения пшеницы значение NDVI в 2020 г. было 0,76, а в 2018 г. – только 0,59, т. е. почти на 20 % меньше. Однако в большинстве лет существенных различий не наблюдалось.



1 - "сев", 2 - "всходы", 3 - "выход в трубку", 4 - "колошение", 5 - "восковая спелость", 6 - "полная спелость" — 2018

Рис. 3. Динамика NDVI по неделям вегетации и фазы развития яровой пшеницы в Республике Хакасия (ГМС Таштып) в 2018 и 2020 гг.

Fig. 3. The NDVI dynamics for different vegetation weeks and the phases of spring wheat development in the Republic of Khakassia (Tashtyp weather station) in 2018 and 2020.

В исследованиях по разработке метода прогноза средней по субъектам урожайности зерновых культур связи урожайности с NDVI определялись на основе построенных матриц парных коэффициентов корреляции между урожайностью и значениями NDVI по неделям вегетации по всем четырем субъектам восточной части СФО за период 2001–2020 гг. Использовались архивные данные – осредненные по субъектам значения вегетационного индекса NDVI.

Исследовалась теснота связей средней по субъекту урожайности (Y , ц/га) и аномалии урожайности зерновых культур, т. е. отклонений урожайности от трендов (ΔY , ц/га), по указанным субъектам (по Красноярскому краю также Y и ΔY по яровой пшенице) с NDVI за указанный период по неделям вегетации. Оказалось, что значимые и тесные связи NDVI с урожайностью зерновых культур и яровой пшеницы наблюдались лишь в Красноярском крае, где зерновые культуры занимают 63 % всех пахотных земель, из них более 62 % площади занимает яровая пшеница. В Иркутской области, где посевные площади почти вдвое меньше, близкая к значимой связь проявлялась лишь в 24 неделю вегетации ($r = 0,42$), а значимой ($r = 0,46$) она становилась только в 25 неделе. В республиках Хакасия и Тыва, где посевные площади небольшие, сложная орография территории и относительно малые пространственные масштабы погодных условий, за рассматриваемый период тесных связей средней урожайности зерновых культур (и даже близких к значимым) с NDVI вовсе не выявлено. На рис. 4

для наглядности показана связь урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае и урожайности зерновых культур в Иркутской области с NDVI (динамика коэффициентов корреляции) за период 2001–2020 гг. по неделям вегетации.

Следует отметить, что наиболее тесная связь урожайности зерновых культур с NDVI в Красноярском крае отмечается в 25 неделю вегетации ($r = 0,52$), а с урожайностью яровой пшеницы – в 26 неделю ($r = 0,56$), что, по-видимому, можно объяснить более поздними сроками сева преобладающей в крае пшеницы, чем, например, овса, ячменя, гороха, входящих в группу всех зерновых культур. Кроме того, в эту группу входят и озимые культуры, которые весной раньше яровых культур начинают активно вегетировать, так как их сев, появление всходов и кущение происходит осенью предшествующего года [12]. Таким образом, можно сделать вывод, что использование NDVI для разработки метода прогноза средней по субъекту урожайности зерновых культур, а также яровой пшеницы, целесообразно лишь в Красноярском крае. При этом необходимо выявить и влияние погодных условий.

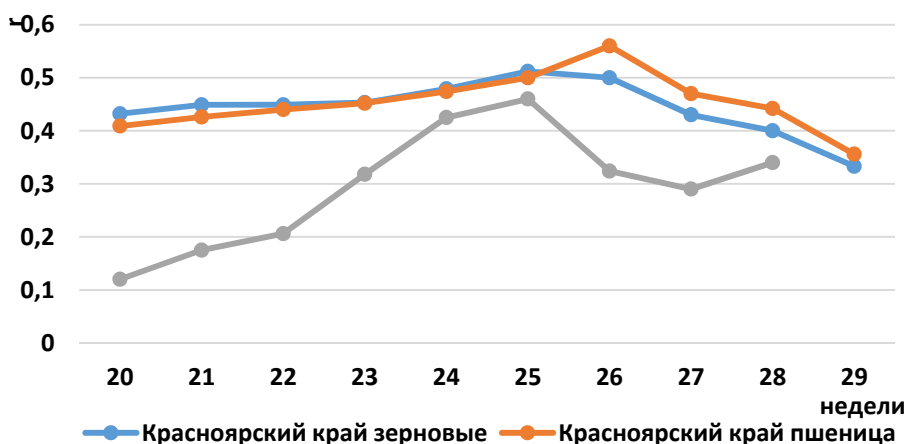


Рис. 4. Связь урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае и зерновых культур в Иркутской области с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) по неделям вегетации (2001–2020 гг.).

Fig. 4. The correlation of the yield of grain crops and spring wheat in the Krasnoyarsk krai and grain crops in the Irkutsk oblast with the NDVI (the dynamics of correlation coefficients r) for different vegetation weeks (2001–2020).

Для оценки влияния погодных условий на урожайность зерновых культур использовались следующие метеорологические показатели: средняя по субъектам температура воздуха (t), количество осадков (R'), дефицит влажности воздуха (d), гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) по месяцам вегетационного периода май– июль (ГТК₅, ГТК₆, ГТК₇),

а также по отдельным отрезкам этого периода: май–июнь (ГТК₅₋₆) и май–июль (ГТК₅₋₇). На основе построенных корреляционных матриц, как и при исследовании связей с NDVI, определялась теснота связей этих показателей не только с урожайностью $У$, но и с $\Delta У$, т. е. с аномалией урожайности (отклонениями урожайности от построенных по субъектам линейных трендов) зерновых культур по всем четырем субъектам (а по Красноярскому краю – и с $У$ и $\Delta У$ яровой пшеницы).

Оказалось, что в Красноярском крае связи указанных выше метеорологических показателей с урожайностью и аномалией урожайности были несколько более тесными по яровой пшенице, чем по зерновым культурам. Это можно объяснить тем, что в группу зерновых культур, как отмечалось выше, входят разные культуры, у которых “критические” периоды по отношению к метеорологическим условиям разные, в том числе и в связи с разными сроками сева. При этом в Красноярском крае связи метеоусловий с $\Delta У$ пшеницы, как и с $\Delta У$ зерновых культур, были несколько более тесными, чем с $У$. В остальных субъектах более тесные связи метеорологических показателей были с $У$, а не с $\Delta У$. Следует отметить, что практически во всех субъектах значимые и наиболее тесные связи $У$ с метеорологическими показателями наблюдались в июне, лишь в отдельных субъектах в мае, а в Республике Тыва – в июле.

На рис. 5а показана связь аномалии урожайности зерновых культур $\Delta У$ в Красноярском крае с ГТК₆, которая характеризуется высоким коэффициентом корреляции r , равным 0,766. При этом следует отметить, что большие положительные отклонения урожайности от тренда наблюдались в основном при значениях ГТК₆, равных 1,2–2,2. Связь урожайности $У$ с этим показателем была менее тесной ($r = 0,523$). Аналогичной, но несколько менее тесной, чем с ГТК₆, проявилась связь $\Delta У$ в Красноярском крае и с количеством осадков в июне (R_6). С температурой и дефицитом влажности воздуха в июне связь была обратной (отрицательной). С $\Delta У$ связь характеризовалась значениями r , равными -0,476 и -0,536, а с $У$, соответственно, -0,418 и -0,362, т. е. при значимом для двадцатилетнего ряда $r \geq 0,432$ связи этих показателей с $У$ были лишь близкими к значимым или не значимы.

Проявление более тесных связей метеорологических элементов с $У$, чем с $\Delta У$, характерно для Республики Хакасия, Иркутской области, а в Республике Тыва наиболее тесные связи метеопоказателей с $У$ характерны лишь для июля. На рис. 5б показана зависимость урожайности зерновых культур в Республике Хакасия от средней за июль температуры воздуха. Отметим, что наиболее высокая урожайность наблюдается при средней за июль температуре воздуха ниже 17 °С. Теснота этой связи характеризуется r , равным 0,624. В Иркутской области тесная связь урожайности $У$ зерновых культур наблюдалась со средним ГТК за май–июнь (ГТК₅₋₆) и за май–июль (ГТК₅₋₇).

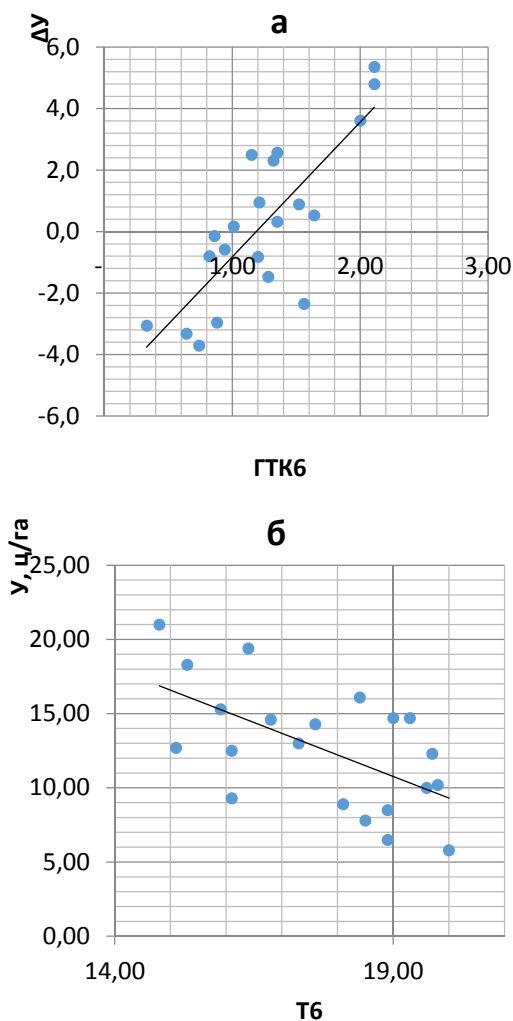


Рис. 5. Зависимость аномалии урожайности зерновых культур ΔY от гидро-термического коэффициента увлажнения в июне (ГТК₆) в Красноярском крае (а); урожайности зерновых культур Y от средней температуры воздуха в июне (Т₆) в Республике Хакасия (б).

Fig. 5. The dependence of (a) the anomaly of the grain crop yield ΔY on the hydro-thermal coefficient in June (ГТК₆) in the Krasnoyarsk krai; (b) the yield of grain crops Y on the average air temperature in June (Т₆) in the Republic of Khakassia.

Разработка метода прогноза средней по субъектам урожайности зерновых культур в субъектах восточной части СФО проводилась с учетом результатов проведенного регрессионно-корреляционного анализа и установленных связей Y и ΔY зерновых культур (по Красноярскому краю –

и яровой пшеницы) с NDVI и метеорологическими показателями. В связи с тем, что в республиках Хакасия, Тыва и Иркутской области значимых связей U и ΔU с NDVI не выявлено (в Иркутской области значимой связью оказалась лишь в одну, 25 неделю), метод прогноза урожайности зерновых культур по этим трем субъектам разрабатывался по наземным данным. Отбор метеопараметров для построения регрессионной прогностической модели производился с учетом их значимых связей (на 5%-ном уровне) с урожайностью. На первом этапе было получено простое линейное уравнение: регрессионная модель, где в качестве параметров использовались в Иркутской области t_5 и ГТК₅, в Республике Хакасия – t_6 и ГТК₆, а в Республике Тыва – T_7 и ГТК₇.

В качестве примера приведем регрессионную модель для прогноза урожайности в июне по Иркутской области:

$$y = 1,804 \text{ ГТК}_5 - 0,110 t_5 + 15,86; R = 0,563.$$

Однако полученные такого вида модели оказались неустойчивыми, авторская проверка за 2017–2021 гг. показала невысокие результаты. Средняя оправдываемость прогнозов за 5 лет составила 74–79 %.

Выше мы отмечали большое значение культуры земледелия для формирования урожая, о чем свидетельствовали хорошо выраженные тенденции роста урожайности. Для учета этой тенденции в линейные регрессионные модели, полученные только на основе метеорологических данных, вводились порядковые номера года (n), т. е. тренд ($n - \text{Утр}$), который в общем виде отражает ежегодный прирост урожайности в субъектах. Эти модели оказались достаточно устойчивыми, множественные коэффициенты корреляции составляли от 0,831 до 0,907. Модели разработаны для прогнозов урожайности зерновых культур в Иркутской области, республиках Хакасия и Тыва для первого срока составления прогнозов урожайности, принятого в Росгидромете (3 декада июня) и для второго срока (3 декада июля). Эти прогностические модели приведены в табл. 3.

Приведенные линейные регрессионные прогностические модели урожайности, основанные на метеорологических данных и учете культуры земледелия, по результатам авторских испытаний в соответствии с Инструкцией [5] на зависимых (2017–2020 гг.) и независимых (2021 г.) данных показали хорошую оправдываемость – от 83 до 95 %.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае, где большие посевные площади, весьма целесообразным, как показали результаты проведенных исследований, оказалось использование спутниковых данных (NDVI). Тесная наиболее значимая связь урожайности зерновых культур в крае с NDVI (см. рис. 4) проявляется уже в 21 неделю вегетации, а наиболее тесной она была в 25 неделю, когда значение коэффициента корреляции r было равным 0,522. Для пшеницы наибольшая теснота связи наблюдалась в 26 неделю ($r = 0,556$).

Таблица 3. Регрессионные модели для прогноза урожайности (Y, ц/га) зерновых культур в первый (I) и второй (II) сроки составления прогнозов по субъектам СФО

Table 3. The regression models for the grain crop yield prediction (Y, centner/ha) at the first (I) and second (II) moments of the forecast preparation for the SFO subjects

Срок прогноза	Субъект РФ	R
Иркутская область		
I	$Y = -0,122t_5 + 0,871ГТК_5 + 0,294n + 14,307^*$	0,831
II	$Y = -0,167t_5 + 1,974 ГТК_{5-7} + 0,287n + 13,223^*$	0,847
Республика Хакасия		
I	$Y = -0,316t_6 + 1,401ГТК_6 + 0,497n + 10,552^*$	0,886
II	$Y = -0,949t_7 + 2,204ГТК_6 + 0,447n + 22,588^*$	0,907
Республика Тыва		
I	$Y = 0,054t_7 + 3,904ГТК_7 + 0,180n + 2,176^*$	0,837
II	$Y = -0,67t_7 + 0,052R'_7 + 0,217n + 16,181^*$	0,857

Примечание. t_5 – средняя температура воздуха за май; t_6 – за июнь; t_7 – за июль; ГТК₅ – гидротермический коэффициент увлажнения за май, ГТК₆ – за июнь, ГТК₇ – за июль; ГТК₅₋₇ – за май-июль; R'_7 – сумма осадков за июль; n – порядковый номер года (n=1 для 2001 г.); * – свободный член; R – коэффициент множественной корреляции.

