

ISSN 2618-9631

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

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

№ 1 (383)

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

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 1 (383)

Москва
2022

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.

Рассматриваются основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 г. На основе аэрологической, спутниковой, радиолокационной и синоптической информации анализируются условия возникновения активного атмосферного процесса с опасными конвективными явлениями в Московском регионе 28 июня 2021 года. Исследуются особенности распределения осадков на территории Азербайджана по трем периодам: 1881–1960, 1961–2016 и 1991–2016 гг. На основе гидродинамической модели рассчитываются характеристики ледяного покрова в северной части Каспийского моря. Описывается технология краткосрочного прогноза уровня в юго-западной части Берингова моря. Представлена система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря. Определяются оптимальные сроки сева озимых культур на территории Беларуси в условиях современного климата. Обобщается опыт метеорологического обеспечения международных спортивных и культурно-массовых мероприятий.

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

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

Варданян Л.Р., канд. техн. наук, Национальная служба Армении по гидрометеорологии и мониторингу, г. Ереван, Армения

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

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

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

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

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

Козьмо К., PhD, Центр прогнозов погоды и климатических исследований, Сан-Жозе дос Кампос, Бразилия

Кричак С.О., д-р физ.-мат. наук, Тель-Авив, Израиль

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

Полевой А.Н., д-р геогр. наук, Одесский государственный экологический университет, г. Одесса, Украина

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

Сокол З., д-р наук, Институт физики атмосферы Академии наук Чешской Республики, Прага, Чешская Республика

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

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

The main features of the temperature regime and atmospheric circulation in the Northern Hemisphere in the summer of 2021 are considered. Based on aerological, satellite, radar, and synoptic information, the conditions for occurrence of an active atmospheric process with severe convective phenomena in the Moscow region on June 28, 2021 are analyzed. The features of precipitation distribution on the territory of Azerbaijan are studied for three periods: 1881-1960, 1961-2016, and 1991-2016. Based on the hydrodynamic model, the characteristics of sea ice in the northern Caspian Sea are calculated. The technology for short-range forecasting of water level in the southwestern Bering Sea is described. The system of wind upwelling forecast for the Russian Black Sea coast is presented. Optimal periods for sowing winter crops on the territory of Belarus under conditions of modern climate are determined. The experience of weather services for international sports and cultural events is summarized.

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

Vardanyan L.R., PhD in Engineering, National Monitoring and Weather Service of Armenia

Vasiliev P.P., Doctor of Physical and Mathematical 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

Coelho C., PhD, Center for Weather Forecasts and Climate Studies CPTEC/INPE – BRAZIL, San Jose dos Campos, Brazil

Krichak S.O., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Tel-Aviv, Israel

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

Polevoy A.N., Doctor of Geographical Sciences, State Ecological University, Odessa, Ukraine

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

Sokol Z., Doctor Science, Institute of Atmospheric Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic

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

Khrystoforov 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

СОДЕРЖАНИЕ

Общая циркуляция и характеристики атмосферы

Волны тепла и блокирующие антициклоны летом 2021 года в прогнозах и наблюдениях	7
<i>Куликова И.А., Круглова Е.Н., Сумерова К.А., Хан В.М.</i>	
Конвективный шторм в Московском регионе 28 июня 2021 года	22
<i>Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М.</i>	
Пространственно-временные особенности распределения осадков на территории Азербайджана	43
<i>Сафаров С.Г., Гусейнов Д.С., Кулиев З.Г., Ибрагимова И.В.</i>	

Морские прогнозы

Моделирование характеристик ледяного покрова Каспийского моря на основе модели CICE	57
<i>Нестеров Е.С., Жупанов В.Д., Федоренко А.В.</i>	
Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря	71
<i>Любицкий Ю.В., Романский С.О.</i>	
Система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря	89
<i>Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Репков Д.С.</i>	

Агрометеорологические прогнозы

Определение оптимальных сроков сева озимых культур на территории Беларуси в условиях современного изменения климата	108
<i>Мельник, В.И., Бондаренко Ю.А., Бровка Ю.А., Хитриков М.А.</i>	

Прикладные аспекты гидрометеорологической информации и прогнозов

Анализ опыта метеорологического обеспечения спортивных и культурно-массовых мероприятий	128
<i>Дмитриева Т.Г., Васильев Е.В., Лукьянов В.И.</i>	

CONTENTS

General circulation and characteristics of the atmosphere

The forecasts and observations of heat waves and blocking anticyclones in the summer of 2021	7
<i>Kulikova I.A., Kruglova E.N., Sumerova K.A., Khan V.M.</i>	
The convective storm in the Moscow Region on June 28, 2021	22
<i>Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M.</i>	
Spatiotemporal features of the precipitation regime within the territory of Azerbaijan	43
<i>Safarov S.H., Huseynov J.S., Guliyev Z.G., Ibrahimova I.V.</i>	

Marine forecasts

Modeling the characteristics of the Caspian Sea ice cover based on the CICE model	57
<i>Nesterov E.S., Zhupanov V.D., Fedorenko A.V.</i>	
Method and technology of short-term forecasting of sea level variations in the southwestern Bering Sea	71
<i>Lyubitskiy Yu.V., Romanskiy S.O.</i>	
Wind upwelling forecast for the Russian Black Sea coast	89
<i>Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Repkov D.S.</i>	

Agrometeorological forecasts

Determination of optimal sowing periods for winter crops on the territory of Belarus in the context of modern climate change	108
<i>Melnik V.I., Bondarenko Yu.A., Brovka Yu.A., Khitrykau M.A.</i>	

Applied aspects of hydrometeorological information and forecasts

Analyzing experience of weather services for sports and cultural events	128
<i>Dmitrieva T.G., Vasil'ev E.V., Luk'yanov V.I.</i>	

**Новая номенклатура специальностей ВАК
и что изменится в журнале
«Гидрометеорологические исследования и прогнозы»**

На основании рекомендации Высшей аттестационной комиссии (ВАК) приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 года № 118 утверждена новая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени. Количество специальностей сократилось с 430 до 351. Их укрупнение позволит развивать междисциплинарные исследования. Актуализированы наименования научных специальностей. С новой номенклатурой научных специальностей можно ознакомиться на сайте <https://izd-mn.com/wp-content/uploads/novaya-nomenklatura-vak.pdf>.

Защита диссертаций по старой номенклатуре продлится до 16 октября 2022 года.

Журнал «Гидрометеорологические исследования и прогнозы» включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Рубрики журнала соответствуют научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические);
- 25.00.28 Океанология (географические науки);
- 25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы (физико-математические науки)
- 25.00.30 Метеорология, климатология, агрометеорология (географические, физико-математические науки)

В новой номенклатуре останутся без изменений (поменяют шифр) специальности:

1.6.16 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические, физико-математические науки);

1.6.17 Океанология (географические, физико-математические науки)

Новая специальность:

1.6.18 Науки об атмосфере и климате (географические науки, физико-математические науки)

согласно Рекомендации ВАК от 10 декабря 2021 г. N-32/1-НС соответствует научным специальностям 25.00.29 и 25.00.30. Для добавления новой научной специальности журнал должен пройти полную **перерегистрацию в ВАК**.

Уважаемые авторы научных публикаций: аспиранты,
докторанты и соискатели!

Если Вы готовитесь к защите по специальностям 25.00.29 и 25.00.30, пожалуйста, присылайте комплекты статей до 10 июня 2022 года для опубликования их в номерах журнала № 2 (384) и № 3 (385).

Информация о результатах перерегистрации (добавлении специальности) будет размещена в одном из следующих номеров и на сайте журнала.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-7-21>

УДК 551.515

Волны тепла и блокирующие антициклоны летом 2021 года в прогнозах и наблюдениях

И.А. Куликова¹, Е.Н. Круглова¹, К.А. Сумерова¹, В.М. Хан^{1,2}

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва, Россия;

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова

Российской академии наук, г. Москва, Россия

kulikova@mecom.ru, kruglova@mecom.ru, sum-ksusha@yandex.ru, khan@mecom.ru

На основе данных реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов ERA5 о приземной температуре воздуха и геопотенциале поверхности 500 гПа с суточным разрешением рассматриваются основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 года. С использованием оперативной версии полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогноза Гидрометцентра России и Института вычислительной математики РАН (ИЛМВ) определены возможности прогнозирования волн тепла и холода, а также индекса экстремальности EFI на фоне квазистойчивых режимов циркуляции типа блокирования. Показана зависимость качества прогнозов от фазы развития блокирующего антициклона (начало блокирования, зрелая фаза, разрушение блокинга). Полученные результаты могут использоваться при составлении прогнозов экстремальных метеорологических явлений на внутрисезонных масштабах времени.

Ключевые слова: экстремальные метеорологические явления, волны тепла и холода, блокирующие антициклоны, долгосрочные метеорологические прогнозы

The forecasts and observations of heat waves and blocking anticyclones in the summer of 2021

I.A. Kulikova¹, E.N. Kruglova¹, K.A. Sumerova¹, V.M. Khan^{1,2}

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

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

kulikova@mecom.ru, kruglova@mecom.ru, sum-ksusha@yandex.ru, khan@mecom.ru

The main features of the temperature regime and atmospheric circulation in the Northern Hemisphere in the summer of 2021 are considered based on the ERA5 reanalysis (ECMWF) of surface air temperature and 500 hPa geopotential height with a daily resolution. Using the operational version of the SL-AV semi-Lagrangian atmosphere model for long-term forecasting, the potential of forecasting heat and cold waves, as well as the Extreme Forecast Index (EFI) against a background of quasi-stable circulation modes of the blocking type are determined. The dependence of the forecast skill on the phase of development of the blocking anticyclone (initiation, mature phase, dissipation) is shown. The results can be used to make forecasts of extreme weather events on intraseasonal timescales.

Keywords: extreme weather events, heat and cold waves, blocking anticyclones, long-term weather forecasts

Введение

Климат Земли никогда не отличался постоянством. Однако существуют убедительные доказательства, основанные на данных наблюдений и научных исследованиях, беспрецедентных темпов глобального потепления климата в последние десятилетия, связанные с антропогенными воздействиями. При этом каждая доля градуса при повышении температуры имеет значение и может привести к далеко идущим, а в некоторых случаях к катастрофическим последствиям. Лето 2021 года, бесспорно, внесет весомый вклад в глобальное потепление климата. По данным Национального центра прогнозов США (NCEP/NOAA) [https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/ytd/6/1880-2021], оно стало одним из самых жарких в Северном полушарии за всю историю наблюдений начиная с 1880 г., лишь на десятую долю градуса уступив рекорду 2020 г. На территории России средняя температура лета повторила рекордное значение 2016 г., на азиатской части страны стало самым жарким, на европейской – вторым после 2010 г. Согласно новому межведомственному докладу «Единство в науке», 2021 год [<https://public.wmo.int/ru/>], концентрация парниковых газов в атмосфере продолжает оставаться на рекордном уровне, обрекая планету на опасное нагревание в будущем. Повышение глобальных температур усиливает разрушительные экстремальные погодные явления по всему миру, оказывая растущее воздействие на экономику и общество. В таких условиях исследования возможностей долгосрочного прогнозирования экстремальных метеорологических явлений (ЭМЯ) приобретают особую актуальность.

В данной статье рассматриваются основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 г. Отмечается значительное преобладание волн тепла по сравнению с волнами холода во всех регионах Северного полушария. Особое внимание уделяется режимам атмосферной циркуляции типа блокирования. С использованием оперативной версии полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогноза ПЛАВ дается оценка региональной предсказуемости волн тепла и индекса экстремальности EFI. Показана зависимость качества прогнозов от фазы развития блокирующего антициклона (начало блокирования, зрелая фаза, разрушение блокинга). Отмечается, что во всех регионах, хотя и в разной степени, прогностическая продолжительность волн тепла превосходит фактическую. Полученные результаты могут использоваться при составлении прогнозов ЭМЯ на внутрисезонных масштабах времени.