Как было сказано ранее, большое значение для формирования урожая имеют метеорологические показатели тепло- и влагообеспеченности первого периода вегетации. В Красноярском крае также большое значение имеет и культура земледелия, что показали и хорошо выраженные тренды урожайности (ежегодный прирост урожайности в крае составляет 0,47 ц/га). В связи с этим при разработке метода прогноза урожайности зерновых культур, а также яровой пшеницы в Красноярском крае, в использованном нами подходе прогностическая урожайность (У_п), как и в работе [15], рассматривалась как сумма двух составляющих: $У_{пр} = У_{тр} + \Delta Y$, где $У_{тр}$ – детерминированная составляющая, определяемая в основном культурой земледелия, или тренд. В данной работе эта составляющая описывалась в основном уравнениями полинома первой степени вида $y = ax + c$ или полинома второй степени $y = ax^2 + bx + c$, так как они достаточно адекватно отражают повышение урожайности в крае как зерновых культур в целом ($R^2 = 0,55$), так и яровой пшеницы ($R^2 = 0,62$).

Автоматизированный расчет трендовой составляющей урожайности $У_{тр}$ входит в состав алгоритма, имеющегося на рабочем месте агрометеоролога-прогнозиста в Гидрометцентре России для расчета прогностиче-

ской величины урожайности. ΔY – случайная величина, зависящая главным образом от складывающихся агрометеорологических условий и состояния посевов по данным спутниковых измерений в текущем году (год прогноза). Метеорологические параметры прогностических моделей для расчета ΔY , как и значения NDVI, отбирались с учетом тесноты их связей с урожайностью (критерий отбора $r \geq 0,43$) и в основном в декады (недели), близкие к принятым срокам составления прогнозов.

Разработанные регрессионные прогностические модели для Красноярского края, основанные на комплексировании наземных и спутниковых данных, для прогнозов урожайности зерновых культур и яровой пшеницы, а также моделей для прогнозов урожайности зерновых культур, разработанные по наземным данным для республик Хакасия, Тыва и Иркутской области, значимы (как показала проведенная проверка по критерию Фишера), а коэффициенты при переменных значимы по критерию Стьюдента на 5%-ном уровне. Разработанные модели для зерновых культур и пшеницы представлены в табл. 4 для первого (3 декада июня) и второго (3 декада июля) сроков составления прогнозов.

Таблица 4. Регрессионные модели для прогноза урожайности (ΔY , ц/га) зерновых культур и яровой пшеницы в первый (I) и второй (II) сроки составления прогнозов по Красноярскому краю

Table 4. The regression models for the prediction of the yield (ΔY , centner/ha) of grain crops and spring wheat at the first (I) and second (II) moments of the forecast preparation for the Krasnoyarsk krai

Срок прогноза	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	C	R
Зерновые культуры								
I	-0,232	0,081			-0,299		-0,804	0,713
I	-0,008*		4,193		0,834		-5,695	0,699
II			5,152	0,534		21,413	-26,710	0,787
Яровая пшеница								
I	0,276	0,093				40,814	-40,862	0,712
II			6,370	0,934		22,549	-32,291	0,85

Примечание. Коэффициенты регрессии при a_1 – температуре воздуха за июнь t_6 , * за май t_5 ; a_2 – сумме осадков за июнь R'_6 ; a_3 – гидротермическом коэффициенте увлажнения за июнь ГТК₆; a_4 – дефиците влажности воздуха в июне d_6 ; a_5 – при $NDVI_{25}^{зерн.}$; a_6 – при $NDVI_{27}^{зерн.}$; C – свободный член; R – коэффициент множественной корреляции.

Проверка разработанных прогностических моделей урожайности на зависимых материалах (2001–2020 гг.) и независимых (2001 г.), проведенная в соответствии с Инструкцией [5], показала их достаточную

надежность. Ошибки прогнозов, рассчитанных с учетом двух составляющих урожайности – Утр и ΔY , были в основном в пределах 4–13 %, в отдельные годы (преимущественно в начале периода) – до 18 % по зерновым культурам и до 16 % – по яровой пшенице.

Заключение

Проведенные исследования агрометеорологических условий вегетации зерновых и зернобобовых культур в весенне-летний период в субъектах восточной части СФО выявили тенденции их изменения в период с 2001 по 2020 г., а также влияние этих условий на формирование урожайности. Установлено, что влияние на урожайность оказывают погодные условия в период сева преобладающих в этих районах яровых зерновых культур (май) и в период формирования генеративных органов (июнь). Показано, что в рассмотренный период наблюдалось некоторое улучшение условий увлажнения: ГТК₅₋₆ увеличился от начала к концу периода в основном на 0,26–0,44 (в Республике Хакасия на 0,86), а средняя температура T_{5-6} °С понизилась на 0,3–0,7 °С (в Иркутской области она практически не изменилась), что в целом было благоприятным для формирования урожайности зерновых культур. Показано, что чаще всего значительное снижение урожайности в субъектах наблюдалось в годы, когда в июне наблюдались засухи; определена повторяемость засух различной интенсивности. Анализ временных рядов урожайности выявил тенденцию роста урожайности в рассмотренный период. Наибольшая скорость роста была характерна для Республики Хакасия, где урожайность от начала к концу периода увеличилась более чем на 10,0 ц/га. В исследованиях показана целесообразность для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур использования спутниковой информации в комплексе с наземными данными в Красноярском крае, где установлена тесная связь урожайности этих культур, а также яровой пшеницы, занимающей большие площади (до 63 % от всех посевных площадей зерновых культур), с вегетационным индексом NDVI. В республиках Хакасия, Тыва и в Иркутской области значимых связей средней по субъектам урожайности с NDVI не выявлено.

С использованием метода корреляционно-регрессионного анализа были выбраны (отобраны) наиболее статистически значимые метеорологические параметры и разработаны регрессионные модели для прогнозирования урожайности зерновых культур в республиках Хакасия, Тыва и Иркутской области, основанные на наземных наблюдениях гидрометеостанций с учетом культуры земледелия. Для прогнозов урожайности зерновых культур, а также яровой пшеницы в Красноярском крае разработаны регрессионные модели на основе совместного использования спутниковой информации и наземных данных. Проверка моделей показала достаточно хорошую оправдываемость, средняя относительная ошибка в основном не превышала 14 %.

Список литературы

1. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68-75.
2. *Бондур В.Г., Гороховский К.Ю., Игнатьев В.Ю., Мурынин А.Б., Гапонова Е.В.* Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 61-68.
3. *Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В.* Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 1–2 (65). С. 89-93.
4. *Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В., Хан В.М., Тарасова Л.Л., Павлова А.Н.* Региональные и отраслевые проблемы опустынивания, деградации земель и засух в Российской Федерации // Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)». Том 2. Раздел 4. М.: Изд-во МБА, 2019. С. 183-312.
5. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. М.: Гидрометиздат, 1983. 7 с.
6. *Клеценко А.Д., Савицкая О.В.* Оценка урожайности озимой пшеницы с использованием метода главных компонент на основе комплексирования спутниковой и наземной информации. // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 127-136.
7. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.
8. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 190-198.
9. *Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А., Толпин В.А., Хвостиков С.А.* Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 275-285.
10. *Сладких Л.А., Кулик Е.Н., Сахарова Е.Ю.* Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 6. – С. 726-733.
11. *Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В.* Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12-15.
12. *Страшная А.И., Барталев С.А., Максименкова Т.А., Чуб О.В., Толпин В.А., Плотников Д.Е., Богомолова Н.А.* Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 85-107.

13. Страшная А.И., Береза О.В., Максименкова Т.А. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы по субъектам европейской части России на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием: «Вклад агрофизики в решение функциональных задач сельскохозяйственной науки», Санкт-Петербург, 01-02 октября 2020 г. С. 722-743.

14. Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. О возможности использования данных спутниковых измерений для прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах Уральского федерального округа и Западной Сибири // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского института. 2021. № 107. С. 78-91.

15. Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 111-137.

16. Страшная А.И., Береза О.В. Использование спутниковой информации в агрометеорологическом прогнозировании // Метеорология и гидрология. 2021 № 12. С. 114-126.

17. Толлин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7 (306). С. 581-586.

18. Тю Л.В., Афанасьев Е.В., Быков А.А., Алещенко В.В. Специализация регионов Сибири в зерновом производстве (на примере пшеницы) // Экономика сельского хозяйства России. 2020. № 9. С. 79-82.

19. Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В. Построение карт урожайности посевов зерновых культур по спутниковым и беспилотным данным // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание. Красноярск, 2021. С. 140-143.

20. Уланова Е.С., Страшная А.И. Засухи в России и их влияние на производство зерна // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 32. С. 64-83.

21. Якушев В.П., Жуковский Е.Е. Анализ последствий изменения климата в земледелии как задача оценки и сравнения рисков // Агрофизика, 2011 № 4. С. 24-39

References

1. Bartalev S.A., Loupyan E.A., Neishtadt I.A., Savin I.Yu. Gropland area classification in south regions of Russia using modis satellite data. *Izssledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2006, no. 3, pp. 68-75 [in Russ.].

2. Bondur V.G., Gorohovskij K.Yu., Ignat'ev V.YU., Murynin A.B., Gaponova E.V. Metod prognozirovaniya urozhajnosti po kosmicheskim nablyudeniya za dinamiko razvitiya vegetacii. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos"emka*. 2013, no. 6, pp. 61-68 [in Russ.].

3. Bryksin V.M., Yevtyushkin A.V., Rychkova N.V. Forecasting of Grain Crops Productivity on Basis of the Remote Sounding Data and Bio-productivity Modeling. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta [Izvestiya of Altai State University Journal]*, 2010, vol. 65, no. 1-2, pp. 89-93 [in Russ.].

4. Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V., Han V.M., Tarasova L.L., Pavlova A.N. Regional'nye i otraslevye problemy opustynivaniya, degradacii zemel' i zasuh v Rossijskoj Federacii // Nacional'nyj doklad «Global'nyj klimat i pochvennyj pokrov Rossii: opustynivanie i degradaciya zemel', institucional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptacii (sel'skoe i lesnoe hozyajstvo)». Tom 2. Razdel 4. Moscow, Izd-vo MBA, 2019, pp. 183-312 [in Russ.].

5. Instrukciya po ocenke opravdyvaemosti agrometeorologicheskikh prognozov. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1983, 7 p. [in Russ.].

6. Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V. Estimation of Winter Wheat Yield Using the Principal Component Analysis Based on the Integration of Satellite and Ground Information. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, no. 12, pp. 881–887. DOI: 10.3103/S1068373921120104

7. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk, VNIIGMI-MCD, 2012, 216 p. [in Russ.].

8. Loupian E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E. Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2011, vol. 8, no. 1, pp. 190-198 [in Russ.].

9. Savin I.Yu., Bartalev S.A., Loupian E.A., Tolpin V.A., Khvostikov S.A. Crop yield forecasting based on satellite data: opportunities and perspectives. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2010, vol. 7, no. 3, pp. 275-285 [in Russ.].

10. Sladkikh L. A., Kulik E. N., Sakharova E. Yu. Grain Crops Monitoring in the South Part of Western Siberia Based on the Satellite Images' Data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 726-733 [in Russ.].

11. Storchak I.G., Eroshenko A.A. FUsing of NDVI for assessing productivity of winter wheat in Stavropol region. *Zemledelie*, 2014, no. 7, pp. 12-15 [in Russ.].

12. A.I. Strashnaya, S.A. Bartalev, T.A. Maksimenkova, O.V. Chub, V.A. Tolpin, D.E. Plotnikov, N.A. Bogomolova Agrometeorological assessment of winter grain crops condition during the growing season termination using ground and satellite data through the example of the Privolzhskiy Federal District. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2014, vol. 351, pp. 85-107 [in Russ.].

13. Strashnaya A.I., Bereza O.V., Maksimenkova T.A. Prognozirovanie urozhajnosti ozimoy pshenicy po sub"ektam evropejskoj chasti Rossii na osnove kompleksirovaniya nazemnyh i sputnikovyh dannyh. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem: «Vklad agrofiziki v reshenie funkcional'nyh zadach sel'skohozyajstvennoj nauki», Sankt-Peterburg, 01-02 oktyabrya 2020, pp. 722-743 [in Russ.].

14. Strashnaya A.I., Beryoza O.V., Klang P.S. The use of satellite measurement data to predict the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the Ural Federal district and western Siberia. *Trudy SibNIGMI*, 2021, vol. 107, pp. 78-91 [in Russ.].

15. Strashnaya A.I., Bereza O.V., Klang P.S. Forecasting grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2021, vol. 380, no. 2, pp. 111-137 [in Russ.].

16. *Strashnaya A.I., Bereza, O.V.* Using Satellite Information in Agrometeorological Forecasting. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, no. 12, pp. 872-880. DOI: 10.3103/S1068373921120098

17. *Tolpin V. A., Lupyay E. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Matveev A. M.* Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the “VEGA” satellite service. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 581-586 [in Russ.].

18. *Tiu L. V., Afanasev E. V., Bykov A. A., Aleshchenko V. V.* Specialization of Siberian regions in grain (wheat) production. *Ekonomika sel'skogo hozyajstva [Economics of Agriculture of Russia]*, 2020, no. 9, pp. 79-82 [in Russ.].

19. *Shevyrnogov A.P., Botvich I.YU., Emel'yanov D.V.* Postroenie kart urozhajnosti posevov zernovykh kul'tur po sputnikovym i bespilotnym dannym // Regional'nye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli. *Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii; elektronnoe nauchnoe izdanie. Krasnoyarsk*, 2021, pp. 140-143.

20. *Ulanova E.S., Strashnaya A.I.* Zasuhi v Rossii i ih vliyanie na urozhaynost' zernovykh kul'tur. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 33, pp. 64-83 [in Russ.].

21. *Yakushev V. P., Zhukovsky E. E.* Consequence analysis of Climate impact on agriculture as a problem of risk estimation. *Agrofizika [Agrophysica]*, 2011, no. 4, pp. 24-39 [in Russ.].