1. Исходные данные и методы исследования

Предсказуемость температурного режима и блокирующих антициклонов в летний период 2021 г. исследуется на основе оперативной версии полулагранжевой модели атмосферы для долгосрочного прогноза

ПЛАВ [2, 3]. В качестве характеристик температурного режима использовались индексы волн тепла WSDI и волн холода CSDI [9], а также индекс экстремальности EFI [1]. Количественными критериями блокирования служили индексы, предложенные в [8, 11]. Обзор и анализ основных недостатков и преимуществ различных индексов блокирования дается в [4]. Структура блокирующего образования характеризуется меридиональными градиентами в полях поверхности 500 гПа, которые рассчитываются для каждой долготы и для Северного полушария представляются следующим образом:

$$\text{GHGS} = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{(\varphi_0 - \varphi_s)}, \quad \text{GHGN} = \frac{Z(\varphi_n) - Z(\varphi_0)}{(\varphi_n - \varphi_0)},$$

где Z – средние за пентаду значения H500; $\varphi_n = 80^\circ \text{N} + \delta$; $\varphi_0 = 60^\circ \text{N} + \delta$; $\varphi_s = 40^\circ \text{N} + \delta$; $\delta = 0^\circ \pm 5^\circ$. Наличие блокинга на данной долготе в конкретный срок определяется, если хотя бы для одного значения индекса выполняются условия: $\text{GHGS} > 0$ и $\text{GHGN} < -10$ м/град.ш. (критерий ТМ). Критерий предполагает отсечение блокирующего антициклона с юга (полное или частичное с омегаобразной конфигураций изогипс), но не включает не отсекающиеся стационарные гребни. При этом к северу от блокирующего антициклона должен существовать хорошо выраженный западный поток. Несмотря на имеющиеся недостатки, данный критерий позволяет простым и удобным способ идентифицировать явление локального блокинга в любой конкретный срок.

Исходной информацией для расчета индексов WSDI, CSDI, EFI, а также критериев блокирования GHGN, GHGS и ТМ, служили архивы прогнозов (на 46 суток), средней суточной температуры и геопотенциала поверхности 500 гПа, стартовавшие от начальных данных за 13, 20 и 27 мая, 3, 10, 17 и 24 июня, 1, 8 и 15 июля 2021 года (10 начальных дат). Эталоном служили поля температуры воздуха и геопотенциала поверхности 500 гПа, полученные на базе реанализов ЕЦСПП (ERA5) с суточным разрешением за период с 1 июня по 31 августа 2021 года. В качестве базового периода использовался период 1985–2010 гг.

2. Температурный режим

В течение всего летнего периода на большей части территории Северного полушария преобладали положительные аномалии температуры воздуха. Наиболее значительные отклонения от климата в первой половине лета (рис. 1а) наблюдались в Северной Америке, в Европе, на Дальнем Востоке и в Якутии. В странах Западной Европы, на Европейской территории России и в Якутии во второй и третьей декаде июня, а также в первой и второй декаде июля были установлены новые рекорды тепла: температура поднималась выше $+35^\circ$, вплотную приближаясь к сорокоградусной отметке.

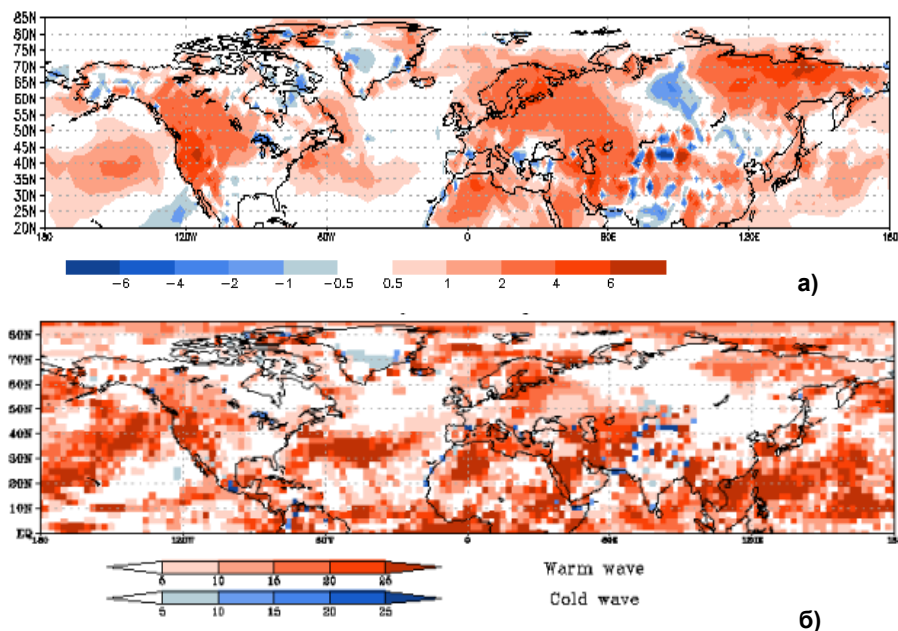


Рис. 1. Пространственное распределение аномалий приземной температуры воздуха (а) и индексов WSDI и CSDI (б) в первой половине лета 2021 г. Аномалии и индексы получены с использованием климата 1985-2010 гг. Исходными данными служили поля приземной температуры воздуха, полученные на основе суточных полей реанализа ЕЦСПП (ERA5).

Fig. 1. Spatial distribution of surface air temperature anomalies (a) and WSDI and CSDI indices (б) in the first half of summer 2021. Anomalies and indices were obtained using the 1985-2010 climate. The initial data were the surface air temperature fields obtained on the basis of the ECMWF daily reanalysis fields (ERA5).

В последнюю декаду июня жара захватила западные территории США и Канады. В канадской провинции Британская Колумбия зафиксирован исторический максимум: 29 июня днем столбики термометров поднимались до отметки $+49.5^\circ$, в Сиэтле, столице штата Вашингтон, температура впервые в истории перешагнула рубеж в 40° , а в Долине Смерти достигла $+54^\circ$. При этом наиболее значительные по продолжительности (более 20 дней) волны тепла наблюдались в странах Восточной Европы, на северо-западе европейской России, на севере Якутии и на западе США (рис. 1б).

Во второй половине лета эпицентрами жаркой погоды стали южные районы европейской России (рис. 2а), где жаркая погода сохранялась до конца августа. Аномальное тепло захватило почти всю, за исключением северо-востока, территорию России. В Якутии и на Дальнем Востоке (Хабаровский край, Амурская, Сахалинская и Магаданская обл.) даже в августе местами температура воздуха достигала $30\text{--}35^\circ$. В итоге в России

прошедший август стал самым жарким за всю историю метеорологических наблюдений, не уступив рекорду 2016 года.

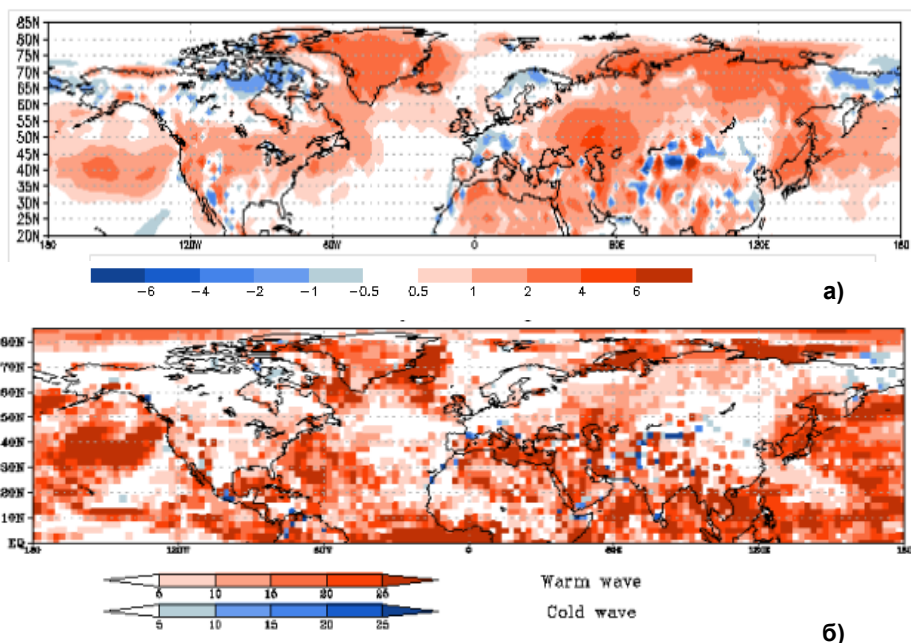


Рис. 2. Пространственное распределение аномалий приземной температуры воздуха (а) и индексов WSDI и CSDI (б) во второй половине лета 2021 г. Аномалии и индексы получены с использованием климата 1985-2010 гг. Исходными данными служили поля приземной температуры воздуха, полученные на основе суточных полей реанализа ЕЦСПП (ERA5).

Fig. 2. Spatial distribution of surface air temperature anomalies (a) and WSDI and CSDI indices (b) in the second half of summer 2021. Anomalies and indices were obtained using the 1985-2010 climate. The initial data were the surface air temperature fields obtained on the basis of the ECMWF daily reanalysis fields (ERA5).

В августе жара захватила юг и восток Европы. На юге Италии, на Мальте, в Греции и ряде Балканских стран, а также в Испании температура воздуха достигала 40–45°. На Сицилии был зафиксирован новый абсолютный максимум температуры для континента +48.8°. Новые рекорды были установлены во многих пунктах Испании и Франции, в том числе в Мадриде. Абсолютный рекорд достигнут в Исландии +29.4°. В Северной Америке положительные аномалии стали преобладающими на северо-востоке региона, особенно в арктической хоне. На востоке Гренландии за полярным кругом 29 июля впервые в метеорологической истории была зарегистрирована температура +23.4°. В странах Средиземноморья, на юге европейской России и Урала, на северо-востоке Канады продолжительность волн тепла превысила 20 дней (рис. 26).

3. Режимы атмосферной циркуляции

Во всех рассмотренных случаях крупные аномалии температурного режима сформировались на фоне квазиустойчивых атмосферных режимов типа блокирования. На рис. 3 приводятся диаграммы Ховмюллера, построенные для индексов GHGN и GHGS, характеризующих атмосферную циркуляцию на уровне поверхности 500 гПа, соответственно, в высоких (55–85° с. ш.) и более низких (35–65° с. ш.) широтах Северного полушария летом 2021 года.

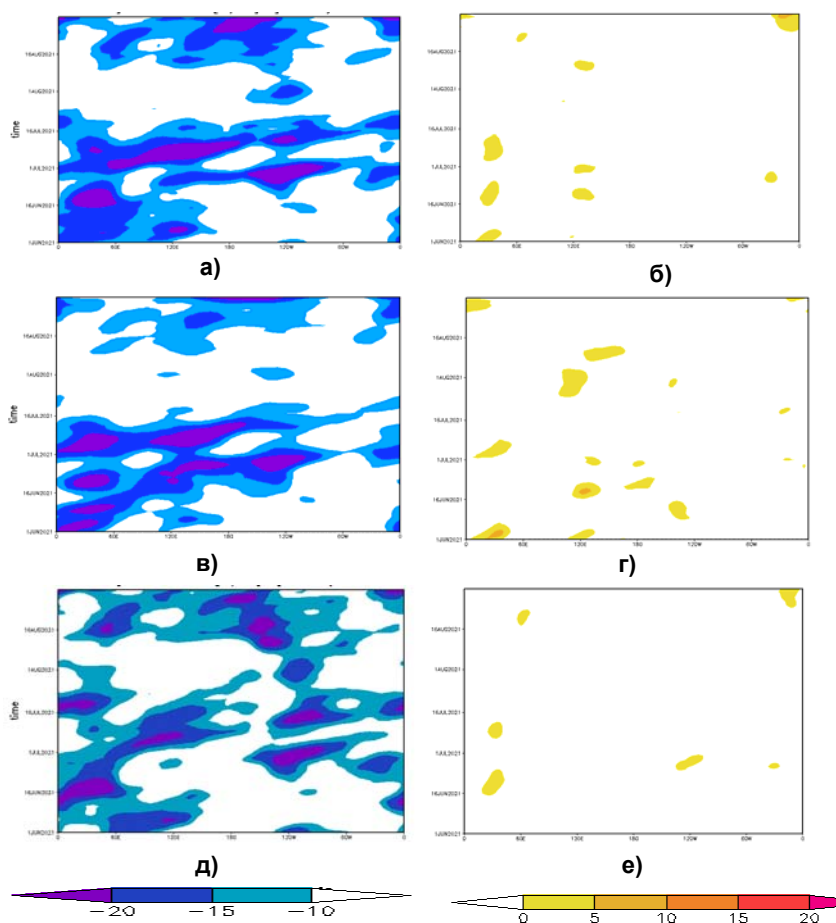


Рис. 3. Пространственно-временные диаграммы индексов блокирования: GHGN1 (а); GHGN2 (в), GHGN3 (д); GHGS1 (б); GHGS2 (г); GHGS3 (е). Лето 2021 г. Исходными данными служили средние суточные поля H500, полученные на основе реанализа ЕЦСПП (ERA5).

Fig. 3. Space-time diagrams of blocking indices: GHGN1 (а), GHGN2 (в); GHGN3 (д); GHGS1 (б); GHGS2 (г); GHGS3 (е). Summer 2021. The initial data were the average daily fields of H-500, obtained on the basis of ECMWF reanalysis (ERA5).

Как видно на рис. 3а, 3в и 3д, в первой половине лета наиболее значительные отрицательные значения индекса ($GHGN < -10$ м/град.ш.) наблюдались над западом Северной Атлантики и Европой.

Начиная со второй декады июня и до середины июля благоприятные (при отрицательных значениях индекса $GHGN < -10$ м/град.ш.) условия для процесса обрушения волн Россби и развития блокирования в средней тропосфере отмечались практически во всех регионах Северного полушария. При этом циркумполярный вихрь был довольно активным: аномалии геопотенциала в районе полюса по абсолютной величине превышали 10 дам. Над западом Северной Америки мощный гребень блокировал движение тихоокеанских циклонов на восток, обусловив тем самым продолжительную волну тепла. В то же время низкие широты оказались более спокойными: возмущения, характеризуемые индексами $GHGS$ ($GHGS > 0$), носили эпизодический и кратковременный характер (рис. 3б, 3г и 3е).

Наибольшее количество эпизодов блокирования в течение лета наблюдалось в Европе и на севере Азии. Интересной особенностью лета 2021 г. являлась необычайно высокая активность Восточно-Атлантического колебания. При этом средние месячные значения индекса EA (Eastern Atlantic oscillation) по данным Центра климатических прогнозов США (Climate Prediction Centre, CPC, – <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/wp.shtml>) в июле составили 2.2. В течение всего месяца в средней тропосфере над Атлантикой и севером Африки преобладающими были антициклонические формы атмосферной циркуляции, обеспечивающие вынос тропических воздушных масс в страны Средиземноморья, Восточной Европы и на запад Европейской территории России.

Специфическая особенность атмосферной циркуляции над Европой проявилась в крупномасштабной неустойчивости зонального потока, ставшей причиной образования мощной системы взаимодействующих антициклона над севером и востоком Западной Европы (по данным CPC значения индекса Скандинавского колебания SC в июле составили 1.5) и циклона над Черным морем, – блокирования расщепляющегося типа. При такой конфигурации изогипс в средней тропосфере циклоны, огибая блоки, смещались намного севернее или южнее своих обычных траекторий (наводнения в Германии, Австрии и Швейцарии, ливни в Москве). Наиболее значительные положительные аномалии геопотенциала (до 10 дам) в июле наблюдались над севером Атлантики и западом Тихого океана.

Во второй половине лета степень меридиональности атмосферной циркуляции значительно увеличилась. В августе мощные антициклоны (аномалии до 12 дам) утвердились над севером Атлантики и Уралом. В течение всего летнего периода 2021 г. знак индекса EA/WR (East Atlantic/Western Russia) по данным Центра климатических прогнозов

США (CPC) оставался отрицательным – наибольшее его среднемесячное значение в августе составило -2.4. Как известно [5], отрицательная фаза индекса EA/WR ассоциируется с антициклоническими формами атмосферной циркуляции над территорией европейской России, Урала и Сибири. Мощные гребни (аномалии до 10 дам) в августе отмечались также над востоком Тихого океана и севером Дальнего Востока. На Якутию по западной периферии гребня с юго-западными ветрами продолжилось наступление теплого воздуха.

4. Верификация прогнозов

Качество прогнозов рассматривалось для отдельных случаев, ассоциируемых с волнами тепла различной продолжительности, конкретными значениями индекса экстремальности EFI, а также наличием или отсутствием с точки зрения критерия ТМ блокинга. При этом волны тепла с использованием пороговых значений, равных 5, 6, ..., 15 дням, представлялись как простые бинарные (дихотомические) да/нет события, а их прогнозы, в свою очередь, как да/нет категориальные прогнозы. Для индекса EFI порогами служили значения, равные 0.3, 0.4, ..., 0.8. При всем разнообразии используемых статистик основой для верификации прогнозов бинарных событий (категориальных прогнозов) служат двухвыходовые таблицы сопряженности прогнозов и наблюдений конкретного явления. Обозначим через a и b – число оправдавшихся и неоправдавшихся прогнозов соответственно, c – число пропущенных (не предсказанных) событий, d – число правильных прогнозов отсутствия явления. Подробный обзор мер качества для двухвыходовых таблиц сопряженности представлен в [7, 12].

Среди характеристик таблиц сопряженности различают описательные и содержательные меры качества (descriptive and performance measures). Первые представлены «выборочной климатологией», или «наблюденной частотой явления» (base rate, sample climate), $= (a+c)/n$, и «прогностической частотой явления» (forecast rate), $= (a+b)/n$, где $n=a+b+c+d$. Среди содержательных мер, которые в отечественной литературе носят названия «критериев качества», далее будут использованы: вероятность обнаружения или «доля попаданий» (Hit Rate), $HR = a/(a+c)$; «доля ложных тревог» (False Alarm Ratio), $FAR = b/(a+b)$; коэффициент успеха (Success Ratio), равный доле оправдавшихся прогнозов в общем числе прогнозов явления, $SR=a/(a+b)=1-FAR$; индекс смещения частот (Frequency Bias Index), $FBI=(a+b)/(a+c)$, характеризующий соотношение повторяемости прогностических и фактических событий; «критерий Пирса» (Peirce skill score), $PSS = HR-FAR$. Наглядным способом анализа таблиц сопряженности является построение характеристических диаграмм (performance diagram) [10], агрегирующих сразу несколько показателей качества прогноза (HR , SR и FBI).

Более универсальными, обладающими рядом преимуществ (независимость от частоты явления, невырожденность предела, ограниченность диапазона и т. д.), позволяющими оценивать качество прогноза, в том числе, очень редких событий, являются показатели EDS (Extreme Dependency Score), EDI (Extremal Dependence Index) и их симметризованные варианты SEDS и SEDI [6, 7]. Воспользуемся наиболее простым показателем, а именно: индексом экстремальной зависимости EDI, который вместе со стандартным отклонением S выражается следующим образом:

$$EDI = \frac{\log F - \log H}{\log F + \log H};$$

$$S = \frac{2 \log F + \left(\frac{H}{1-H} \right) \log H}{H(\log F + \log H)^2} \sqrt{\frac{H(1-H)}{np}}.$$

В предположении нормальности распределения стандартные ошибки S , будучи умноженными на 1.96, дают приблизительную оценку 95%-го доверительного интервала.

При расчетах показателей качества используется метод агрегирования, или пулинга, при котором игнорируются различия между пространственными и временными измерениями, и выборки по всем точкам на пространственно-временных разрезах сливаются в один ансамбль, для которого проводится расчет всех характеристик таблицы сопряженности. При этом доверительные интервалы для характеристик таблиц сопряженности рассчитываются в предположении нормальности распределения, что позволяет избежать зависимости оценок интервалов от объема выборки для случаев, если объем является достаточно представительным (около сотни пар прогнозов и наблюдений). Координаты регионов и временные интервалы, для которых проводится агрегирование обозначены ранее.

Для наглядного представления региональной предсказуемости волн тепла строились характеристические диаграммы (performance diagram) (рис. 4) отдельно для регионов: Северное полушарие (0–360°, 40–70° с. ш.), Арктика (0–360°, 70–85° с. ш.), Тропики (0–360°, 20° ю. ш. – 20° с. ш.), Европа (10–60° в. д., 35–70° с. ш.), Северная Азия (60–190°, 40–75° с. ш.), Северная Америка (60–120° з. д., 40–70° с. ш.) на основе осредненных (для 10 начальных дат прогноза) значений оценок HR, SR, FBI и CSI. Заметим, что успешность прогнозов на диаграмме тем выше, чем ближе расположение точки к верхнему правому углу квадрата. Как видно (рис. 4а), для Северного полушария в целом оценки FBI, характеризующие соотношение повторяемости прогностических и фактических событий, моделью ПЛАВ завышаются, а качество прогнозов волн тепла продолжительностью более 10 дней оказываются ниже уровня случайного.

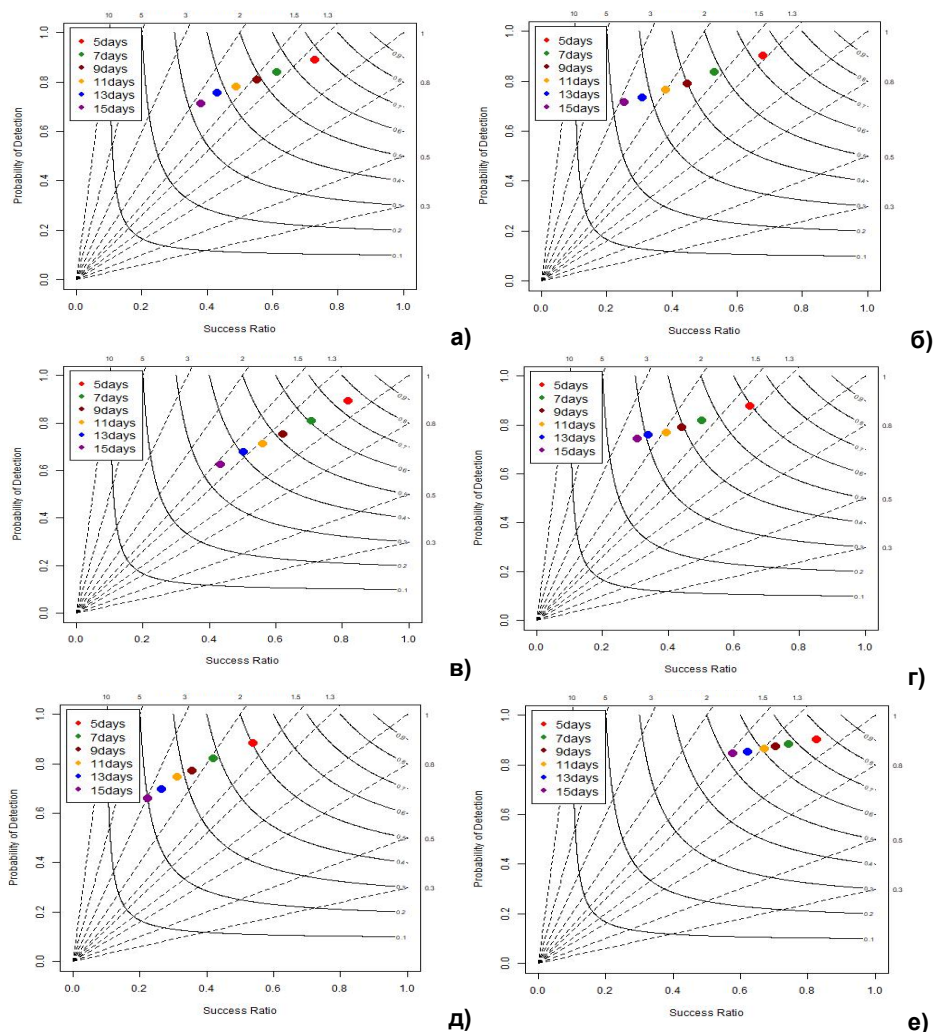


Рис. 4. Характеристические диаграммы успешности прогнозов волн тепла различной (от 5 до 15 дней) продолжительности для 6 регионов: Северное полушарие (а); Арктика (б); Европа (в); Северная Азия (г); Северная Америка (д); Тропики (е). Сплошные кривые – изолинии CSI, пунктирные линии – FBI.

Fig. 4. Characteristic charts of the success of forecasts of heat waves of various (from 5 to 15 days) duration for 6 regions: Northern Hemisphere (a); Arctic (б); Europe (в); North Asia (г); North America (д); Tropics (е). Solid curves – CSI isolines, dashed lines – FBI.

Для Арктики (рис. 4б) значения FBI возрастают, а «предел предсказуемости» волн тепла уменьшается до 7 дней. Более успешными оказываются прогнозы для региона Европа (рис. 4в), где значения индекса смещения частот FBI приближаются к 1, а «предел предсказуемости»

увеличивается до 2 недель. Регион Северная Азия (рис. 4г) по предсказуемости приближается к Арктике и намного уступает региону Европа. Наихудшие оценки получены для Северной Америки (рис. 4д). Наиболее успешными, как и следовало ожидать, оказались прогнозы в тропиках (рис. 4е), где прогностическая повторяемость волн тепла приблизилась к фактической, а доля оправдавшихся прогнозов составила 60–80 %. При этом во всех регионах, хотя и в разной степени, прогностическая продолжительность волн тепла превосходила фактическую, что может служить косвенным признаком наличия погрешностей в радиационном блоке модели, в частности в завышении (занижении) потоков коротковолновой и нисходящей длинноволновой радиации (эффективного излучения).

Прогнозы индекса экстремальности EFI в контексте региональной предсказуемости нельзя признать удовлетворительными. При этом повторяемость прогностических значений уступает фактической: оценки индекса смещения частот FBI значительно меньше 1, особенно для градаций, превышающих 0.7 и 0.8. Наилучшие оценки предсказуемости, так же как и для волн тепла, получены для тропиков и региона Европа.