*Поступила 17.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.*

*Submitted 17.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-138-153>

УДК 551.574.42(470+571)

Мониторинг гололедно-изморозевых отложений на территории России

Н.М. Аржанова, Н.Н. Коришунова

*Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных,
г. Обнинск Калужской обл., Россия
arzhanova.n@inbox.ru*

Для включения в национальную систему мониторинга климата разработана методика мониторинга гололедно-изморозевых отложений (ГИО). На основе данной методики для оценки текущего состояния характеристик ГИО рассчитаны нормативные постанционные характеристики (суммарное число случаев, суммарная продолжительность и средний вес) для каждого вида ГИО за период с 1991–2020 гг. Оценивается аномальность режима ГИО по всей территории России. Анализируются тенденции изменений, характеризующиеся коэффициентами линейного тренда по данным на метеорологических станциях и по средним для квазиоднородных регионов значениям (1984–2021 гг.). Исследование показало статистически значимый положительный тренд числа случаев, продолжительности и веса отложения мокрого снега в ряде регионов. В отдельных квазиоднородных регионах получены как положительные, так и отрицательные значимые тенденции числа случаев, продолжительности и веса кристаллической изморози. В отдельных квазиоднородных регионах также получен значимый положительный тренд числа случаев и продолжительности гололеда.

Ключевые слова: методика мониторинга, гололедно-изморозевые отложения, гололед, изморозь, мокрый снег, аномалия, тренд

Monitoring of glaze-ice on the territory of Russia

N.M. Arzhanova, N.N. Korshunova

*All-Russian Research Institute
of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC),
Obninsk, Kaluzhsky region, Russia
arzhanova.n@inbox.ru*

A methodology for monitoring glaze-rime deposits (GRD) is developed to be included in the national climate monitoring system. Based on this methodology, in order to assess the current state of GRD characteristics, the standard station characteristics (total number of cases, total duration, and average weight) are calculated for each type of GRD for the period of 1991-2020. The anomalous pattern of GRD throughout Russia is assessed. The trends are analyzed that are characterized by linear trend coefficients based on the weather station data and on the average values for quasihomogeneous regions (1984-2021). The study showed a statistically significant positive trend for the number of cases, duration, and weight of wet snow deposits in several regions. In some quasihomogeneous regions, both positive and negative significant trends in the number of cases, duration, and weight

of crystal rime are obtained. In some quasihomogeneous regions, a significant positive trend for the number of cases and duration of glaze ice is also obtained.

Keywords: monitoring methodology, glaze-rime deposits, glaze ice, rime, wet snow, anomaly, trend

Введение

Задача мониторинга климата является частью Всемирной климатической программы, выполняемой под эгидой ВМО. Гололедно-изморозевые отложения (ГИО) являются важным компонентом климатической системы, требующим постоянного наблюдения, поскольку при достижении определенных опасных размеров в сочетании с ветром могут оказывать большое влияние на экономику страны. В последнее время интерес к изучению гололедно-изморозевых отложений повысился в связи с участившимися случаями выпадения ледяных дождей, как в России, так и в других странах. В предыдущих исследованиях авторов [2, 7] отмечалась важность изучения этих явлений и необходимость постоянного слежения за их состоянием в рамках национальной системы мониторинга климата. Однако несмотря на важность данной проблемы исследовательские работы в этом направлении в масштабах всей страны долгое время сдерживались отсутствием качественных данных наблюдений. Создание в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» базы данных «Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России» позволило приступить к мониторингу этого параметра на территории Российской Федерации.

Целью данной работы являлась разработка методики мониторинга ГИО для включения их в национальную систему мониторинга климата. Созданная подсистема мониторинга гололедно-изморозевых отложений выявляет и изучает региональные особенности в изменении характеристик ГИО. Результаты анализа состояния ГИО на территории России приводятся в разделе ежегодного Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации [5].

Методика мониторинга гололедно-изморозевых отложений

Методика помимо основных разделов, посвященных информационной базе и технологии мониторинга ГИО, содержит раздел с описанием наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями. Наблюдения за обледенением проводов гололедного станка достаточно специфичны, сложны и трудоемки, поэтому на регулярной основе проводятся не везде. При возникновении отложения и до его окончания осмотр проводов станка должен производиться не только в сроки наблюдений, но и в промежутках между ними, не реже, чем через полтора часа. В зависимости от структуры эти явления подразделяют на пять видов: гололед, зернистую и кристаллическую изморозь, отложение мокрого снега и замерзшее отложение мокрого снега. После определения вида обледенения при последующих

осмотрах фиксируют его изменения. Если вид обледенения изменился, то это свидетельствует об образовании сложного отложения. В ходе обледенения различают три стадии: нарастания, сохранения, разрушения. После окончания стадии нарастания измеряют диаметр и толщину на постоянных проводах гололедного станка в соответствии с требованиями Наставления [6].

База данных ГИО состоит из архивных данных Госфонда, поступающих во ВНИИГМИ-МЦД по каналам связи с метеорологических станций государственной наблюдательной сети Росгидромета. Зафиксированные наблюдателем результаты наблюдений проходят многоступенчатый контроль (на метеостанции, в территориальных УГМС и т. п.), после чего включаются в данные Госфонда гидрометеорологической информации. Созданный во ВНИИГМИ-МЦД архив инструментальных наблюдений содержит информацию о ГИО на технических носителях с 1984 года. В архиве заложена возможность записи информации для 5 видов обледенения и 6 стадий нарастания в рамках одного случая ГИО.

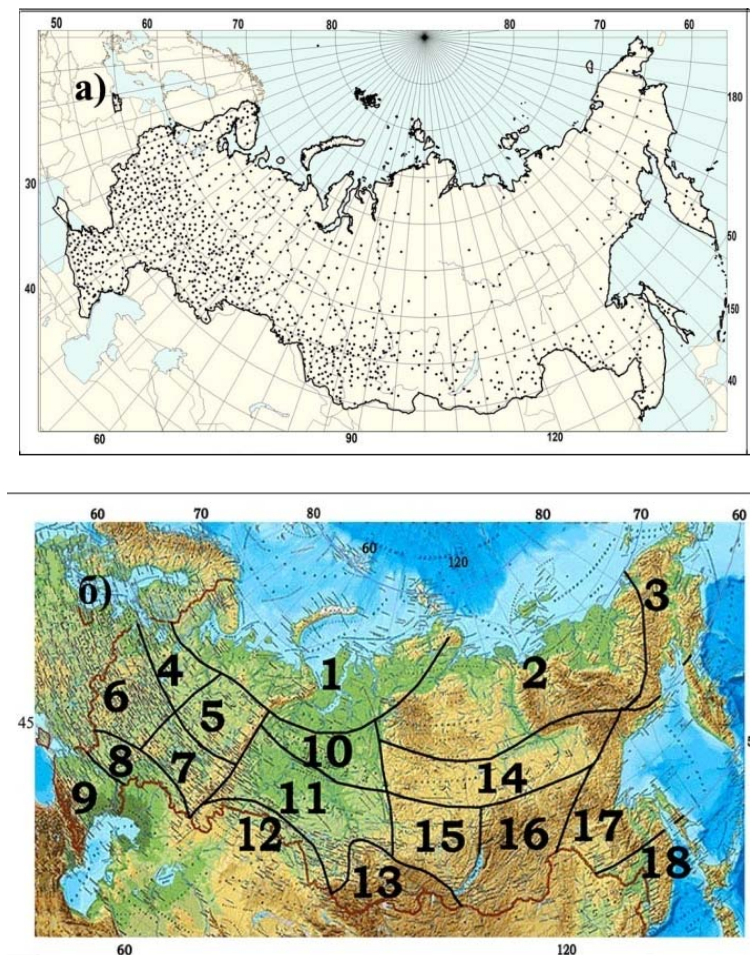
На рис. 1а представлено пространственное распределение станций базового массива. В континентальных районах Азиатской территории России на многих метеорологических станциях отсутствует гололедный станок, так как на территории этого района в зимнее время в зоне влияния Сибирского антициклона преобладают арктические воздушные массы, которые характеризуются очень низкой температурой и малой влажностью, поэтому условий для образования ГИО практически нет.

Для описания состояния ГИО (гололед, кристаллическая изморозь, отложение мокрого снега) используются следующие характеристики: суммарное число случаев, суммарная продолжительность и средний вес.

Анализ основных характеристик ГИО осуществляется с октября прошедшего года по апрель текущего года. Октябрь и апрель включены в холодный период, поскольку в эти месяцы температура воздуха колеблется между положительной и отрицательной, создаются благоприятные температурно-влажностные условия, при которых ГИО могут достигать опасных значений.

При разработке данной подсистемы мониторинга для оценки текущего состояния характеристик ГИО были впервые рассчитаны нормативные постанционные характеристики для каждого вида ГИО. В состав информационной базы входят следующие нормативные характеристики по метеостанциям: среднемноголетние значения максимального числа случаев, продолжительности, веса гололеда, кристаллической и зернистой изморози, отложения мокрого снега за период 1991–2020 гг. (по месяцам и за год).

В состав информационной базы также включены массивы временных рядов осредненных по всей территории России и по территории квазиоднородных климатических регионов характеристик: аномалий числа случаев, продолжительности, веса рассматриваемых отложений.



- 1, 2, и 3 – атлантическая, сибирская и тихоокеанская Арктика;
 4, 5, 6, 7, и 8 – северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток
 и степная часть Восточно-Европейской равнины;
 9 – степи и предгорье Северного Кавказа;
 10 и 11 – северная и южная части лесной зоны Западной Сибири,
 12 – степная зона Западной Сибири,
 13 – Алтайские и Саянские горы и предгорье,
 14, 15, и 16 – Восточная Сибирь: центральная часть, бассейн Ангары и За-
 байкалье,
 17 и 18 – Дальний Восток между 50°N и 60°N и южнее 50°N .

Рис. 1. Расположение метеостанций базового массива исторических данных о состоянии ГИО (а); квазиоднородные климатические регионы (б).

Fig. 1. Location of meteorological stations of the basic array of historical data on the state of GRD (a); quasi-homogeneous climatic regions (b).

Осреднение по площади выполнено как взвешенное осреднение станционных аномалий климатических переменных с весами, учитывающими плотность сети в окрестности станции. Аномалии на метеостанциях арифметически осреднялись по квадратам сетки ($1^{\circ}\text{N}\times 2^{\circ}\text{E}$), затем с весовыми коэффициентами в зависимости от широты квадрата проводилось осреднение по 18 регионам, представленным на рис. 1б, и территории России. Выбор 18 квазиоднородных климатических регионов осуществлен на основании классификации Алисова [1].

Все массивы базы данных хранятся в форматах ASCII.

Технология мониторинга климата включает следующие основные этапы:

1. Усвоение режимных данных об основных метеорологических параметрах.

2. Пополнение БД «Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России» данными текущего года:

- расчет производных характеристик;
- расчет аномалий суммарного за холодный период числа случаев, продолжительности и веса каждого вида ГИО.

3. Расчет регионально осредненных временных рядов.

4. Расчет оценок трендов по регионам.

5. Подготовка иллюстративных материалов годового бюллетеня (в соответствии с принятым регламентом выходной продукции).

6. Анализ материалов и подготовка раздела «Гололедно-изморозевые отложения на территории России».

Программные средства, разработанные во ВНИИГМИ-МЦД, обеспечивают пополнение базовых массивов данными текущего года и расчет всех производных массивов станционных значений. При формировании базового массива осуществлялся контроль данных [3].

Аномалия климатической переменной (числа случаев, продолжительности и веса ГИО) определяется как отклонение от климатической нормы.

Для получения осредненных по площади значений климатических переменных рассматриваются следующие масштабы горизонтального обобщения:

- территория Российской Федерации;
- Европейская территория России;
- квазиоднородные климатические регионы России.

Ввиду географической неоднородности средних величин климатических переменных и при наличии пропусков во временных рядах наблюдений пространственное осреднение выполняется по данным об аномалиях. При необходимости региональные средние самой климатической переменной получают восстановлением из регионально осредненных аномалий и регионально осредненных норм. Методика осреднения описана в [4].

Для всех климатических переменных (станционных и пространственно осредненных) рассчитываются обновленные статистики, включая оценки трендов.

Карты получаются с помощью ГИС в регулярной стереографической проекции, в которой используется стандартный метод обратных взвешенных расстояний с коэффициентами, обратно пропорциональными квадрату расстояния. При подготовке сложных рисунков используются готовые шаблоны, подготовленные в Adobe Photoshop, обеспечивающие достаточный уровень автоматизации. Результирующие файлы выгружаются в формате jpeg.

Результаты

В качестве результатов работы технологии мониторинга гололедно-изморозевых отложений рассмотрим особенности пространственного распределения характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории Российской Федерации в холодный период 2021–2022 гг.

Пространственное распределение аномалий суммарного за холодный период числа случаев гололеда, кристаллической изморози и отложения мокрого снега представлено на рис. 2.

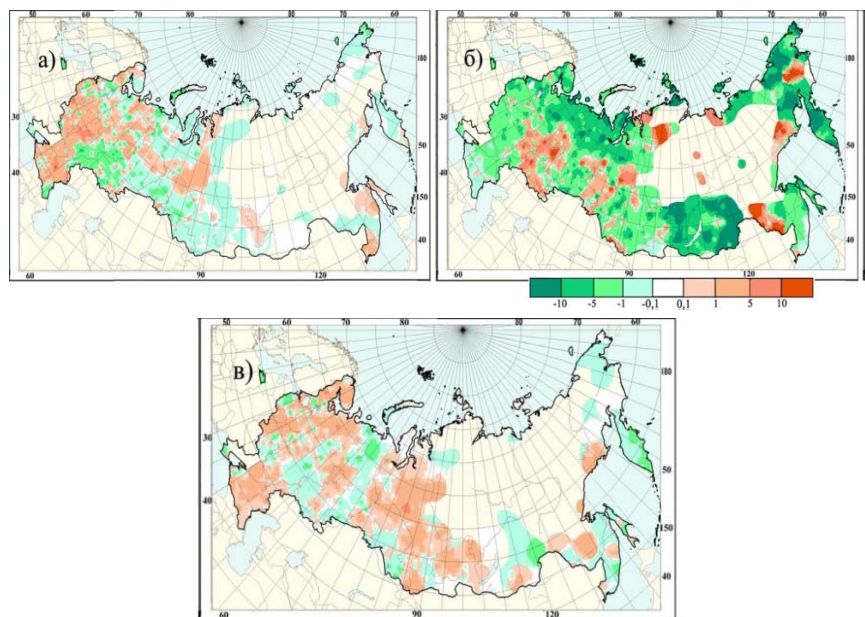


Рис. 2. Аномалии суммарного за холодный период числа случаев с гололедом (а); кристаллической изморозью (б); отложением мокрого снега (в).

Fig. 2. Anomalies of the total number of cases during the cold period with glaze ice (a); crystal rime (б); deposition of wet snow (в).

Положительные аномалии числа случаев гололеда отмечаются на востоке Европейской территории России (ЕТР) и юге Уральского федерального округа (УФО). Причиной являлось частое влияние циклонов и вынос теплого и влажного воздуха с Атлантики на восток ЕТР и южные районы УФО, когда создавались благоприятные условия для образования гололеда. Очаг отрицательных аномалий числа случаев кристаллической изморози охватил всю ЕТР (от 5 до 10 дней), что связано с аномально теплой погодой в рассматриваемый холодный период. В распределении числа случаев отложения мокрого снега преобладали положительные аномалии, поскольку сезон 2021–2022 гг. оказался не только теплым, но и довольно снежным.

Пространственное распределение продолжительности гололеда на ЕТР носит пятнистый характер, однако можно отметить, что на 10–20 часов меньше сохранялся гололед в западных областях и на Южном Урале (рис. 3а). Наибольшая отрицательная аномалия продолжительности кристаллической изморози наблюдалась в Забайкалье, на северо-западе Красноярского края, севере Чукотки и составила 24–48 часов (рис. 3б). Наибольшие положительные аномалии зафиксированы на востоке Амурской области и в Магаданской области (до 72 часов). На ЕТР и в Западной Сибири преобладали положительные аномалии продолжительности отложения мокрого снега (рис. 3в).

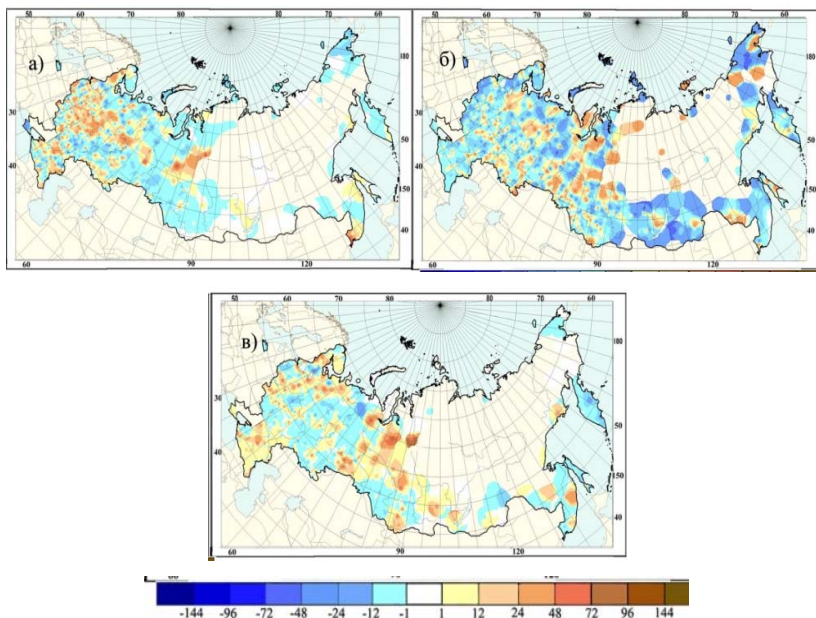


Рис. 3. Аномалии суммарной за холодный период продолжительности (часы): гололеда (а); кристаллической изморози (б); отложения мокрого снега (в).

Fig. 3. Anomalies of the total duration (hours) of: glaze ice (a), crystal rime (б), deposition of wet snow (в) for the cold period.

В пространственном распределении аномалий веса гололеда (рис. 4а) преобладали отрицательные аномалии веса гололеда. Положительные аномалии (1.2–1.6 г/см) отмечались на востоке ЕТР. Вес кристаллической изморози (рис. 4б) уменьшается (в отличие от гололеда) на севере Урала и Западной Сибири, а также в Архангельской области, на Кольском полуострове, Ненецком автономном округе и севере Чукотки (1.2–1.6 г/см и более). Наиболее выраженные положительные аномалии веса отложения мокрого снега (рис. 4в) отмечались в Южном, на юго-западе Центрального федерального округа (ЦФО), на западе Республики Коми, отдельными очагами в Северо-Западном федеральном округе и Западной Сибири (1.2–1.6 г/см и более).

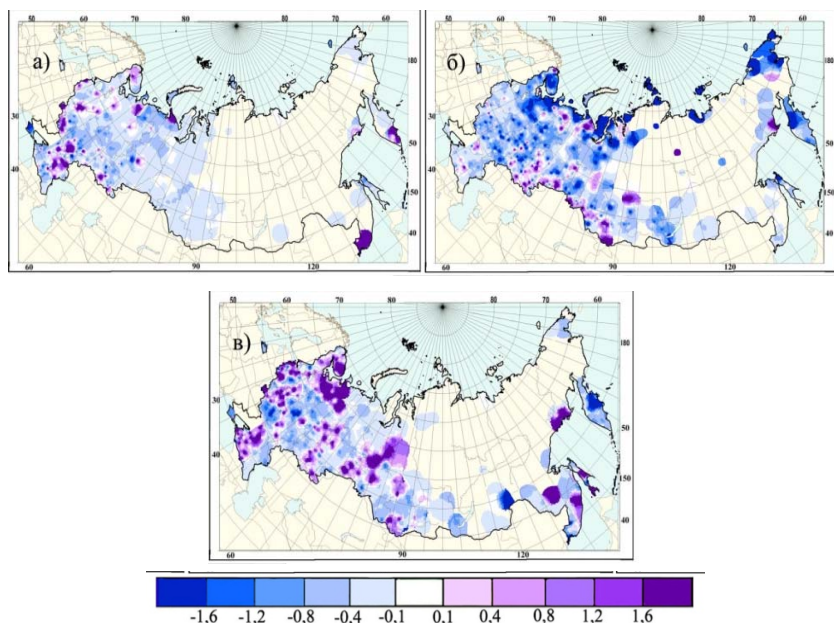


Рис. 4. Аномалии среднего за холодный период веса (г/см): гололеда (а); кристаллической изморози (б); отложения мокрого снега (в).

Fig. 4. Anomalies of cold period-averaged weight (g/cm) of: glaze ice (a), crystal rime (b), deposition of wet snow (v).

Тенденции современных изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России

Исследование показало, что тенденция увеличения суммарного за холодный период числа дней гололеда отмечается в Приволжском федеральном округе (ПФО), на юго-востоке ЦФО, в Краснодарском крае, Калмыкии, Мурманской и Астраханской областях, на юге Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) (1.2–1.6 дней/10 лет). На многих метеостанциях этот тренд статистически значим на 5%-ном уровне. При региональном осреднении (табл. 1) получен значимый положительный тренд

на северо-востоке и юго-востоке Восточно-Европейской равнины ($b=1.0$ и 0.5 дней /10 лет соответственно), в северной части лесной зоны Западной Сибири тренд составил 0.3 дня /10 лет.

Таблица 1. Оценки линейного тренда аномалий числа случаев с ГИО, 1984-2022 гг.

Table 1. Estimates of the linear trend of anomalies in the number of cases with GRD, 1984-2022

Регионы	Гололед		Кристаллическая изморозь		Отложение мокрого снега	
	b	d	b	d	b	d
1. Атлантическая Арктика	0.1	4	-1.4	22	0.6	66
2. Сибирская Арктика	-0.0	5	0.6	2	0.0	0
3. Тихоокеанская Арктика	0.0	0	-1.2	5	0.0	0
4. СЗ Восточно-Европейской равнины	0.2	1	-1.4	18	1.3	78
5. СВ Восточно-Европейской равнины	1.0	26	0.3	1	0.7	60
6. ЮЗ Восточно-Европейской равнины	0.2	2	-1.4	28	0.7	54
7. ЮВ Восточно-Европейской равнины	0.5	12	0.2	1	0.5	60
8. Степная часть Вост-Европ. равнины	-0.0	0	-1.1	14	0.2	22
9. Степи и предгорье Северного Кавказа	-0.0	0	-0.4	7	0.3	30
10. Север лесной зоны Западной Сибири	0.3	18	-1.0	8	0.1	14
11. Юг лесной зоны Западной Сибири	0.1	2	0.3	1	0.2	25
12. Степная зона Западной Сибири	0.1	4	-0.1	0	0.4	50
13. Алтай и Саяны	0.0	0	0.2	1	0.4	34
14. Центральная часть Восточной Сибири	0.0	0	4.8	54	0.1	5
15. Бассейн Ангары	0.0	0	0.0	0	0.0	0
16. Забайкалье	0.0	0	-0.3	0	0.0	0
17. Дальний Восток между 50°N и 60°N	0.0	0	2.9	39	0.2	10
18. Дальний Восток южнее 50°N	0.1	14	1.6	42	0.4	19
Российская Федерация	0.1	4	-0.1	1	0.5	73
Европейская территория России	0.3	11	-0.6	7	0.7	75

Примечание. b – коэффициент линейного тренда (случаев/10лет), d – вклад тренда в общую дисперсию ряда, %. Статистически значимый на 5 %-ном уровне тренд выделен жирным шрифтом.

По данным на метеостанциях получены ярко выраженные значимые как отрицательные, так и положительные значения коэффициентов линейного тренда числа случаев кристаллической изморози (рис. 5б). В отдельных квазиоднородных регионах были выявлены статистически значимые на 5%-ном уровне тенденции (табл. 1). Максимальный коэффициент линейного тренда получен в центральной части Восточной Сибири

($b=4.8$ дня/10 лет, $d=54\%$). На большей части территории России преобладают положительные тенденции числа случаев отложения мокрого снега (рис. 5в). Наибольший тренд числа дней отложения мокрого снега отмечен на северо-западе Восточно-Европейской равнины ($b=1.3$ дня /10 лет, $d=78\%$). И в целом по территории России получен статистически значимый тренд числа случаев отложения мокрого снега, равный 0.5 дня/10 лет, а вклад тренда в дисперсию ряда составляет 73 %.

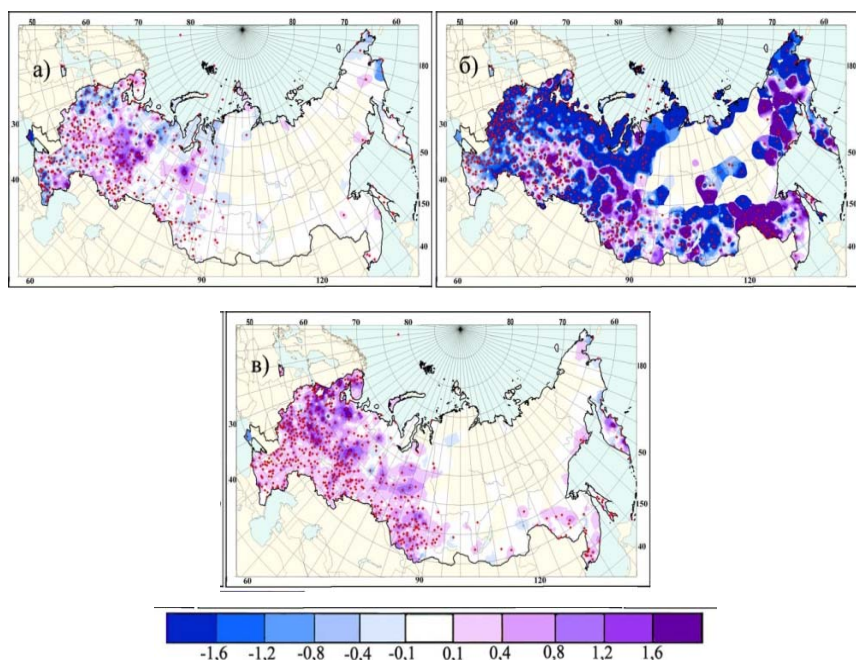


Рис. 5. Коэффициенты линейного тренда (случаев/10лет) суммарного за холодный период числа случаев с: гололедом (а); кристаллической изморозью (б); отложением мокрого снега (в). Кругами красного цвета показаны станции, для которых тренд статистически значим на 5%-ном уровне.

Fig. 5. Linear trend coefficients (cases /10 years) of the total number of cases during the cold period with: glaze ice (а), crystal rime (б), deposition of wet snow (в). Red circles show stations for which the trend is statistically significant at the 5% level.

Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда в рядах суммарной за холодный период продолжительности ГИО представлено на рис. 6. Рост продолжительности гололеда (рис. 6а) получен в центральных районах ЕТР и в ЯНАО, но при региональном осреднении тенденция увеличения продолжительности гололеда (значимая на 5%-ном уровне) обнаружена на юго-востоке и северо-востоке Восточно-Европейской равнины и в северной части лесной зоны Западной Сибири ($b=2.6$

и 3.2 ч/10 лет соответственно). Тенденция уменьшения продолжительности кристаллической изморози отмечается на большей части ЕТР, наиболее выраженная на арктическом побережье, северо-западе Красноярского края и на востоке Чукотки (более 96 часов).

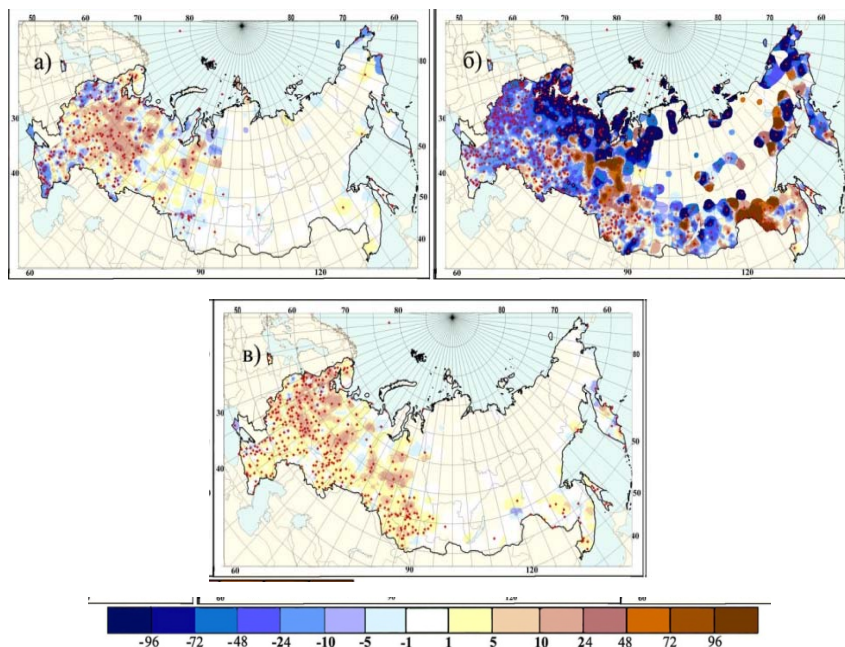


Рис. 6. Коэффициенты линейного тренда (часы/10лет) суммарной за холодный период продолжительности: гололеда (а), кристаллической изморози (б); отложения мокрого снега (в). Кругами красного цвета показаны станции, для которых тренд статистически значим на 5%-ном уровне.