Оценки качества прогнозов волн тепла и индекса экстремальности EFI в значительной степени зависят от устойчивости режимов атмосферной циркуляции. Летом 2021 г., особенно в первой его половине, режимы атмосферной циркуляции типа блокирования с точки зрения критерия ТМ наблюдались практически во всех регионах Северного полушария (рис. 5).

По данным реанализа (рис. 5а) в начале лета блокирующие антициклоны сформировались на Европейской территории России и в Якутии. Прогнозы факта наличия или отсутствия блокирования от 3 июня (рис. 5б), приходящиеся на период зрелой фазы, хорошо согласуются с фактическими данными. Значения параметра EDI (ошибки прогноза) для первой прогностической недели составляют 0.88 (0.05) и 0.90 (0.10), соответственно, для Европы и Якутии. Более мощное развитие на Северном полушарии процессы блокирования получили во второй половине июня (рис. 5в), когда блокирующие антициклоны были отмечены не только в Европе, Якутии, на Дальнем Востоке, но также в Тихом океане, в Северной Америке и на востоке Атлантики.

Однако в модельных данных (начальная дата прогноза 10 июня) блокирующие образования отсутствуют, т. е. начальная фаза развития блокирования моделью ПЛАВ не была предсказана. Более удачными на фоне уже сложившихся блокингов оказались прогнозы от 17 июня (рис. 5в и 5г), значения параметра EDI (ошибки прогноза) для Европы составили 0.88 (0.04) и 0.54 (0.03), соответственно, на недельном и месячном интервале интегрирования. Даты окончания «блокирующего» периода на территории Европы, полученные по данным реанализа и гидродинамического моделирования от 7 июля расходятся (рис. 5д и рис. 5е).

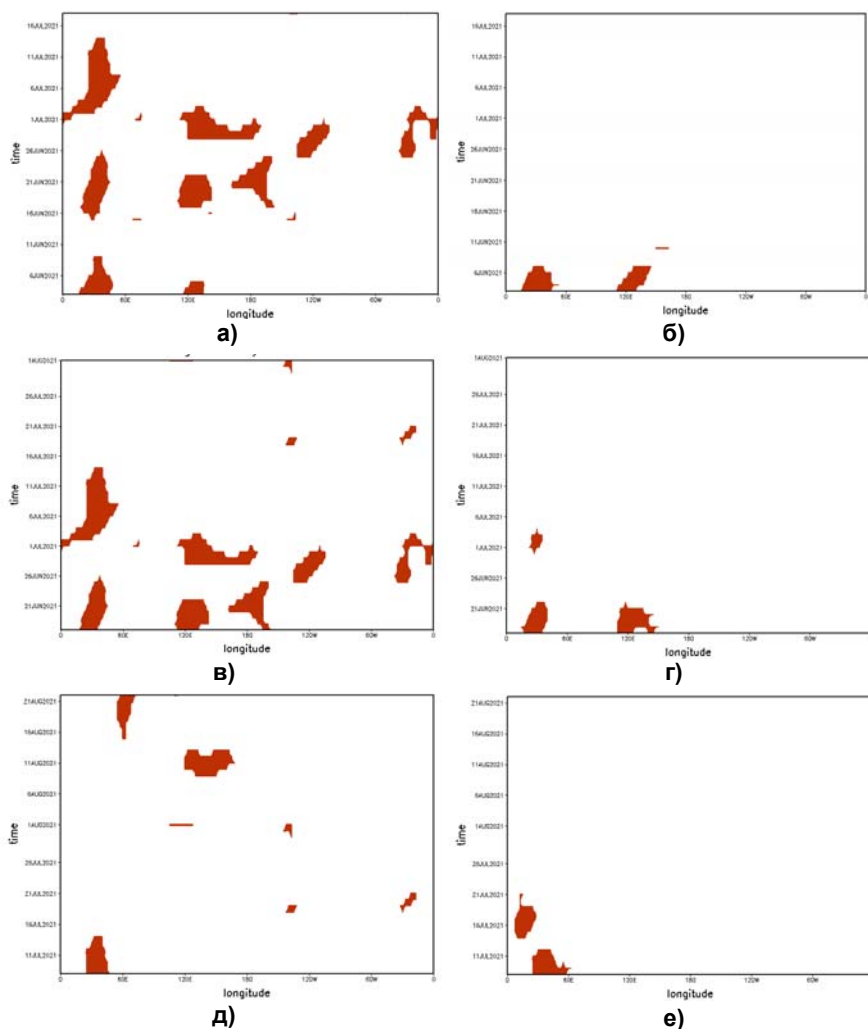


Рис. 5. Диаграммы Ховмюллера. Наличие блокинга (выделено красным цветом) по критерию ТМ по данным реанализа (а, в, д) и гидродинамического моделирования (б, г, е). Лето 2021 г.

Fig. 5. Hovmöller diagrams. The presence of blocking (highlighted in red) according to the TM criterion according to reanalysis data (a, в, д) and hydrodynamic modeling (б, г, е). Summer 2021.

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения аномалий полей приземной температуры воздуха (рис. 6а), волн тепла (рис. 6б), полученных по данным реанализа, а также прогностических значений индекса экстремальности EFI (рис. 6в) для 46-дневного периода для начальной даты прогноза 17 июня 2021 г. На фоне квазиустойчивых режимов атмосферной циркуляции, установившихся на большей части территории Северного полушария с середины июня, прогнозы индекса

экстремальности EFI оказались довольно успешными. На территории Европы оценки прогнозов PSS (критерий Пирса) для начальных дат прогноза 17 и 24 июня и порогового значения индекса $EFI=0.5$ составили, соответственно, 0.63 и 0.54. Для остальных дат прогноза на фоне смены режимов атмосферной циркуляции оценки качества прогнозов индекса EFI оказались ниже уровня случайного.

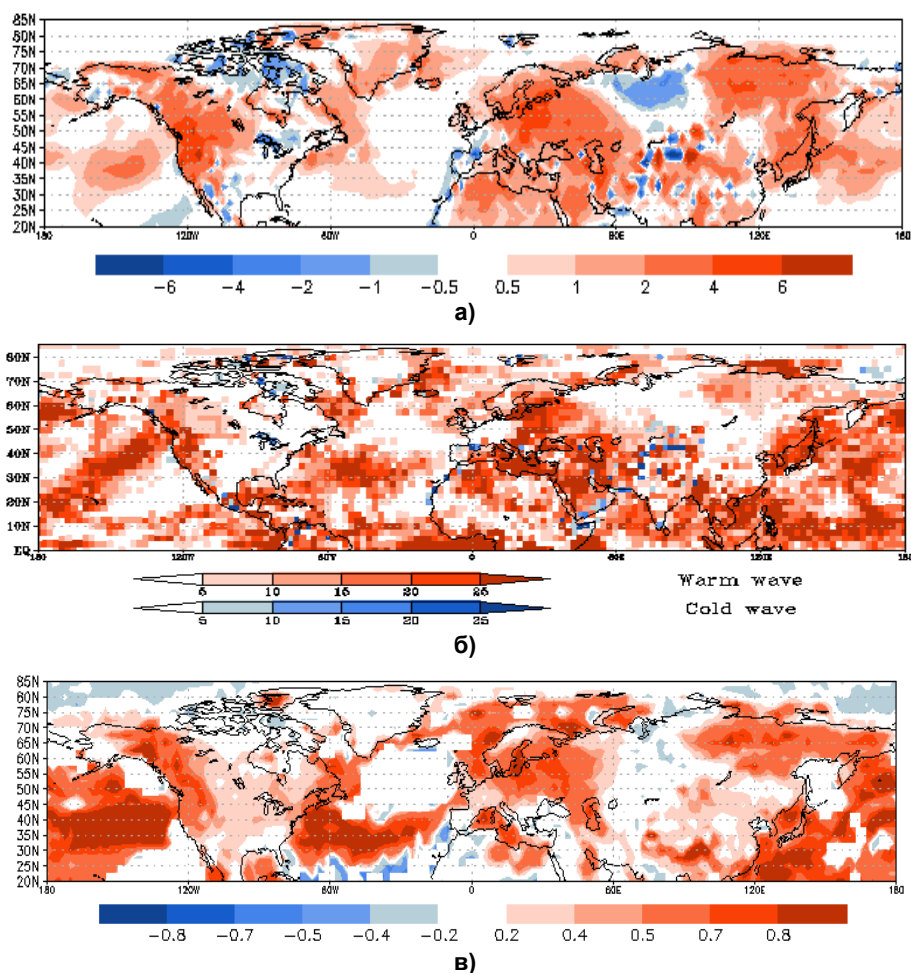


Рис. 6. Пространственное распределение аномалий приземной температуры воздуха (а) и волн тепла (б), полученных по данным реанализа и прогностических значений индекса EFI для 46 периода. Начальная дата прогноза – 17 июня 2021 г.

Fig. 6. Spatial distribution of surface air temperature anomalies (а) and heat waves (б) obtained from reanalysis data and predicted values of the EFI index for 46 period. Initial forecast date – June 17, 2021.

Заключение

С использованием данных реанализа ЕЦСПП (ERA5) рассмотрены основные особенности температурного режима и атмосферной циркуляции в Северном полушарии летом 2021 г. На фоне квазиустойчивых режимов атмосферной циркуляции типа блокирования отмечено значительное преобладание волн тепла по сравнению с волнами холода.

Качество прогнозов волн тепла на базе полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ можно признать удовлетворительным. При этом наилучшие результаты получены для региона Европы и тропиков. Во всех регионах, хотя и в разной степени, прогностическая продолжительность волн тепла оказалась немного завышенной. Прогнозы индекса EFI в большинстве случаев – ниже уровня случайного.

Показана зависимость качества прогнозов блокирующего антициклона от фазы его развития (начало блокирования, зрелая фаза, разрушение блокинга). Наиболее сложной для гидродинамического моделирования оказалась начальная фаза блокирования. В период зрелой фазы (наличие блокирования в начальных данных модели) полезный сигнал был отмечен не только на недельном, но и на месячном интервале интегрирования.

Полученные результаты могут использоваться при прогнозировании ЭМЯ на внутрисезонных интервалах времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

Список литературы

1. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Об оценке индекса экстремальности EFI // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 5-22.
2. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. Обнинск: ФАО ФООП, 2010. 111 с.
3. Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Толстых М.А., Травова С.В., Мизяк В.Г., Рогутев В.С., Алипова К.А. Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. №1 (379). С. 58-72.
4. Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е.Н. Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года (сб. докладов). М.: Триада ЛТД, 2011. С. 6-21.
5. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. 1987. Vol. 115. P. 1083-1126.
6. Ferro C.A.T., Stephenson D.B. Extremal dependence indices: improved verification measures for extreme events and warnings // Wea. Forecast. 2012. Vol. 26. P. 699-713.
7. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. Second Ed., Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.

8. Lejenas H., Okland H. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data // *Tellus*. 1983. Vol. 35A. P. 350-362.

9. Peterson T.C. Climate Change Indices // *WMO Bulletin*. 2005. Vol. 54 (2). P. 83-86.

10. Roebber P.J. Visualizing multiple measures of forecast quality // *Wea. Forecast.* 2009. Vol. 24. P. 601-608.

11. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus*. 1990. Vol. 42A. P. 343-365.

12. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. London: Academic Press, 2011. 676 p.

References

1. Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A. On the Evaluation of the Extremality Index EFI. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 1-12. DOI: 10.3103/S106837392001001X.

2. Tolstykh M.A. Global'naya polulagranzheva model' chislennogo prognoza pogody. Obninsk, FAO FOP, 2010, 111 p. [in Russ.].

3. Fadeev R. Yu., Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Travova S.V., Mityak V.G., Rogurov V.S., Alipova K.A. Development of the long-range forecast system at Hydrometcentre of Russia in 2020. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 379, no. 1, pp. 58-72 [in Russ.].

4. Shakina N.P., Ivanova A.R., Birman B.A., Skriptunova E.N. Blokirovaniye: usloviya leta 2010 g. v kontekste sovremennykh znaniy. Analiz usloviy anomal'noy pogody na territorii Rossii letom 2010 goda (sb. dokladov). Moscow, Triada LTD, 2011, pp. 6-21 [in Russ.].

5. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 1083-1126.

6. Ferro C.A.T., Stephenson D.B. Extremal dependence indices: improved verification measures for extreme events and warnings. *Wea. Forecast.*, 2012, vol. 26, pp. 699-713.

7. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. Second Ed., Eds. I. Jolliffe and D. Stephenson. *John Wiley & Sons Ltd*, 2012, 274 p.

8. Lejenas H., Okland H. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. *Tellus*, 1983, vol. 35A, pp. 350-362.

9. Peterson T.C. Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, 2005, vol. 54, no. 2, pp. 83-86.

10. Roebber P.J. Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea. Forecast.*, 2009, vol. 24, pp. 601-608.

11. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking. *Tellus*, 1990, vol. 42A, pp. 343-365.

12. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. London: Academic Press, 2011, 676 p.

Поступила 27.01.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 27.01.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-22-42>

УДК 551.501.81+551.506.2+551.509.3

Конвективный шторм в Московском регионе 28 июня 2021 года

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

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

Представлены результаты анализа условий возникновения активного атмосферного процесса с опасными конвективными явлениями на основе аэрологической, спутниковой, радиолокационной, синоптической информации и данных метеостанций. Показано, что оперативная диагностическая информация о параметрах конвекции и явлениях позволяет уточнить автоматизированные прогнозы неблагоприятных и опасных конвективных явлений погоды за счет уточнения времени, места их возникновения, вида и интенсивности явлений. Использование прогностической информации в комплексе с диагностической позволит более точно формировать штормовые предупреждения и заблаговременно принимать превентивные меры защиты.

Ключевые слова: конвективный шторм, неблагоприятные и опасные конвективные явления, диагноз, прогноз, информация ДМРЛ-С

The convective storm in the Moscow Region on June 28, 2021

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

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

The results of analyzing conditions for the occurrence of an active atmospheric process with severe convective phenomena based on aerological, satellite, radar, synoptic information are presented. It is shown that the operational diagnostic information on convection parameters and phenomena makes it possible to refine automated forecasts of adverse and severe convective weather events by clarifying the time, place of their occurrence, type and intensity of the phenomena. The use of forecast data in combination with diagnostic information will provide more accurate preparation of storm warnings and early preventive protection measures.

Keywords: convective storm, adverse and severe convective phenomena, diagnosis, forecast, DMRL-C data

Введение

Предсказание времени и места осуществления конвективного шторма, сопровождающегося сильным ливнем, градом, шквалом

либо комплексом этих явлений, является сложной задачей, даже в век компьютерных технологий. И хотя из классических знаний синоптика известно, что при прогнозе опасных конвективных явлений в детальном прогнозировании нуждаются такие параметры атмосферы, как влажность, неустойчивость и сдвиг ветра, дополнительно надо учесть множество других факторов, влияющих в разной степени на их возникновение. В настоящее время существуют прогностические модели мезомасштабного разрешения, но и они не решили задачу точного прогноза таких явлений. По мере приближения к сроку прогноза все внимание концентрируется на оперативной информации: спутниковых снимках, данных радиозондов, радаров, грозопеленгаторов, самолетов, автоматических метеостанций, а также наблюдательной сети. Необходимо определить место совокупности факторов, благоприятных для возникновения конвективных явлений, на основе анализа расположения и активности атмосферных фронтов, их передвижения, сухих линий, областей дивергенции и конвергенции. Как можно точнее определить температурно-влажностные характеристики как у поверхности Земли, так и на высотах, структуру распределения ветра в атмосфере. Таким образом, и на сегодняшний день наиболее ценным инструментом прогноза активных конвективных штормов остается мозг человека, оперативного синоптика, который должен проанализировать огромное количество различной информации, провести ее правильную интерпретацию к сроку прогноза.

Рассмотрение конкретных случаев и анализ причин возникновения сильных конвективных штормов дает возможность нахождения путей совершенствования методов прогноза таких явлений погоды, сопровождающихся значительным ущербом, а нередко и гибелью людей. Поэтому представляемые исследования являются актуальными и практически значимыми.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы фактические данные об осадках и осуществившихся конвективных явлениях 28 июня 2021 г. в Московском регионе, кольцевые синоптические карты, прогнозы опасных конвективных явлений погоды автоматизированными методами прогноза, рекомендованными к внедрению в практику решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 2006 и 2011 гг. [10], два из которых прогнозируют сильные осадки: максимальное количество осадков в зонах конвекции [1] и альтернативно осадки с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34, от 35 до 49 и 50 мм/12ч и более) [4, 6, 7] на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России с заблаговременностью 12 и 24 ч, а также прогнозы по двум методам прогноза шквалов: в трех градациях интенсивности [5, 6, 7] и скорости ветра при шквалах [2, 6, 7]. Кроме того, использованы данные сети ДМРЛ-С

на ЕТР и ДМРЛ-С Внуково, а также данные аэрологического зондирования атмосферы и результаты спутникового диагноза явлений.

При исследовании использованы эмпирические методы: изучение разнообразных источников информации, их анализ, синтез, чтобы получить общее представление об конвективном шторме, аналогия, моделирование.

Результаты исследований

В конце июня 2021 года большая часть России, включая ЕТР, оказалась в зоне экстремальной жары. Температура несколько суток превышала климатическую норму на 7 °C и более. Так, в Москве с 20 по 27 июня температура днем была выше 30 °C, и даже ночью выше 25 °C. 23 июня был побит температурный рекорд июня, продержавшийся 120 лет (21.06.1901 г. рекорд 34.7 °C), – достиг 34.8 °C. Жара охватывала обширную территорию, включая запад ЕТР, Ленинградскую, Калининградскую, Псковскую и Новгородскую области. В Центральном, Приволжском федеральных округах температура поднималась до 40 °C, а на юге в Волгоградской, Астраханской областях и Республике Калмыкия до 41 °C. Причиной установившейся жары был блокирующий антициклон. Его можно отнести к экстремальным событиям, так как занимал обширную территорию, выражен был не только у поверхности Земли, но и в средней тропосфере на высоте 3–5 км, и даже 9 км. Все воздушные массы доходили до него, затем изменяли свою траекторию, т. е. был блокирован преобладающий западно-восточный перенос. К особенностям данного блокирующего антициклона можно отнести и то, что такая погода установилась в период летнего солнцестояния. Благодаря нисходящим движениям солнечная энергия при безоблачном небе беспрепятственно проникала до поверхности Земли. За счет конвекции, турбулентности этот жар передавался в приземный слой воздуха. Антициклон довольно продолжительное время стационарировал над Русской равниной.

Ближе к рассматриваемой дате конвективного шторма наметилось смещение антициклона на восток. В период с 26 по 28 июня метеорологические условия в Центральном, Северо-Западном и Приволжском федеральных округах определялись сменой влияния блокирующего антициклона на влияние системы атмосферных фронтов циклонов с запада и юга. Отмечались грозы, сопровождающиеся ливнями, шквалистым ветром, в отдельных районах выпадал град. Сильные дожди с количеством осадков до 40 мм 26 июня выпали в Ленинградской и Псковской областях, республиках Карелия и Коми; в Смоленской, Брянской, Калужской и Тульской областях – 16–31 мм; в Республике Татарстан и Пермском крае – 17–39 мм. Ветер при шквалах усиливался в Псковской области, республиках Татарстан и Удмуртия – до 21 м/с; в Оренбургской области – до 24 м/с. Очень сильный дождь наблюдался в Республике Адыгея, в Майкопе выпало до 58 мм осадков. В Краснодарском крае по данным

гидропост Хадыженск выпало до 61 мм осадков. По данным метеостанции Псебай крупный град диаметром до 55 мм выпадал в Краснодарском крае. В период 27 июня – ночью 28 июня сильный дождь с грозой наблюдался в Республике Карелия (до 24 мм), Псковской области (до 54 мм за 24 ч), Архангельской области (до 17 мм), Москве и Московской области (30–33 мм), Смоленской, Ярославской, Костромской областях (21–38 мм), Тверской области (до 29 мм); ветер усиливался до 26 м/с, в Ставропольском крае и Республике Карачаево-Черкесии (20–25 мм). Очень сильный дождь отмечался в Новгородской (до 55 мм), Брянской (до 79 мм), Калужской (до 58 мм) областях, в Республике Адыгея (гидропост Курджипская до 64 мм) [<https://www.meteorf.ru/press/news/25135/>].

Таким образом, главной особенностью рассматриваемого конвективного шторма было то, что предшествовала ему аномальная жара на обширной территории за счет блокирующего антициклона в период летнего солнцестояния. Поэтому от смены данной синоптической ситуации на циклоническую с прохождением атмосферных фронтов следовало по всем известным классическим знаниям синоптиков ожидать активизации фронтальных разделов и возникновения опасных конвективных явлений.

Перейдем непосредственно к рассмотрению конвективного шторма в Московском регионе. МЧС России предупредило москвичей об ожидающихся 28 июня в столице грозах, ливне, граде и ветре, местами с порывами до 23 м/с.

Фактически фронтальная волна, из которой развился молодой активный циклон, проходила территорию столицы и области в середине дня 28 июня (рис. 1а).

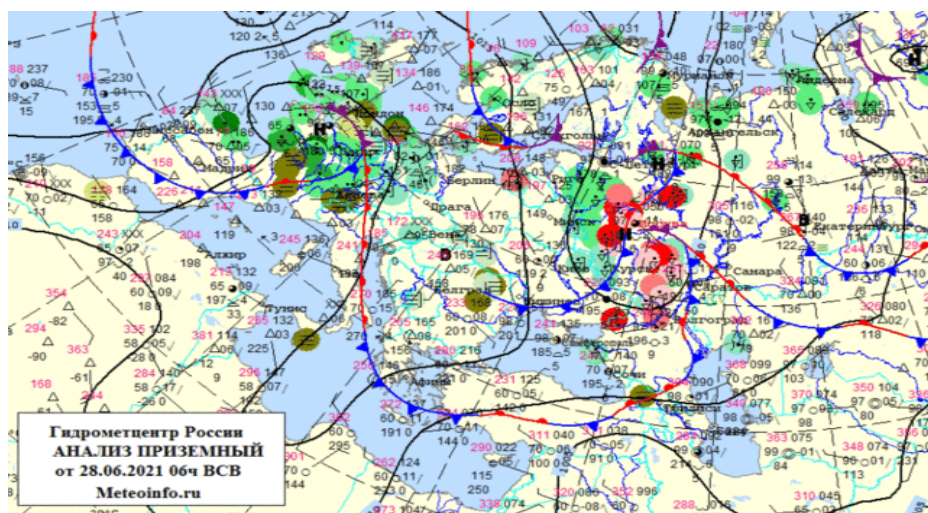


Рис. 1а.

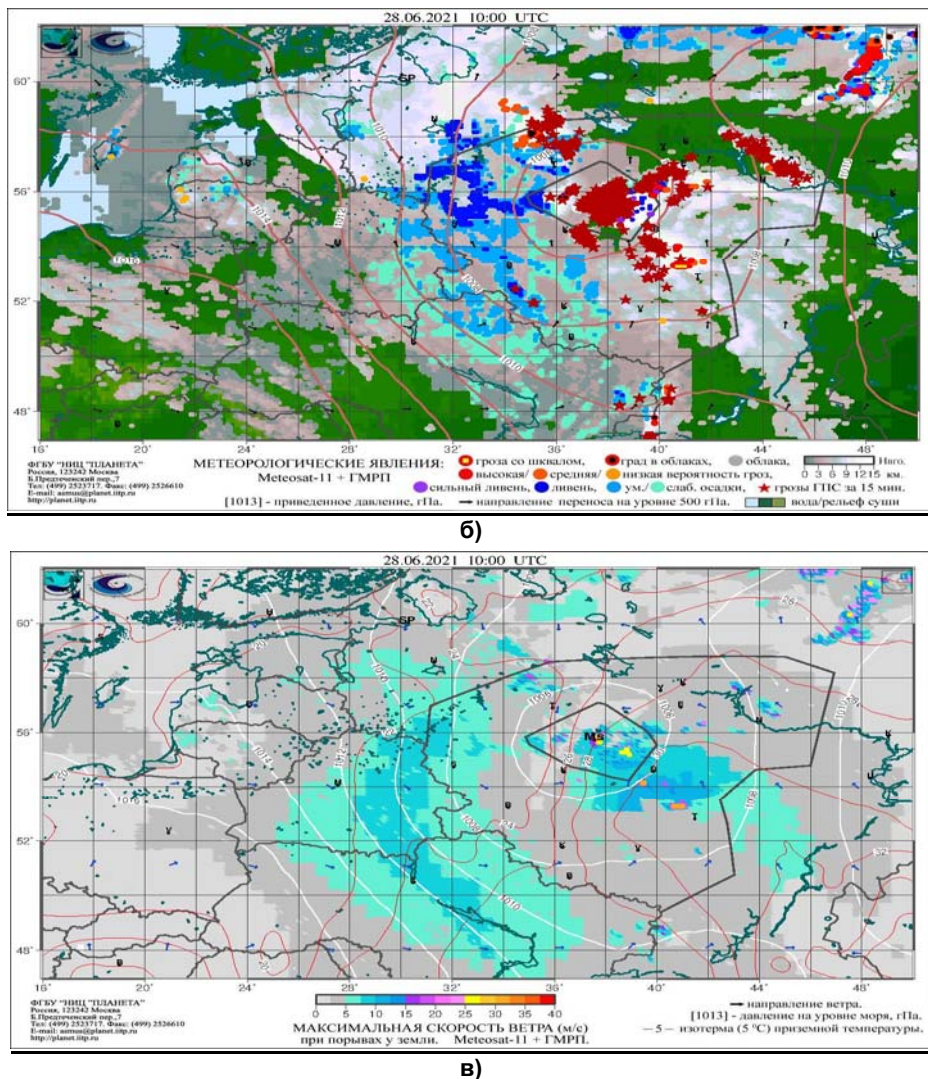


Рис. 1. Карты приземного анализа за срок 06 ч ВСВ (а); спутникового диагноза: метеорологических явлений (б); максимальной скорости ветра при порывах у земли за срок 10.00 ч ВСВ (в) 28.06.2021 г.