Fig. 6. Linear trend coefficients (hours/10 years) of the total duration for the cold period of: glaze ice (а), crystal rime (б), deposition of wet snow (в). Red circles show stations for which the trend is statistically significant at the 5% level.

Продолжительность кристаллической изморози растет в ЯНАО и Амурской области. Анализ региональных изменений (табл. 2) показал, что наименьший статистически значимый отрицательный тренд получен на юго-западе Восточно-Европейской равнины ($b = -4.0$ ч/10 лет, $d = 29\%$), а наибольший положительный – на Дальнем Востоке между 50°N и 60°N ($b = 4.0$ ч/10лет, $d = 21\%$). На большей части ЕТР и в Западной Сибири выявлена тенденция увеличения продолжительности отложения мокрого снега. В ряде квазиоднородных регионов фиксируется увеличение продолжительности отложения мокрого снега, максимальный коэффициент линейного тренда получен на северо-западе Восточно-Европейской равнины и составляет 7.6 ч/10 лет, вклад тренда в дисперсию ряда – 76 %. В целом для

территории России и для ЕТР получен статистически значимый положительный тренд продолжительности мокрого снега ($b=3.1$ и 4.1 ч/10 лет соответственно).

Таблица 2. Оценки линейного тренда аномалий продолжительности ГИО, 1984-2022 гг.

Table 2. Estimates of the linear trend of GRD duration anomalies, 1984-2022

Регионы	Гололед		Кристаллическая изморозь		Отложение мокрого снега	
	b	d	b	d	b	d
1. Атлантическая Арктика	0.0	0	-1.8	16	3.2	74
2. Сибирская Арктика	-0.6	2	2.8	9	0.1	0
3. Тихоокеанская Арктика	1.0	2	0.1	0	0.1	1
4. СЗ Восточно-Европейской равнины	-0.6	0	-1.4	7	7.6	76
5. СВ Восточно-Европейской равнины	2.6	12	1.8	9	4.7	53
6. ЮЗ Восточно-Европейской равнины	1.3	3	-4.0	29	4.0	44
7. ЮВ Восточно-Европейской равнины	2.6	12	1.8	9	3.1	48
8. Степная часть Вост-Европ. равнины	1.0	3	-3.9	33	2.0	46
9. Степи и предгорье Северного Кавказа	-0.9	2	-2.5	10	1.9	30
10. Север лесной зоны Западной Сибири	3.2	22	1.7	3	2.8	25
11. Юг лесной зоны Западной Сибири	0.1	0	2.9	14	3.1	63
12. Степная зона Западной Сибири	-0.2	0	1.1	2	2.4	35
13. Алтай и Саяны	0.0	0	1.4	4	3.2	56
14. Центральная часть Восточной Сибири	0.3	5	3.4	5	0.2	1
15. Бассейн Ангары	0.1	0	3.0	10	0.6	8
16. Забайкалье	-0.0	0	0.0	0	-0.2	0
17. Дальний Восток между 50°N и 60°N	-0.3	2	4.0	21	1.5	10
18. Дальний Восток южнее 50°N	0.8	6	3.9	35	3.4	24
Российская Федерация	0.6	3	0.2	0	3.1	78
Европейская территория России	1.2	9	-0.2	0	4.1	78

Примечание. b – коэффициент линейного тренда (час/10лет), d – вклад тренда в общую дисперсию ряда, %. Статистически значимый на 5 %-ном уровне тренд выделен жирным шрифтом.

На рис. 7 показано пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднего за холодный период веса гололеда. Отметим, что вес гололеда уменьшается в Южном федеральном округе, включая Крым, юго-западе ЦФО, юге ПФО и на северо-востоке Ненецкого автономного округа (0.8–1.6 г/см/10 лет). Тенденция роста веса гололеда получена на северо-западе ПФО и северо-востоке ЦФО (0.4–1.2 г/см/10 лет).

Тенденция уменьшения веса кристаллической изморози выявлена на большей части территории России (рис. 7б).

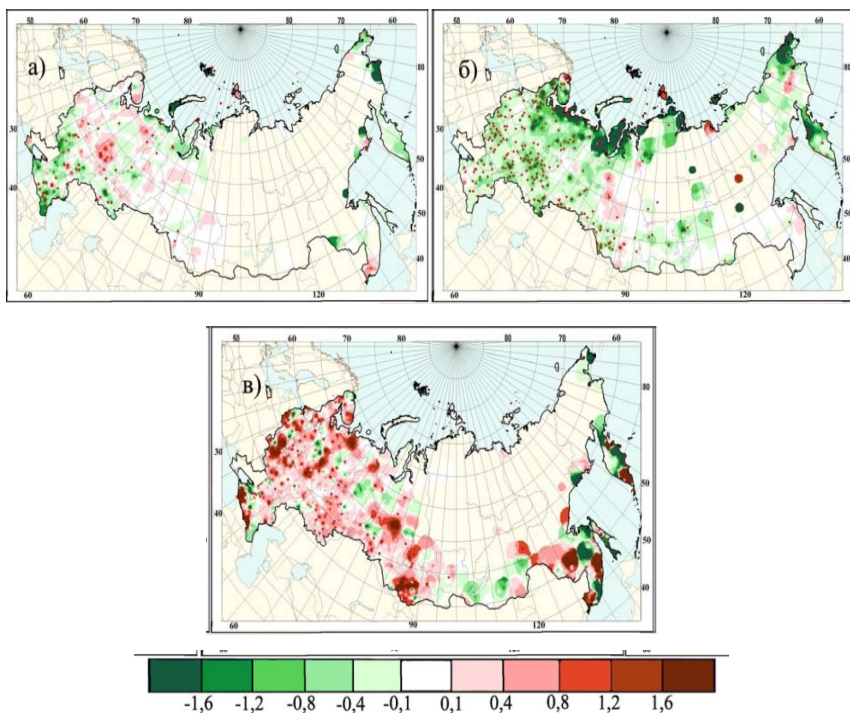


Рис. 7. Коэффициенты линейного тренда (г/см/10лет) среднего за холодный период веса: гололеда (а); кристаллической изморози (б); отложения мокрого снега (в). Кружками красного цвета показаны станции, для которых тренд статистически значим на 5%-ном уровне.

Fig. 7. Linear trend coefficients (g/cm/10years) of cold period-averaged weight of: glaze ice (a); crystal rime (б); deposition of wet snow (в). Red circles show stations for which the trend is statistically significant at the 5% level.

Наиболее выраженные отрицательные аномалии отмечаются на арктическом побережье ЕТР, Западной Сибири, Чукотке и западе Камчатки (1.6 г/см/10 лет и более). При региональном осреднении значимые отрицательные тренды получены в отдельных квазиоднородных районах (табл. 3) и в целом для ЕТР ($b = -0.2$ г/см/10 лет, $d = 19\%$). Тенденция роста веса отложения мокрого снега преобладает на ЕТР, в Западной Сибири, Амурской области, юго-западе и северо-востоке Приморского края (1.2–1.6 г/см/10 лет). При оценке региональных изменений значимые положительные тенденции получены в семи районах (1, 4, 5, 6, 7, 11 и 13), а также в целом для ЕТР (табл. 3).

Таблица 3. Оценки линейного тренда аномалий веса ГИО, 1984-2022 гг.
Table 3. Estimates of the linear trend of GRD weight anomalies, 1984-2022

Регионы	Гололед		Кристаллическая изморозь		Отложение мокрого снега	
	b	d	b	d	b	d
1. Атлантическая Арктика	0.0	3	-0.2	15	0.1	19
2. Сибирская Арктика	-0.1	5	-0.2	9	0.1	6
3. Тихоокеанская Арктика	0.0	4	-0.1	2	0.1	3
4. СЗ Восточно-Европейской равнины	0.0	3	-0.3	29	0.2	17
5. СВ Восточно-Европейской равнины	0.0	0	-0.1	6	0.3	31
6. ЮЗ Восточно-Европейской равнины	0.0	1	-0.2	15	0.3	44
7. ЮВ Восточно-Европейской равнины	0.1	4	-0.2	18	0.2	16
8. Степная часть Вост-Европ. равнины	0.0	0	-0.2	14	0.1	7
9. Степи и предгорье Северного Кавказа	-0.1	4	-0.1	17	0.1	7
10. Север лесной зоны Западной Сибири	-0.0	1	-0.1	3	0.0	3
11. Юг лесной зоны Западной Сибири	0.0	0	-0.1	4	0.1	11
12. Степная зона Западной Сибири	-0.0	0	-0.1	4	0.0	2
13. Алтай и Саяны	-0.0	0	-0.0	0	0.3	26
14. Центральная часть Восточной Сибири	-0.0	0	0.3	8	0.0	0
15. Бассейн Ангары	0.0	2	-0.1	1	0.1	1
16. Забайкалье	0.1	2	-0.1	15	-0.0	0
17. Дальний Восток между 50°N и 60°N	0.0	3	-0.2	10	0.2	10
18. Дальний Восток южнее 50°N	-0.1	5	-0.0	1	0.1	2
Российская Федерация	0.0	0	0.0	1	0.1	21
Европейская территория России	0.1	8	-0.2	19	0.1	18

Примечание. **b** – коэффициент линейного тренда (г/см/10лет), **d** – вклад тренда в общую дисперсию ряда, %. Статистически значимый на 5 %-ном уровне тренд выделен жирным шрифтом.

Выводы

Учитывая влияние ГИО на хозяйственную деятельность и потенциальную угрозу нанесения значительного материального ущерба, важнейшей задачей было включение гололедно-изморозевых отложений в национальную систему мониторинга. Созданная в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» технология мониторинга ГИО позволяет регулярно получать подробный географический анализ крупных аномалий, оперативно отслеживать тенденции в изменении характеристик ГИО. Результаты анализа помещаются в ежегодный «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации» [5], который является официальным изданием Федеральной службы

по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Результаты мониторинга ГИО важны для выявления климатических рисков, исследования крупномасштабных факторов изменения их характеристик и могут использоваться для своевременной выработки превентивных адаптационных мер, чтобы минимизировать ущерб от неблагоприятных погодных и климатических изменений.

Список литературы

1. *Алисов Б.П.* Климат СССР: Учебное пособие для высших учебных заведений. М.: Изд-во МГУ, 1956. 127 с.
2. *Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н.* Оценка многолетних изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России // Труды ВНИИ-ГМИ-МЦД. 2021. Вып. 188. С. 18-29.
3. *Аржанова Н.М., Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н.* Специализированный массив данных гололедно-изморозевых явлений для мониторинга климата и климатических исследований // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 182. С. 101-110.
4. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н.* Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966–2010 гг // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Сборник ИГКЭ. 2011. Том XXIV. С. 211-227.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. М.: Росгидромет, 2022. 110 с.
6. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. Л.: Гидрометиздат, 1985. С. 28-29.
7. *Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Ya.* Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate Environ // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10, no. 2. P. 025003. DOI: 10.1088/1748-9326/10/2/025003

References

1. *Alisov B.P.* Klimat SSSR: Uchebnoe posobie dlya vysshih uchebnyh zavedenij [Climate of the USSR]. Moscow, Moscow State University publ., 1956, 127 p. [in Russ.].
2. *Arzhanova N.M., Korshunova N.N.* Ocenka mnogoletnih izmenenij harakteristik gololyodno-izmorozevykh otlozhenij na territorii Rossii [Estimating long term changes of glaze-ice and rime deposition characteristics over the Russian territory]. *Trudy VNI-IGMI-MTSD*. 2021, vol. 188, pp. 18-29 [in Russ.].
3. *Arzhanova N.M., Bulygina O.N., Korshunova N.N.* Specializirovannyj massiv dannyh gololedno-izmorozevykh yavlenij dlya monitoringa klimata i klimaticheskikh issledovanij [Specialized hydrometeorological dataset for climate monitoring and climate research]. *Trudy VNIIGMI-MTSD*. 2018, vol. 182, pp. 101-110 [in Russ.].
4. *Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N.* Snow cover over the Russian territory and its spatial and temporal changes in 1966-2010. Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling. Moscow, IGCE. 2011, vol. 24, pp. 211-227 [in Russ.].
5. Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2021 g., [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2021]. Moscow, Roshydromet, 2022, 110 p. [in Russ.].

6. Nastavleniya gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. Vypusk 3. Chast' 1 [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 3. Part 1]. Leningrad, Gidrometizdat publ., 1985, 301 p. [in Russ.].

7. Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Ya. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate *Environ. Res. Lett.*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 025003. DOI:10.1088/1748-9326/10/2/ 025003

*Поступила 14.07.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.*

*Submitted 14.07.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-154-169>

УДК 551.5

**Итоги 25-й сессии
Северо-Евразийского климатического форума
и стартового регионального семинара ЭСКАТО ООН
по проекту: Расширение знаний и потенциала
для повышения устойчивости к медленно наступающим
стихийным бедствиям в Центральной Азии**

***В.М. Хан, Р.М. Вильфанд, В.А. Тищенко, К.А. Сумерова,
С.В. Емелина, Е.В. Набокова, Е.С. Каверина, И.А. Куликова,
Е.Н. Круглова, М.А. Толстых***

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

Северо-Евразийский климатический центр провел 25-ю сессию Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-25), совмещенную со стартовым семинаром проекта под эгидой Экономической и социальной комиссии для Азии и Тихого океана ООН (ЭСКАТО). Всего на форуме были зарегистрированы 143 участника из 12 стран, 60 из них приняли участие в форуме очно. В ходе СЕАКОФ-25 был представлен консенсусный прогноз температурно-влажностного режима по территории Северной Евразии на зиму 2023/2024 гг. Консенсусный прогноз СЕАКОФ-25 гармонично согласуется с оценками ожидаемых особенностей крупномасштабной циркуляции атмосферы по данным мировых прогностических центров. На основе консенсусного прогноза и с использованием методики ЭСКАТО впервые дана экспериментальная оценка вероятного воздействия климатических аномалий на сельское хозяйство, водные ресурсы и борьбу с чрезвычайными ситуациями. В ходе программы также была проведена работа по определению и согласованию национальных профилей климатических рисков в странах Центральной Азии.