Fig. 1. The surface weather maps for 06.00 UTC (a); the maps of satellite diagnosis of weather phenomena for 10.00 UTC (б); maximum surface wind gusts for 10.00 UTC (в) on June 28, 2021.

На холодном атмосферном фронте отмечались большие контрасты температуры. 28 июня днем и 29 июня ночью в Центральном федеральном округе прошли дожди с грозами, в Тверской, Ярославской, Смоленской, Московской, Тульской, Рязанской, Курской областях местами сильные (17–48 мм за 12 ч). Очень сильный дождь отмечался днем в Старице

Тверской области (50 мм за 12 ч), в Московской области (68 мм за 12 ч) и Москве (32–48 мм за 12 ч). Ветер усиливался до 13–20 м/с, днем в Шереметьево Московской области зафиксированные порывы ветра достигали 26 м/с. Преобладающая температура воздуха была днем 26–31 °С, на северо-востоке до 35 °С, на западе 19–25 °С, ночью 14–21 °С (табл. 1).

Таблица 1. Температура воздуха днем 28 июня 2021 г. и осадки в Москве и Московской области днем 28 и ночью 29 июня 2021 г. по данным метеорологических станций

Table 1. Air temperature in the daytime on June 28, 2021 and precipitation in Moscow and the Moscow region in the daytime on June 28 and at night on June 29, 2021 according to weather stations

Станция	Максимальная температура (°С) 28 июня	Осадки (мм) днем 28 июня	Осадки (мм) ночью 29 июня
Москва (ВДНХ)	29,8	20 (июньская норма осадков 80 мм, 1991–2020 гг.)	0,3
Балчуг	30,8	19	-
Тушино	29,1	37	0,4
Немчиновка	29,9	22	0,8
Внуково	28,4	42	2
Шереметьево	23,4	23	0,3
Домодедово	30,9	17	6
Егорьевск	29,8	18	0,3
Клин	23,9	18	-
Дмитров	26,7	16	-
Волоколамск	24,3	33	0,8
Можайск	24,8	6	0
Н-Иерусалим	24,8	7	-
Подмосковная	28,6	11	0,3
Павловский Посад	30,6	2	-
Черусти	31,0	-	19
Наро-Фоминск	25,2	25	0,4
Михайловское	29,0	48	2
Серпухов	29,8	3	0,3
Коломна	31,3	9	-
Кашира	30,2	4	0,3

В столичном регионе в результате обрушившегося конвективного шторма оказались затопленными дороги, станции метро, повреждены автомобили, частично разрушены здания, упал на дорогу башенный кран. Пользователи социальных сетей окрестили погодное явление «суперливнем». Но следует заметить, что прошедший в столице и Подмосковье

ливень, несмотря на вызванные им подтопления, не является рекордным или беспрецедентным по каким-либо показателям, включая его предсказание. Так, синоптики уверенно ожидали в прогнозах конвективный шторм. Известно, что после продолжительной аномальной жары при смене воздушных масс всегда следует ожидать конвективный шторм. Трудно только определить точное время, место его осуществления, тип и интенсивность возникающих явлений.

Проанализируем условия возникновения рассматриваемого конвективного шторма.

На рис. 2 представлены прогнозы сильных ливней в трех градациях интенсивности, на рис. 3 – прогнозы шквалов двумя подходами: альтернативного прогноза шквалов в трех градациях интенсивности (значки) и прогноза скорости ветра при шквалах (цветовая шкала), с заблаговременностью 18 ч (автоматизированные методы рекомендованы к внедрению ЦМКП Росгидромета).

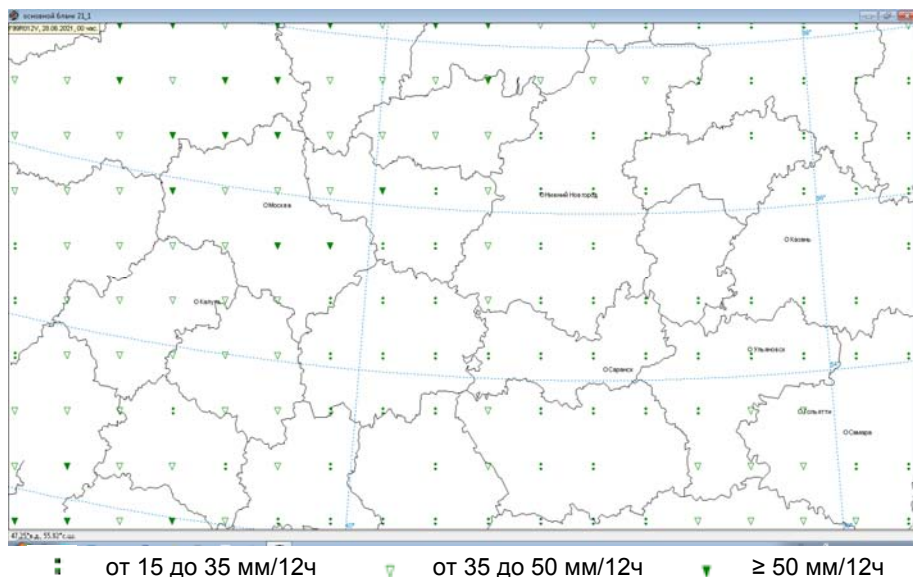


Рис. 2. Фрагмент карты автоматизированных прогнозов сильных ливней в трех градациях на дневной период 28 июня 2021 г. с заблаговременностью 18 ч от срока прогноза 00 ч ВСВ.

Fig. 2. The fragments of the maps of automated forecasts of heavy rains (a) for the daytime on June 28, 2021 with a lead time of 18 hours for the 00:00 UTC forecast run.

Как видно, повсеместно в центральных областях ЕТР прогнозировались сильные ливни в градациях от 15 до 35 мм/12ч и от 35 до 50 мм/12ч, и очень сильные (закрашенные значки) количеством ≥ 50 мм/12ч, в основном в Московской и Тверской областях. Прогнозировалась большая

зона шквалов скоростью от 20 до 25 м/с двумя методами: методом прогноза шквалов в трех градациях интенсивности в северо-восточном направлении рядом с Москвой прогнозировался шквал скоростью ≥ 25 м/с (закрашенный значок), методом прогноза скорости ветра при шквале (цветовая шкала) зона со скоростью 25–30 м/с намного больше по площади, чем прогнозируемая зона шквалов альтернативным методом.

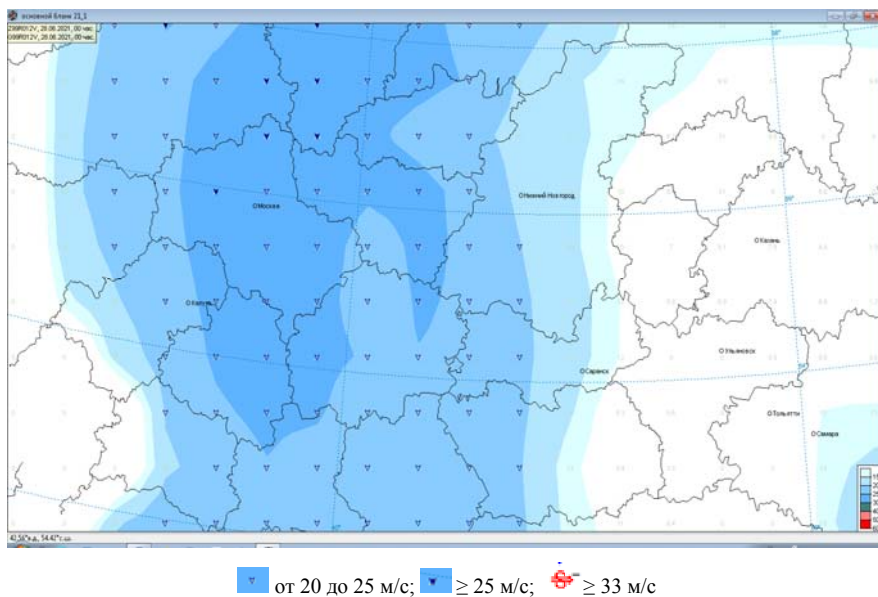


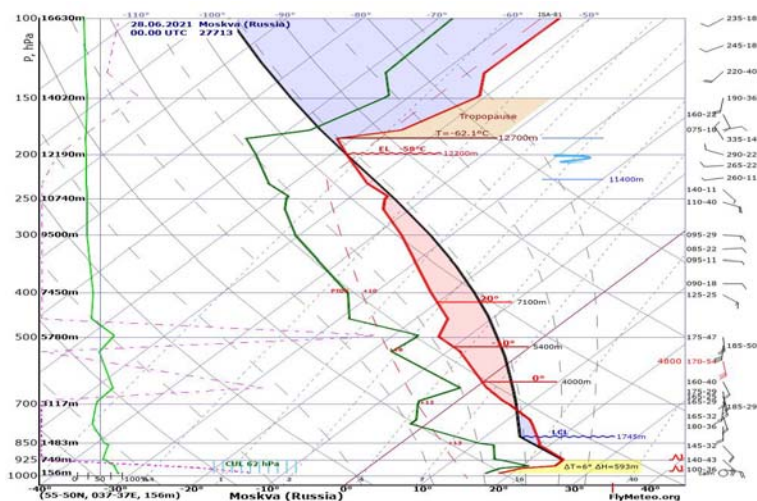
Рис. 3. Фрагмент карты автоматизированных прогнозов шквалов: альтернативный прогноз шквалов в трех градациях интенсивности (значки) и скорости ветра при шквалах (цветовая шкала) на дневной период 28 июня 2021 г. с заблаговременностью 18 ч от срока прогноза 00 ч ВСВ.
Fig. 3. The fragments of the maps of automated forecasts of squalls for the daytime on June 28, 2021 with a lead time of 18 hours for the 00:00 UTC forecast run.

Таким образом, МЧС, как и оперативные синоптики, ожидали конвективный шторм, автоматизированные методы прогноза также его прогнозировали. Значит, правильно сделан выше приведенный вывод, что данный шторм не является особенным и трудным в прогнозировании.

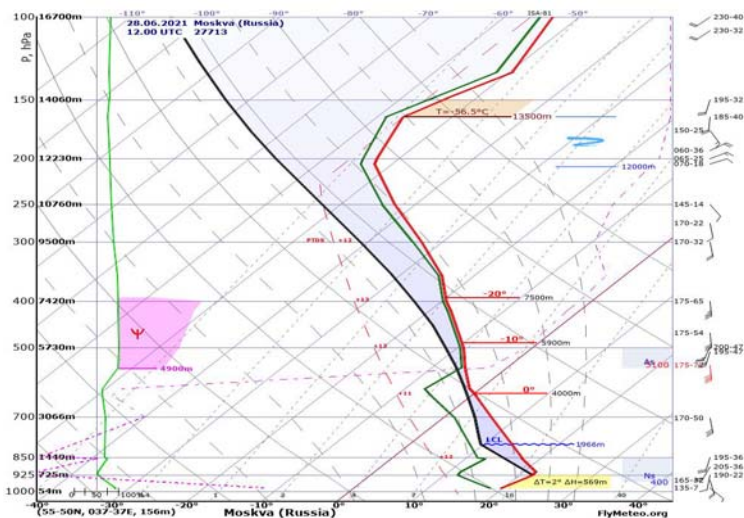
Прогноз выпускается на текущий день. Важно определиться, когда точно, где и какими явлениями шторм будет сопровождаться. Выше указывалось, именно оперативная информация: спутниковая, данные радиозондов, радаров, грозопеленгаторов, самолетов, автоматических метеостанций, а также наблюдательной сети помогают уточнить время и место возникновения конвективного шторма. Рассмотрим такую информацию.

Карты спутникового диагноза метеорологических явлений и максимальной скорости ветра при порывах у земли (см. рис. 1б, в) за срок

10.00 ч ВСВ, выпускаемые в ФГБУ «НИЦ «Планета», показывают, что диагностировались высокая вероятность гроз, облака с градом и максимальная скорость ветра при порывах у земли от 20 до 30 м/с. На рис. 4 представлены результаты аэрологического зондирования атмосферы (Москва, индекс станции 27713) за сроки 00 и 12 ч ВСВ.



а) 00 ч ВСВ



б) 12 ч ВСВ

Рис. 4. Температурно-ветровое зондирование атмосферы в Москве (индекс станции 27713) в сроки 00 и 12 ч ВСВ [https://flymeteo.org/sounding/diag_p.php].
Fig. 4. Temperature and wind sounding of the atmosphere in Moscow (station ID 27713) at 00:00 and 12:00 UTC [https://flymeteo.org/sounding/diag_p.php].

В 00 ч ВСВ у земли наблюдался инверсионный слой вертикальной мощностью 593 м и интенсивностью 6°. Уровень конденсации находился на высоте 1745 м. До уровня 900 гПа наблюдалась высокая влажность при температуре 19 °С. Приблизительно с 700 до 200 гПа – слой неустойчивости (уровень конвекции 12200 м), максимальное отклонение кривой состояния от кривой стратификации в 9 °С на уровне 500 гПа. Высота тропопаузы 12700 м (температура -62,1 °С). Ветер восточного направления (100 град) у земли скоростью 10 м/с, у поверхности 500 гПа, повернул на южный (185 град), на высоте 4800 м с максимальной скоростью 15 м/с. На уровне 400 гПа опять становится восточным (90 град) скоростью 5 м/с. Выше на высоте 11400 м ветер развернулся на западный (260–290 град) скоростью 2.5–5 м/с. В 12 ч ВСВ у земли в слое инверсии приблизительно той же мощности (569 м) значительно уменьшилась интенсивность (до 2°). Уровень конденсации стал чуть выше – 1966 м. Высота тропопаузы 13500 м, температура -56.5 °С. В 12 ч ВСВ ветер юго-восточного направления (135 град) скоростью 2.5 м/с сохраняет направление до высоты 12000 м, наибольшая скорость ветра 20 м/с на высоте 5100 м. Неустойчивость отсутствует. С высоты 5100 м наблюдаются облака As. Высота уровня 0 °С в сроки 00 и 12 ч ВСВ составляет 4000 м, уровня -10 °С – 5400 и 5900 м, уровня -20 °С – 7100 и 7500 м соответственно.

В табл. 2 представлены индексы неустойчивости за сроки 00 и 12 ч ВСВ для станции Москва с индексом 27713, позаимствованные с сайта [https://flymeteo.org/sounding/diag_p.php]. Как видно, в 00 ч ВСВ практически все индексы неустойчивости (критерий Вайтинга, метод Фауста, Vertical totals index, Cross totals index, SWEAT index, метод Г.Д. Решетова) указывают на грозы, причем четыре из них – на сильные грозы, метод Г.Д. Решетова прогнозировал грозу, град, шквал с порывами до 17 м/с. Один из индексов прогнозировал даже сильные смерчи. Только метод Н.В. Лебедевой давал прогноз без гроз. В 12 ч ВСВ значения индексов неустойчивости, кроме критерия Вайтинга, уменьшились. Согласно пяти из шести индексов прогнозировались грозы.

По данным станций наблюдений (см. табл. 1), температура днем составляла от 23.4 до 31.3 °С. Осадки в Московском регионе днем 28 июня наблюдались на метеостанциях количеством от 3 до 48 мм, в Черустах их не было. Ночью 29 июня осадки в Московском регионе небольшие, кроме Черустей (19 мм).

Известно, что важными диагностированными данными являются радиолокационные данные. В настоящее время сетью ДМРЛ-С покрыта практически вся ЕТР. Карта метеоявлений рассчитывается согласно ПО ВОИ «ГИМЕТ 2010» [9]. В ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках темы НИТР Росгидромета 2020–2024 гг. ведутся исследования по совершенствованию диагноза параметров конвекции и конвективных явлений, включая градации неблагоприятных (НЯ) и опасных явлений (ОЯ). Основы подхода к их диагнозу изложены в [3, 8]. Алгоритмы диагноза

реализованы в рамках автоматизированной технологии диагноза параметров конвекции и конвективных явлений ФГБУ «Гидрометцентр России», функционирующей в настоящее время в летний период года в оперативном режиме с записью рассчитанной продукции в циклическую базу данных, в 2021 г. с именем DW21, с задержкой порядка 25 минут от срока наблюдений ДМРЛ-С. Выходной продукцией диагноза предлагаемым подходом на основе данных сети ДМРЛ-С с временным разрешением 10 минут в сетке $0.05 \times 0.05^\circ$ являются: максимальные конвективные скорости, интенсивность ливневых осадков, ежечасное количество осадков, полусуточное количество осадков, град и шквалы в трех градациях интенсивности, аналогичных градациям согласно ПО ВОИ «ГИМЕТ 2010», и шквалы в градации ОЯ.

Таблица 2. Индексы неустойчивости 28.06.2021 г. в Москве, индекс станции 27713 [https://flymeteo.org/sounding/diag_p.php]

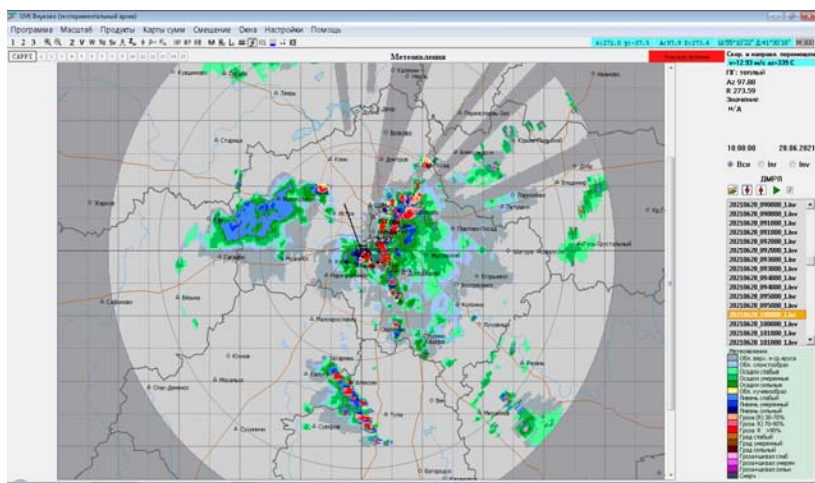
Table 2. The instability indices in Moscow on June 28, 2021 [https://flymeteo.org/sounding/diag_p.php]

Индекс неустойчивости	00.00 ч ВСВ	12.00 ч ВСВ
Критерий Вайтинга (K index)	30,3 Рассеянные грозы (20-50 % S)	32.9 Рассеянные грозы (20-50 % S)
Метод Фауста	5.2 Гроза	2.7 (±3) Гроза (кривизна изобар не учтена)
Vertical totals index	31.9 Гроза	26,5 Без гроз
Cross totals index	23.9 Высокая неустойчивость. Возможны сильные грозы	20.5 Высокая неустойчивость. Грозы
Totals totals index	55.8 Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами	47 Рассеянные грозовые очаги
SWEAT index	321 Сильные грозы, град и шквал	201 Гроза
Метод Решетова	Гроза (L=2.4), град, шквал, порывы до 17 м/с	
Метод Лебедевой	Без гроз	

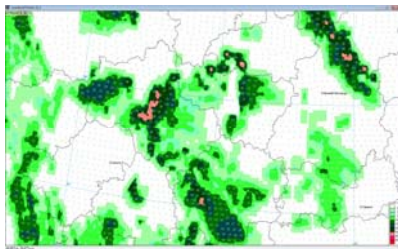
На рис. 5 представлены данные о метеоявлениях ДМРЛ-С Внуково (а), а также диагностированные выше указанным подходом максимальные конвективные скорости (б), интенсивность осадков (в), шквалов (г) и града (е) в трех градациях интенсивности по данным сети ДМРЛ-С, шквалов градации ОЯ (д) по данным ДМРЛ-С и численного прогнозирования.



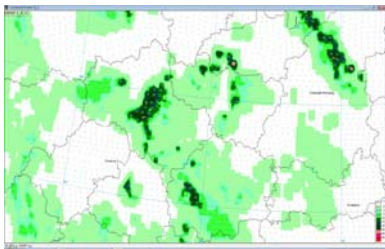
9.30 ч BCB



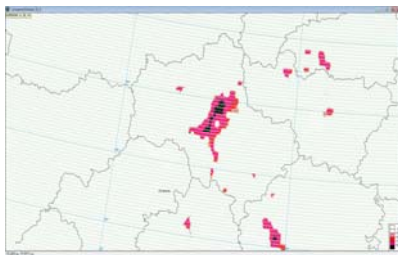
а)



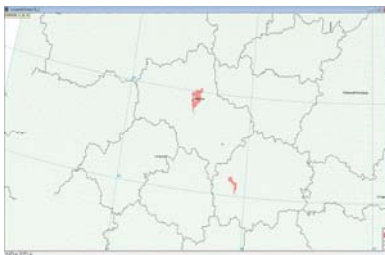
б)



в)



г)

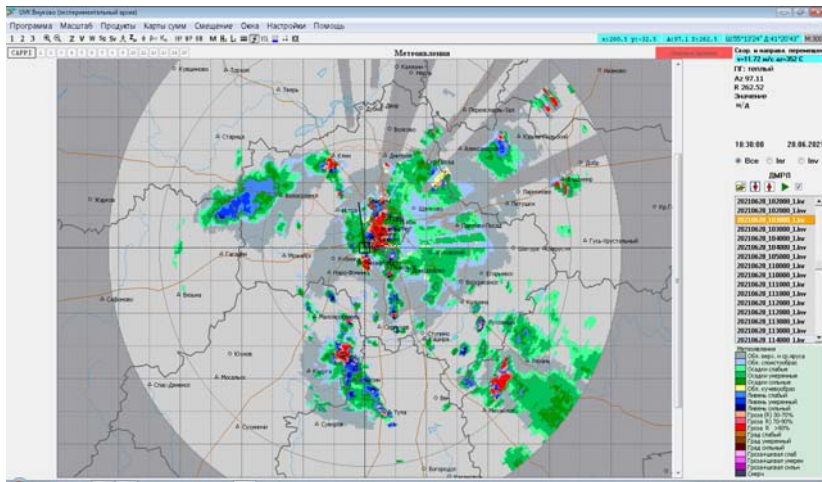


д)

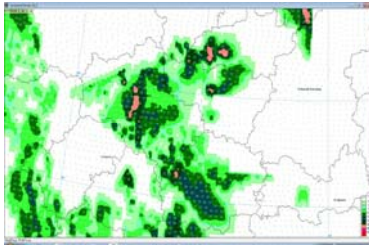


е)

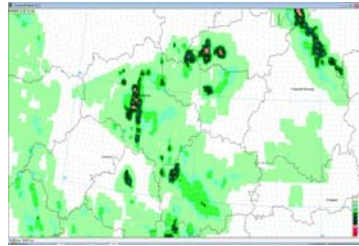
10.00 ч ВСВ



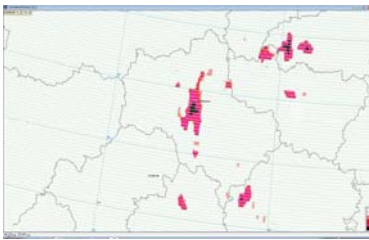
а)



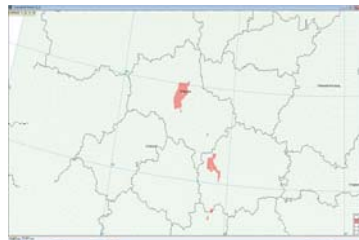
б)



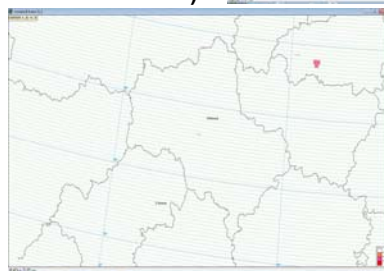
в)



г)