Ключевые слова: Северо-Евразийский климатический форум, ЭСКАТО, климатическая модель, климатические риски, консенсусный прогноз, среднесезонные аномалии температуры воздуха и осадков

**Outcomes of 25th session of the North Eurasian Climate
Outlook Forum combined with the project inception regional
workshop under the auspices of the UN ESCAP:
Enhancing knowledge and capacity to build resilience
to slow-onset disasters in Central Asia**

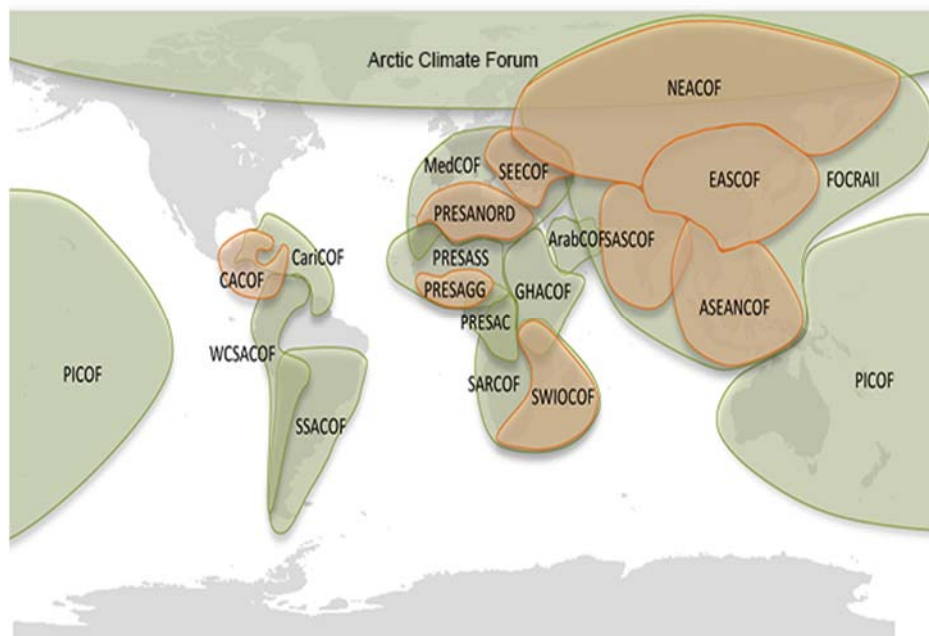
***V.M. Khan, R.M. Vilfand, V.A. Tishchenko, K.A. Sumerova, S.V. Emelina,
E.V. Nabokova, E.S. Kaverina, I.A. Kulikova, E.N. Kruglova, M.A. Tolstykh***

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

The North Eurasian Climate Center held the 25th session of the North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF-25) combined with the project inception regional workshop under the auspices of the UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP). In total, 143 participants from 12 countries were registered at the event, 60 of them took part in the forum in person. During NEACOF-25, a consensus forecast of air temperature and precipitation anomalies for the territory of Northern Eurasia for the winter of 2023/2024 was presented. The NEACOF-25 consensus forecast is in agreement with the outlook of the large-scale atmospheric circulation from other world forecasting centers. Based on the consensus forecast and using the ESCAP methodology, an experimental outlook of the impact on agriculture, water resources and emergency management was given for the first time. During the program, work was also done to identify and harmonize national climate risk profiles in the countries of Central Asia.

Keywords: North Eurasian Climate Outlook Forum, ESCAP, climate model, climate risks, consensus outlook, air temperature and precipitation seasonal anomalies

Северо-Евразийский климатический форум (СЕАКОФ) является одним из 22 региональных климатических форумов по сезонным прогнозам в мире (рис. 1) под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) с целью содействия улучшенного климатического обслуживания в Северной Евразии [2–6].



<https://public-old.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-outlook-products>

Рис. 1. Региональные климатические форумы по сезонным прогнозам под эгидой ВМО.

Fig. 1. Regional climate outlook forums under the auspices of WMO.

Многолетний опыт (11 лет), накопленный в ходе организации и проведения сессий СЕАКОФ [2–6], играет важную роль в сборе, анализе данных, в прогнозировании состояния климатической системы на сезон на территории стран-участниц СНГ и применении этой информации в поддержку принятия социо-экономических решений. Более подробную информацию о форуме и материалы предыдущих сессий СЕАКОФ можно найти по ссылке <http://seakc.meteoinfo.ru/ru/seakof>. Форум способствует обмену научными и техническими знаниями между странами-участниками, что улучшает качество климатических услуг; обеспечивает координацию действий в области мониторинга за климатом, позволяет лучше понимать климатические изменения на региональном уровне; играет ключевую роль в улучшении качества сезонных прогнозов, способствуя снижению рисков и адаптации к изменению климата; стимулирует разработку и внедрение новых технологий и методов исследования климата и способствует продвижению научного прогресса в этой области; является платформой для укрепления сотрудничества между странами-участниками, международными организациями и частным сектором в целях противодействия климатическим изменениям; проводит работу по информированию общественности о возможных последствиях в связи с ожидаемыми климатическими аномалиями.

Подтверждением расширения международного признания и сотрудничества СЕАКОФ является факт о проведении 25-й сессии СЕАКОФ вместе с региональным семинаром ЭСКАТО (Экономическая и социальная комиссия для Азии и Тихого океана) по запуску проекта "Расширение знаний и потенциала для повышения устойчивости к медленно наступающим стихийным бедствиям в Центральной Азии".

ЭСКАТО является одной из крупнейших региональных комиссий ООН, сфокусированной на социально-экономическом развитии стран Азии и Тихого океана на разных уровнях – субрегиональном, региональном и межрегиональном. Членами ЭСКАТО являются 53 страны, включая Российскую Федерацию и страны СНГ, а также несколько нерегиональных членов. Комиссия также включает ассоциированных членов без права решающего голоса.

Охрана окружающей среды и устойчивое развитие являются ключевыми аспектами работы ЭСКАТО. Организация уделяет особое внимание определению приоритетных направлений деятельности через проведение высокоуровневых конференций и совещаний. В рамках этих встреч акцент также ставится на проблемы окружающей среды и развития. Практическая работа ЭСКАТО и ее подразделений направлена на выявление, изучение и прогнозирование основных социально-экономических проблем региона, разработку рекомендаций по их решению и реализацию мер поддержки регионального и субрегионального сотрудничества. Сотрудничество России с ЭСКАТО является важным элементом внешней политики и экономической стратегии на Азиатско-Тихоокеанском направлении. Россия является

донором в рамках Специальной программы для стран Центральной Азии (СПЕКА). Российские средства были использованы для реализации ряда технических проектов, включая уменьшение опасности стихийных бедствий и социальное развитие в регионе.

В последние годы ЭСКАТО активно сотрудничает с ВМО и партнерами по разработке методов использования сезонных прогнозов для оценки воздействия климатических аномалий на ключевые секторы экономики, наиболее чувствительные к климату. Эти подходы учета прогноза климатических аномалий для последующих практических решений стали использоваться в работе субрегиональных форумов по ориентировочным прогнозам климата, таких как SASCOF (Южноазиатский форум по сезонным прогнозам климата) и FOCRA II (Форум по оценке, воздействию и адаптации климатических рисков). Разработанные ЭСКАТО методологии оценки воздействия [8] внедряются в области сельского хозяйства, водного хозяйства и других сфер для обеспечения устойчивого развития и снижения рисков, связанных с климатическими аномалиями и стихийными бедствиями.

ЭСКАТО инициировало сотрудничество с Северо-Евразийским климатическим центром (СЕАКЦ) для повышения эффективности использования консенсусных сезонных прогнозов в пилотных странах Центральной Азии и разработки прогнозов воздействия для секторов сельского хозяйства, водных ресурсов и снижения риска бедствий в поддержку принятия socio-экономических решений с учетом ожидаемых рисков.

В Центральной Азии медленно наступающие стихийные бедствия, такие как засуха, опустынивание и деградация земли, составляют 61 % общих потерь. Эти явления имеют серьезные последствия, в том числе повышенную нестабильность продовольственной, водной и энергетической безопасности. Однако в настоящее время политики имеют ограниченный доступ к информации о рисках и инструментам для принятия решений и защиты уязвимых групп населения.

В этом контексте Российская Федерация поддерживает финансирование проекта ЭСКАТО по расширению знаний и возможностей для повышения устойчивости к медленно наступающим стихийным бедствиям в Центральной Азии. Проект направлен на разработку риск-ориентированных стратегий для многосекторального, устойчивого развития с целью защиты от стихийных бедствий и повышения потенциала Кыргызстана, Казахстана и Таджикистана.

В рамках сотрудничества СЕАКЦ с ЭСКАТО было принято решение о совместном проведении мероприятий СЕАКОФ-25 и регионального семинара ЭСКАТО ООН по запуску проекта «Расширение знаний и потенциала для повышения устойчивости к медленно наступающим стихийным бедствиям в Центральной Азии».

Всего на форуме были зарегистрированы 143 участника из 12 стран, 60 из них приняли участие в форуме очно (рис. 2).

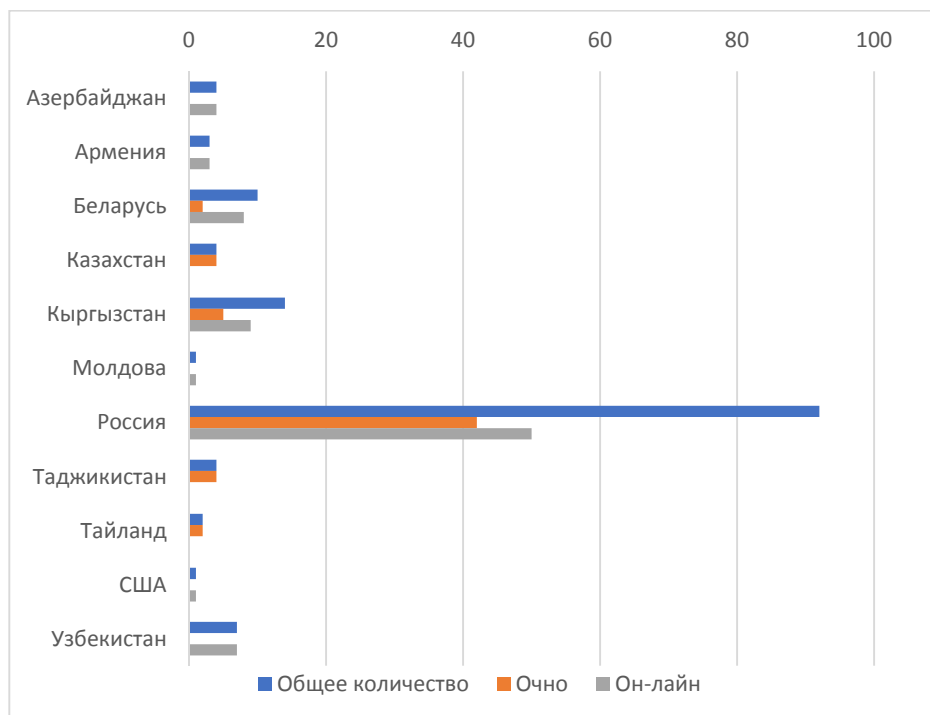


Рис. 2. Численность участников форума по странам.

Fig. 2. Number of forum participants by country.

Объединенное мероприятие было организовано в очно-заочном формате. Предложенный гибридный формат проведения мероприятий обеспечил более широкую доступность участия и удобство, независимо от географического положения участников.

Рабочими языками были русский и английский. В работе приняли участие представители Секретариата ВМО, Всемирной продовольственной программы ООН, Экономической и социальной комиссии для Азии и Тихого океана, ФГБУ Росгидромета, Министерства природных ресурсов, экологии, чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий России, Кыргызстана, метеослужб Азербайджана, Армении, Белоруссии, Молдавии, Казахстана, Киргизстана, Таджикистана, Узбекистана, высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов (рис. 3).

По намеченной программе были представлены доклады международных экспертов, в том числе по специальной программе ЭСКАТО, направленной на решение проблем в области уменьшения опасности стихийных бедствий. На основе прогноза СЕАКОФ и с использованием методики

ЭСКАТО впервые была представлена экспериментальная оценка вероятного воздействия климатических аномалий на сельское хозяйство, водные ресурсы и борьбу с чрезвычайными ситуациями.

Ведущие ученые Российской академии наук выступили с докладами по основным аспектам реализации масштабных проектов, направленных на усовершенствование систем прогнозирования климата. В программе были озвучены доклады представителей метеослужб СНГ о потребностях и практическом использовании консенсусных прогнозов. Особое внимание в ходе работы СЕАКОФ-25 было уделено вопросам взаимодействия с пользователями. Представители сектора здравоохранения, транспорта и сельского хозяйства приняли участие в обсуждениях с докладами.



Рис. 3. Численность представителей организаций, принявших участие в форуме.

Fig. 3. Number of representatives of organizations that took part in the forum.

По программе семинара проекта ЭСКАТО была проведена работа в форме групповых обсуждений по определению и согласованию национальных профилей климатических рисков в странах Центральной Азии. Результаты таких дискуссий могут служить стратегическим руководством

для разработки инструмента поддержки принятия решений и интеграции полученных знаний в систему раннего предупреждения и принятию превентивных мер. По итогам проведенной работы был создан проект ландшафта рисков, учитывающий социально-экономические факторы, климатические и сезонные прогнозы.

В связи с более поздними сроками проведения СЕАКОФ-25 Оргкомитетом было принято решение разослать участникам заблаговременно предварительный прогноз по территории Северной Евразии на зиму 2023/2024 гг., до наступления зимнего сезона, и сопутствующие материалы для практического использования. В ходе самой сессии форума специалисты уточняли консенсусный прогноз и дополняли его необходимой информацией.

Консенсусный прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на зимней сезон 2023/2024 гг.

По общему решению участников СЕАКОФ-25, прогноз температурного режима и осадков был составлен на основе данных трех российских моделей: ПЛАВ, ГГО и ИВМ РАН с равными весовыми коэффициентами (рис. 4, 5).

По заключению участников, зимний сезон 2023/2024 гг. на большей части территории Северной Евразии ожидается теплее нормы (рис. 4). Положительные аномалии прогнозируются на всей территории Кавказа, Центральной Азии, южной половины ЕТР, на Южном Урале, юге Западной Сибири с вероятностью более 60 %, на севере и в центре Казахстана, в Волгоградской, Самарской, Оренбургской областях, на юге Омской и юге Тюменской областях – с вероятностью 75–80 %. В северо-восточной половине ЕТР вероятность теплого зимнего сезона 45–60 %, на северо-западе региона и севере Беларуси – область отрицательных аномалий температуры с вероятностью 45 %. На Кольском п-ове, местами в Архангельской области, местами в центральных областях ЕТР и на юге Беларуси согласованности в прогнозах нет.

Очаги с положительными аномалиями с вероятностью 60–75 % прогнозируются в северных и центральных районах Красноярского края, на всей территории Западной Сибири, за исключением районов Обской Губы – 45 %. Область аномалий температуры выше нормы с вероятностью 30–60 % ожидается в Амурской области, исключая западные районы, в Хабаровском крае, кроме центральной части, и в южных и восточных районах Чукотки. На западе центральных районов Якутии – свыше 45 %, в центре и на востоке – 30 %. В Приморском крае с вероятностью 30–45 % зимний сезон ожидается холоднее нормы.

Избыток осадков возможен (вероятность 45–75%) на большей части ЕТР, исключая северные области, северо-западе Казахстана и Южном Урале, в Центрально-Черноземных областях эта вероятность выше 75 %

(рис. 5). На азиатской территории в прогнозе осадков в основном преобладает неопределенность. Избыток их возможен на востоке Казахстана, юге Средней Сибири, Камчатке и Сахалине с вероятностью 30–45 %. На юго-востоке Узбекистана, востоке Туркмении и западе Таджикистана превышение норм осадков прогнозируется с вероятностью более 30 %.

Выработанный участниками СЕАКОФ-25 консенсусный прогноз ожидаемых климатических условий в предстоящую зиму (рис.4, 5) гармонично согласуется с оценками ожидаемых особенностей крупномасштабной циркуляции атмосферы на зимний сезон 2023/2024 гг. по данным мировых прогностических центров [1]

Большинство центров прогнозируют на бореальную зиму 2023/2024 гг. значительные положительные аномалии ТПО в экваториальных широтах Тихого океана. Согласно прогнозам IRI/CPC, вероятности событий La Nina, нейтральной фазы и El Nino (Nino3.4, пороговые значения: -0.5 °C и 0.5 °C) в предстоящем летнем сезоне: 0 %, 0 % и 100 % соответственно. Значительные положительные аномалии ТПО ожидаются в северной части Тихого океана, связанные с отрицательной фазой PDO. Данное обстоятельство может привести к изменению положения и интенсивности Алеутского минимума и Субтропического максимума.

В Северной Атлантике на большей части акватории ожидаются положительные аномалии ТПО, наиболее значительные – в тропиках, у побережья Африки, что может способствовать формированию режимов циркуляции, связанных с отрицательной фазой Северо-Атлантического колебания (NAO). На фоне преобладания положительных значений индекса Западно-Атлантического колебания WA (в феврале) ожидается ослабление струйного течения над западной Атлантикой, а также Исландского минимума и Азорского максимума. Данные сигналы могут служить индикаторами усиления степени меридиональности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и большей частью территории Европы, особенно во второй половине зимнего периода.

По данным ведущего центра ВМО по мультимодельным прогнозам, зимний сезон 2023/2024 гг. ожидается теплее обычного на большей части территории Северной Евразии, согласно прогнозам большинства моделей. Наиболее значительные положительные аномалии ожидаются на севере Азии. В Восточной Сибири на фоне усиления циркумполярного вихря (положительные значения индекса POL) положительные аномалии также могут быть весьма значительными. Прогностический сигнал со стороны индексов NAO и WA указывает на возможное значительное понижение температуры воздуха на большей части Европы, за исключением южных районов, во второй половине зимнего периода.

Прогнозы осадков большинства центров содержат сигналы, связанные с преобладанием режима увлажнения на большей части Северной Европы, в регионах Сибири, странах Закавказья, на юге Центральной Азии. Засушливые условия прогнозируются на юге Дальнего Востока.

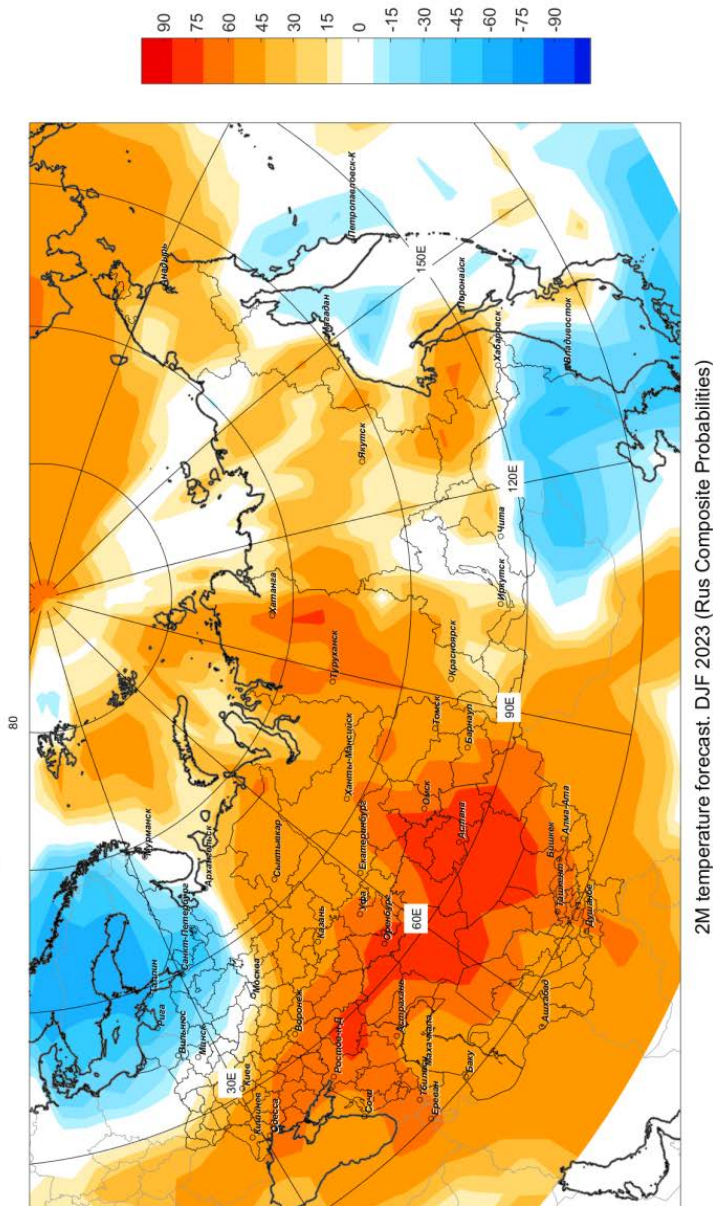
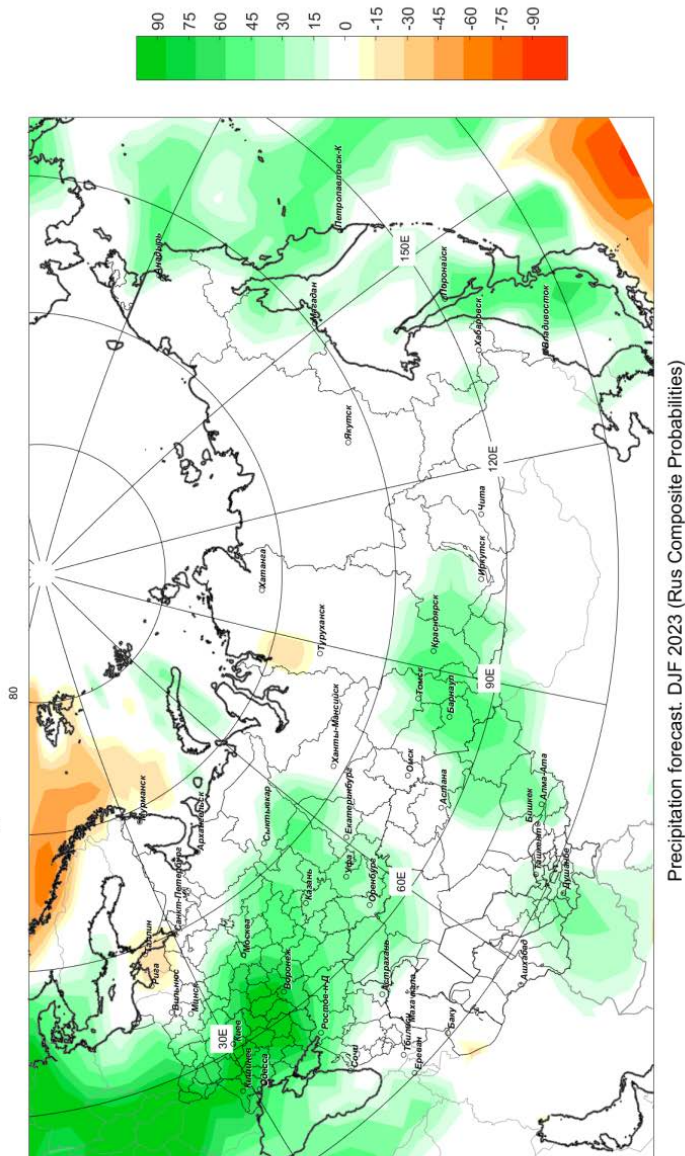


Рис. 4. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии температуры воздуха на зиму 2023/2024 г. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных трех российских моделей (ИНМ-СМ5, ПЛАВ, ГГО). Положительные аномалии обозначены красным, а отрицательные – синим цветом; насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 4. Map with consensus forecast of the average seasonal air temperature anomaly in winter 2023/2024 in probabilistic form based on the interpretation of 3 Russian forecast models (INM-CM5, SL-AV, MGO.). Positive anomalies are indicated in red, and negative anomalies are indicated in blue, the color saturation corresponds to the probability of the anomaly.

Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А. и др.



Precipitation forecast. DJF 2023 (Rus Composite Probabilities)

Рис. 5. Карта консенсусного прогноза среднесезонной аномалии осадков на зиму 2023/2024 гг. в вероятностной форме, рассчитанного на основе интерпретации данных трех российских моделей (INM-CM5, ПЛАВ, ГГО). Положительные аномалии обозначены зеленым, а отрицательные – красным цветом. насыщенность цвета соответствует вероятности аномалии.

Fig. 5. Map with consensus forecast of the average seasonal precipitation anomaly in winter 2023/2024 in probabilistic form based on the interpretation of 3 Russian forecast models (INM-CM5, SL-AV, MGO.). Positive anomalies are indicated in green, and negative anomalies in red, the color saturation corresponds to the probability of the anomaly.

Экспериментальные прогнозы ЭСКАТО ООН возможных рисков воздействия с использованием консенсусных прогнозов СЕАКОФ-25

С использованием консенсусного прогноза СЕАКОФ-25 и на основе методики ЭСКАТО [8] впервые была выполнена оценка возможных рисков воздействия от избыточных осадков на население, сельское хозяйство и гидроэлектроэнергетику в Северной Евразии на предстоящий зимний сезон.

При наложении прогноза осадков на данные о численности населения в сеточном виде были выявлены потенциальные «горячие точки» риска, где высокая вероятность выпадения осадков выше нормы совпадает с высокой концентрацией населения (рис. 6).

Аналогичным образом данные прогноза были совмещены с сельскохозяйственными данными, чтобы понять вероятное влияние количества сезонных осадков на общий объем сельскохозяйственного производства и стоимость продукции (рис. 7).

Также были использованы данные об инфраструктуре электростанций с Азиатско-Тихоокеанского энергетического портала ЭСКАТО, чтобы составить карту воздействия сезонных осадков на состояние ресурсов на гидроэлектростанциях (рис. 8).

На долю гидроэлектростанций приходится около 12 % энергобаланса в Казахстане и более 90 % в Кыргызстане и Таджикистане, и информация о сезонных прогнозах осадков будет иметь решающее значение для обеспечения энергетической безопасности.

Заключение

Объединенный СЕАКОФ-25 с региональным стартовым семинаром ЭСКАТО ООН по проекту «Расширение знаний и потенциала для повышения устойчивости к медленно наступающим стихийным бедствиям в Центральной Азии» прошел успешно. В работе приняли участие 143 человека из 12 стран.

Во время подготовки и проведения СЕАКОФ-25 российские специалисты, ответственные за организацию и проведение мероприятия, выполнили все поручения по техническому заданию. Совместными усилиями экспертов метеослужб стран СНГ, научно-исследовательских организаций и заинтересованных пользователей был выпущен консенсусный прогноз температурно-влажностного режима по территории Северной Евразии на предстоящую зиму 2023/2024 гг.

На базе консенсусного прогноза СЕАКОФ-25 по методике ЭСКАТО представлена экспериментальная оценка вероятного воздействия климатических аномалий на различные сферы экономики с упором на регион Центральной Азии.

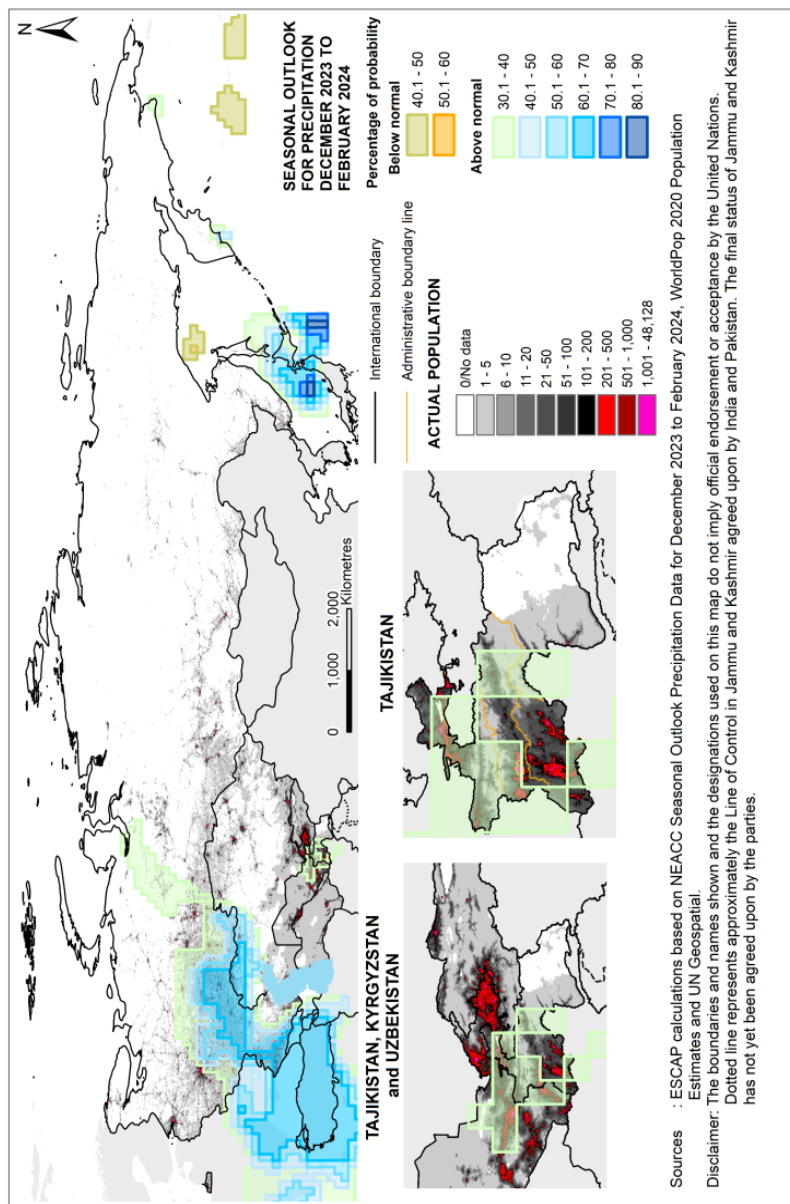


Рис. 6. Карта возможной подверженности населения воздействию повышенного количества осадков зимой 2023/2024 г.
Fig. 6. Map of possible population exposure to increased precipitation in winter 2023/2024.

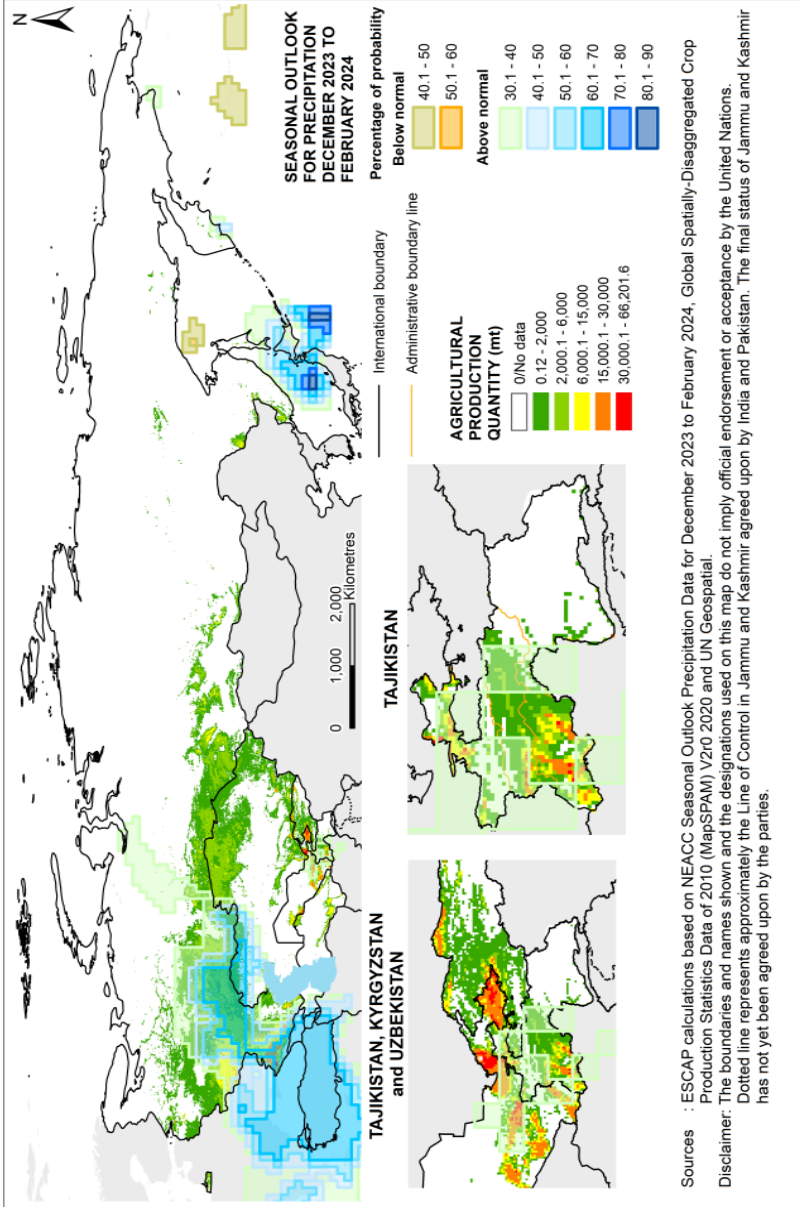


Рис. 7. Карта потенциального воздействия на сельскохозяйственную продукцию избыточного увлажнения зимой 2023/2024 гг.
Fig. 7. Map of the potential impact of excess moisture on agricultural products in winter 2023/2024.

Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А. и др.

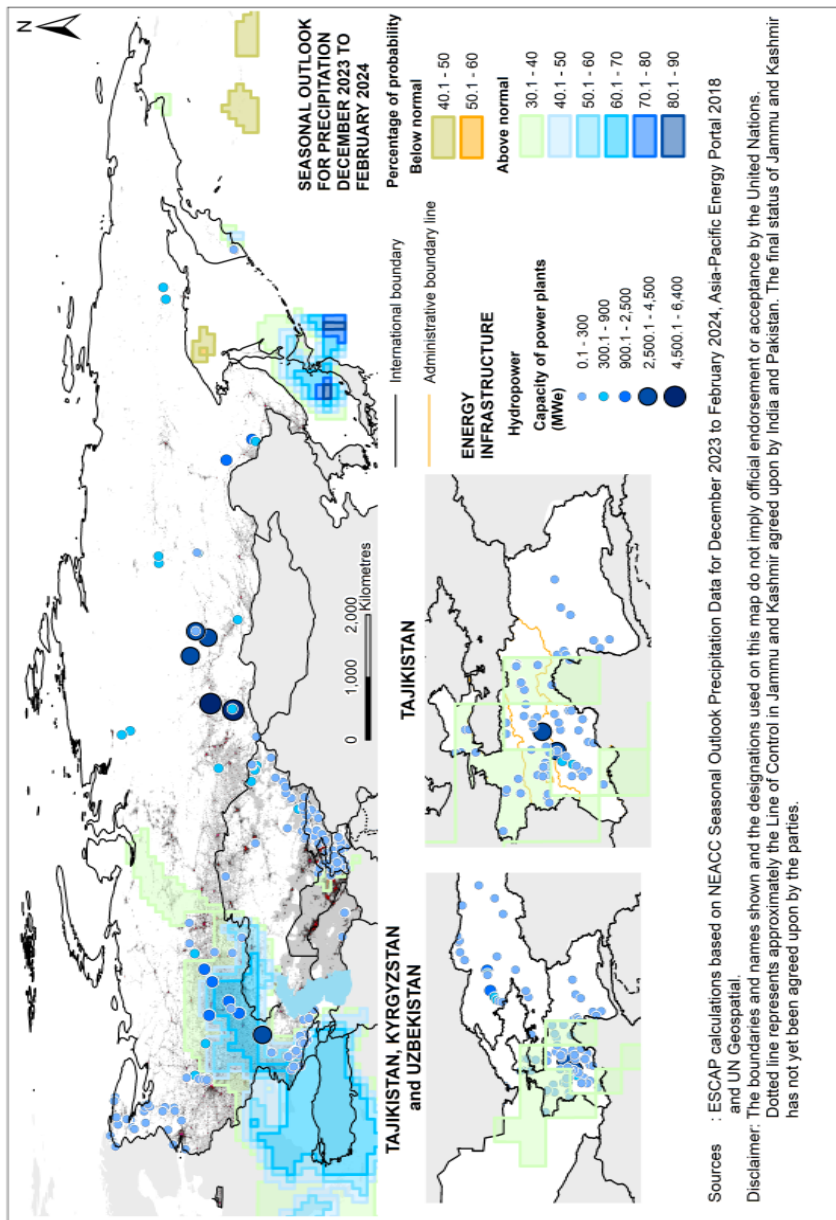


Рис. 8. Карта потенциального воздействия на гидроэнергетику вероятности избыточных осадков зимой 2023/2024 г.
Fig. 8. Potential hydropower impact map of the likelihood of excess precipitation in winter 2023/2024..

Объединение вышеупомянутых двух мероприятий позволило участникам обменяться опытом, обсудить последние тенденции и инновации, а также разработать совместные стратегии для улучшения климатической политики и практик устойчивого развития. Также это было хорошей возможностью для создания новых партнерских отношений и сотрудничества между различными организациями и странами. Участие в таком объединенном мероприятии было полезным как для начинающих, так и для опытных профессионалов, которые стремятся расширить свои знания и повысить свою эффективность в области климатического обслуживания и устойчивого развития.

Работа выполнена в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда (№ 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>).

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 151-160.
2. Емелина С.В., Хан В.М. Перспективы развития специализированного климатического прогнозирования в СЕАКЦ // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2021. № 1 (379). С. 101-111.
3. Хан В.М. Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 5-12.
4. Хан В.М. Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России, 2017. Вып. 366. С. 5-13.
5. Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Каверина Е.С., Сумерова К.А., Куликова И.А., Круглова Е.Н. О результатах восемнадцатой сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-18) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 141-152.
6. Хан В.М., Вильфанд Р.М., С.В. Емелина, Е.С. Каверина, И.А. Куликова, К.А. Сумерова, Тищенко В.А. Двадцать вторая сессия Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-22) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2 (384). С. 181-184.
7. Use of Climate Prediction to Manage Risks // WMO-No. 1174. 2016. 39 p.
8. ESCAP & WMO, Manual for Operationalizing Impact-based Forecasting and Warning Services (IBFWS), 2021, 81 p.

References

1. Vilfand R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tischenko V.A., Tolstych M.A., Khan V.M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 151-160 [in Russ.].

2. *Emelina S.V., Khan V.M.* Plan for the development of specialized climate forecasting in NEACC. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 379, no. 1, pp. 101-111. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-101-111> [in Russ.].

3. *Khan V.M.* Activity of the North-Eurasian Climate Center (NEACC) and the North Eurasian Climate Outlook Forum aimed at climate services improvement within the international structure of WMO *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 358, pp. 5-12 [in Russ.].

4. *Khan V.M.* The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 5-13 [in Russ.].

5. *Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Каверина Е.С., Сумерова К.А., Куликова И.А., Круглова Е.Н.* О результатах восемнадцатой сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-18) *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 376, no. 2, pp. 141-152 [in Russ.].

6. *Khan V.M., Vilfand R.M., Emelina S.V., Kaverina E.S., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Nabokova E.V., Subbotin A.V., Sumerova K.A., Tishchenko V.A.* Twenty-second session of North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF-22). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2022, vol. 384, no. 2, pp. 181-184 [in Russ.].

7. Use of Climate Prediction to Manage Risks. *WMO-No.1174*, 2016, 39 p.

8. ESCAP & WMO, Manual for Operationalizing Impact-based Forecasting and Warning Services (IBFWS), 2021, 81 p.

*Поступила 10.12.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.*

*Submitted 10.12.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»

1. В журнале публикуются статьи по проблемам современных исследований в области теории и практики гидрометеорологического прогнозирования. Статья должна быть оригинальным законченным научным исследованием, в ней рекомендуется особо подчеркнуть научный вклад автора.

Согласно этике научных публикаций, авторы не должны допускать дублирования публикаций, предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

2. В целях обеспечения качества публикуемых материалов и соблюдения авторских прав, все поступающие в редакцию журнала статьи проходят проверку на плагиат (наличие заимствований) через систему «*Antiplagiat*» и только после этого отправляются на рецензирование.

3. Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному одностороннему слепому *рецензированию*. Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии с изложенными ниже требованиями. Не соответствующие требованиям рукописи будут возвращены авторам.

5. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи с заглавием статьи на русском и английском языках;
- индекс УДК, соответствующий теме статьи;
- фамилии и инициалы всех авторов (полностью). Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;

- аффилиация (организация и ее местонахождение) для всех авторов. Автор может указать в аффилиации более одной (2–3) организации с условием, что такая множественная аффилиация при приведении описываемых результатов научных исследований полностью оправдана и достоверна;

- текст авторского резюме (далее – аннотация) на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;

- названия таблиц и подрисуночные подписи на русском и английском языках;

- акт(ы) экспертизы (1 экз.).

6. *Структура статьи* обычно включает введение с постановкой проблемы и указанием актуальности, цели и задачи, методы, результаты, заключение. В конце статьи могут быть приведены благодарности лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, дана ссылка на номера грантов на выполнение работы. *Благодарности* даются на русском, а затем на английском языках.

Объем статьи – до 20 стр. текста (через 1,5 интервала), включая таблицы, рисунки и список литературы. Объем заказных статей определяется редколлекцией.

Текст набирается в формате Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование абзачного отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

- заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);

- в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;

- в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;

– в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих пространственную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к аннотации:

- аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),
 - содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;
- аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

- расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;
- отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;
- выстраиваться от общего к частному;
- включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список литературы должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила российского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м², Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел, например 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы O в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации).

Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подрисуночной подписи (11 кегль):

Рис. 1. Название рисунка.

15. *Формулы* набираются только с использованием редакторов формул Microsoft MathType или Equation Editor и имеют следующие размеры: обычный – 12, крупный индекс – 8, мелкий индекс – 6, крупный символ – 24, мелкий символ – 12. Латинские и греческие буквы – курсив; цифры – прямые. Возможно представление простых формул в тексте (не занимающих отдельную строку и не содержащих дробей) без редактора формул.

16. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

17. Авторы должны ознакомиться и следовать этике научных публикаций, размещенной на сайте издания <https://meteoinfo.ru/ethics-scientific-publications>

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 4 (390)

Под редакцией
канд. физ.-мат. наук Д.Я. Прессмана

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@mecom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 12.12.2023. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 150 экз. Заказ № 1947
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3