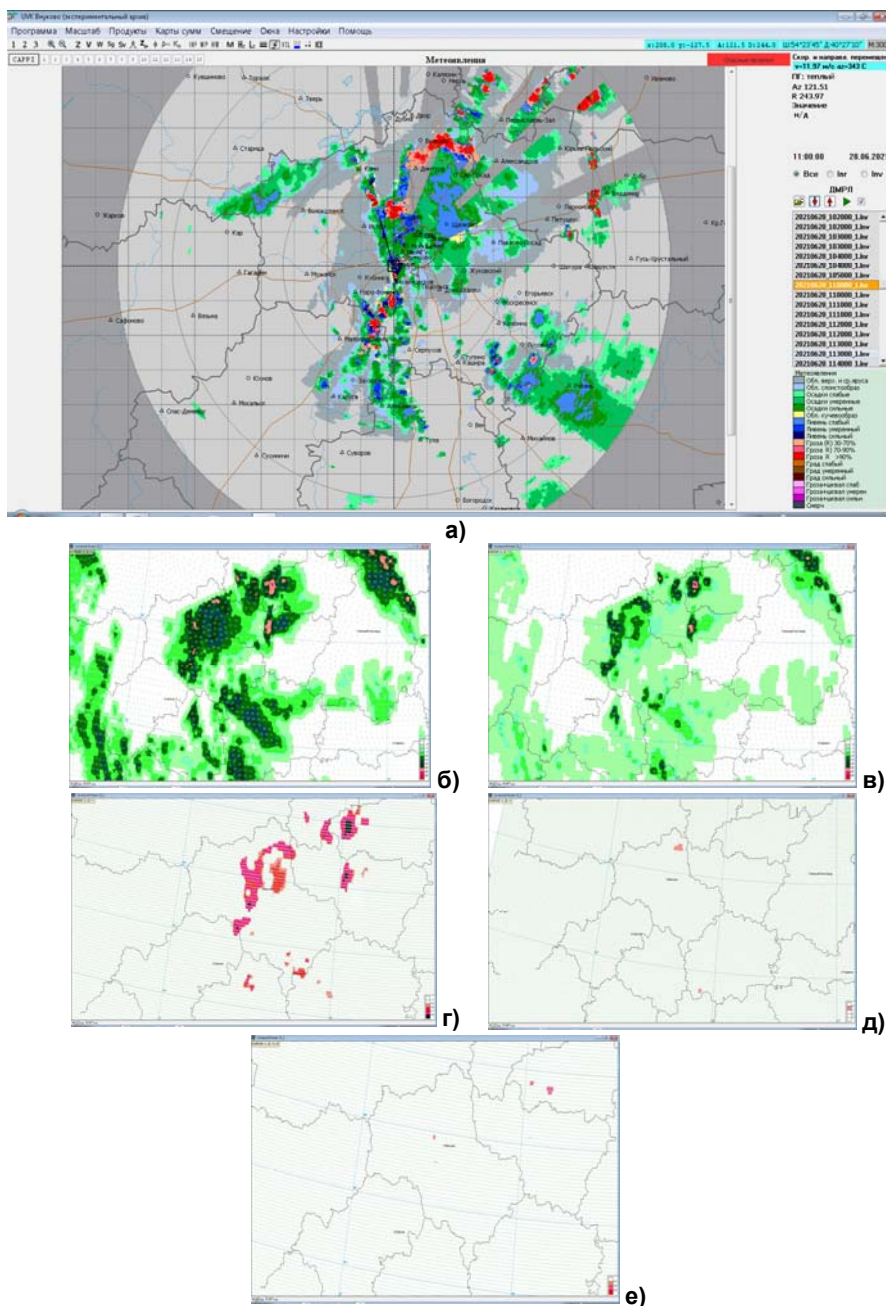
д)



е)

10.30 ч ВСВ

Рис. 5. Данные ДМРЛ-С Внуково (а) и фрагменты карт диагностированных максимальных конвективных скоростей (б), интенсивности осадков (в), шквалов (г) и града (е) в трех градациях интенсивности по данным ДМРЛ-С и шквалов градации ОЯ (д) по данным ДМРЛ-С и численного прогнозирования за сроки 9.30, 10.00, 10.30 и 11.00 ч ВСВ 28.06. 2021 г. предлагаемым подходом.



11.00 ч ВСВ

Fig. 5. DMRL-C Vnukovo data (a) and the fragments of the maps of diagnosed maximum convective velocities (б), precipitation intensity (в), squalls (г) and hail (е) for three intensity gradations according to DMRL-C data and severe squalls (д) according to DMRL-C and numerical weather prediction data for 9:30 and 11:00 UTC on June 28, 2021 constructed using the proposed approach.

В табл. 3 представлены радиолокационные данные ДМРЛ-С Внуково о диагностированных конвективных явлениях погоды (град, шквал) в зоне до 100 км вокруг лоатора из журнала опасных явлений лоатора. Анализ данных указанной таблицы и фрагментов карт диагноза конвективных явлений погоды (рис. 5б–е) показал, что согласно ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» ДМРЛ-С Внуково чаще диагностировал из наиболее опасных явлений град (дается наибольшая цифра кода согласно опасности явления, поэтому там, где диагностирован град или шквал, подразумевается, что диагностированы и осадки), тогда как предлагаемым подходом диагностировался чаще шквал. Большее совпадение по шквалам разными подходами наблюдалось для шквалов в градации сильных.

Таблица 3. Радиолокационные данные ДМРЛ-С Внуково о диагностированных конвективных явлениях погоды (град, шквал) в зоне до 100 км вокруг лоатора из журнала опасных явлений в двух режимах работы лоатора

Table 3. DMRL-C Vnuково radar data on the diagnosed convective weather phenomena (hail, squall) in the zone up to 100 km around the radar from the log of severe weather events in two radar operating modes

Явление	Азимут (град)	Расстояние (км)	Высота верхней границы (км)	Азимут (град)	Расстояние (км)	Высота верхней границы (км)
	9.00 BCB (Inr)			9.00 BCB (Inv)		
Шквал сильный	87-139	68-107	16.3	-	-	-
Шквал умеренный	-	-	-	92-107	39-62	14.5
				123-138	77-88	15.9
Шквал слабый	-	-	-	277-291	44-57	14.6
				83-125	68-102	16.6
Град сильный	274-288	43-56	14.9	69-74	97-103	12.3
	94-110	39-62	14.7			
Град слабый	116-126	48-56	12.7	115-123	46-55	12.8
	172-180	36-40	9.7	171-181	34-41	9.7
	161-169	72-79	13.1	137-142	88-95	13.1
	9.10 BCB (Inr)			9.10 BCB (Inv)		
Шквал сильный	88-103	42-63	16.9	-	-	-
Шквал умеренный	281-297	46-58	14.7	73-103	44-83	16.9
	74-93	65-87	16.6			
	116-137	62-87	15.4			
Шквал слабый	-	-	-	286-300	47-59	14.8
Град сильный	95-115	68-101	16.6	73-83	50-60	12.8
	109-120	42-66	13.3	93-112	65-97	15.7
				106-119	43-66	13.3
				115-140	62-96	16.2
Град умеренный	135-141	84-91	16.3	-	-	-
	9.20 BCB (Inr)			9.20 BCB (Inv)		
Шквал сильный	70-116	40-93	19.7	67-114	40-87	17.5
Шквал слабый	-	-	-	109-137	57-84	16.1
Град сильный	186-213	23-37	15.1	185-213	22-35	15.0
	111-139	58-93	16.1	115-125	43-51	13.5
Град умеренный	116-127	43-52	13.6	141-147	87-97	13.7
Град слабый	143-147	90-98	12.5	-	-	-

Явление	Азимут (град)	Расстояние (км)	Высота верхней границы (км)	Азимут (град)	Расстояние (км)	Высота верхней границы (км)
	9.30 BCB (Inr)			9.30 BCB (Inv)		
Шквал сильный	59-134	35-85	19.2	-	-	-
	139-146	83-94	15.5			
Шквал умеренный	-	-	-	55-130	35-87	18.6
Шквал слабый	296-312	51-65	14.1	139-146	81-91	14.1
Град умеренный	161-186	17-25	13.0	161-186	17-25	13.0
				146-157	49-59	11.6
	9.40 BCB (Inr)			9.40 BCB (Inv)		
Шквал умеренный	51-113	38-88	17.7	50-110	37-88	17.7
Град сильный	107-122	22-41	14.0	146-221	10-27	14.4
	147-221	10-27	14.5	107-152	22-45	13.8
	122-153	22-31	13.5			
	116-138	41-56	13.7			
Град умеренный	143-157	46-55	12.5	-	-	-
Град слабый	303-320	53-67	14.2	113-135	41-53	13.7
				140-147	60-68	12.4
	9.50 BCB (Inr)			9.50 BCB (Inv)		
Шквал слабый	40-78	30-84	17.1	63-143	16-46	14.9
	64-143	16-41	15.4			
	134-147	42-70	13.3			
Град сильный	105-225	3-18	15.4	39-76	31-85	17.1
				105-225	4-18	15.0
Град умеренный	66-103	42-62	14.4	315-328	59-71	14.1
	10.00 BCB (Inr)			10.00 BCB (Inv)		
Град сильный	26-126	15-81	16.9	24-45	42-67	14.4
	вокруг цен- тра	0-22	13.7	34-126	15-65	16.7
				36-270	1-22	13.7
Град умеренный	-	-	-	323-333	64-75	13.5
	10.10 BCB (Inr)			10.10 BCB (Inv)		
Град сильный	вокруг цен- тра	0-42	17.0	вокруг цен- тра	0-60	17.1
Град умеренный	21-41	43-59	15.6	-	-	-
Град слабый	323-335	68-79	14.9	-	-	-
	10.20 BCB (Inr)			10.20 BCB (Inv)		
Град сильный	327-339	72-82	14.4	11-143	2-62	16.6
	9-143	2-61	16.7	157-189	14-27	13.7
	157-189	14-26	13.6			
Град умеренный	-	-	-	327-341	70-86	14.2
				186-196	93-118	15.7
	10.30 BCB (Inr)			10.30 BCB (Inv)		
Шквал умеренный	3-119	5-57	16.4	-	-	-
Шквал слабый	186-197	88-111	15.0	3-116	5-59	16.6
Град сильный	329-342	76-90	13.9	147-203	6-22	13.8
	147-216	6-22	13.9			
Град умеренный	-	-	-	185-198	78-107	15.5
	10.40 BCB (Inr)			10.40 BCB (Inv)		
Шквал умеренный	-	-	-	187-200	77-97	14.7
Град сильный	вокруг центра	0-61	15.4	341-72	3-55	13.4
Град умеренный	38-46	94-113	15.2			
	186-199	78-99	15.1	-	-	-

Явление	Азимут (град)	Расстояние (км)	Высота верхней границы (км)	Азимут (град)	Расстояние (км)	Высота верхней границы (км)
	10.50 ВСВ (Inr)			10.50 ВСВ (Inv)		
Град сильный	-	-	-	351-42	11-58	16.0
				184-198	39-50	14.2
Град умеренный	-	-	-	6-42	80-125	16.7
				190-201	70-84	15.1
	11.00 ВСВ (Inr)			11.00 ВСВ (Inv)		
Град сильный	337-347	52-70	13.6	-	-	-
Град умеренный	6-41	84-133	17.5	337-16	41-72	14.3
	190-205	47-68	15.1	159-211	22-73	15.2
Град слабый	158-193	22-38	14.4	5-37	86-125	16.9

Анализ фактических данных (наблюдений на станциях и видео, представленных в сети Интернет) показал, что данный синоптический процесс характеризовался сильными ливнями, сопровождающимися чаще шквалами разной интенсивности, чем градом.

На рис. 6 представлено диагностированное предлагаемым подходом ежечасное за период 9.00–12.00 ч ВСВ, на рис. 7 – полусуточное за период 06–18 ч ВСВ количество осадков (мм) 28 июня 2021 г. На рис. 7 также представлено полусуточное количество осадков (мм), диагностируемое ДМРЛ-Внуково за тот же период.

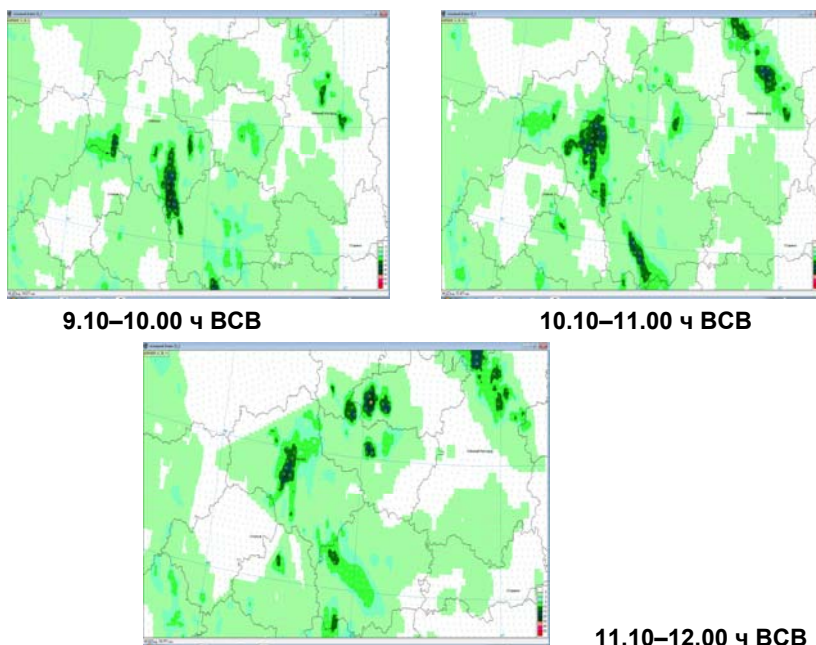
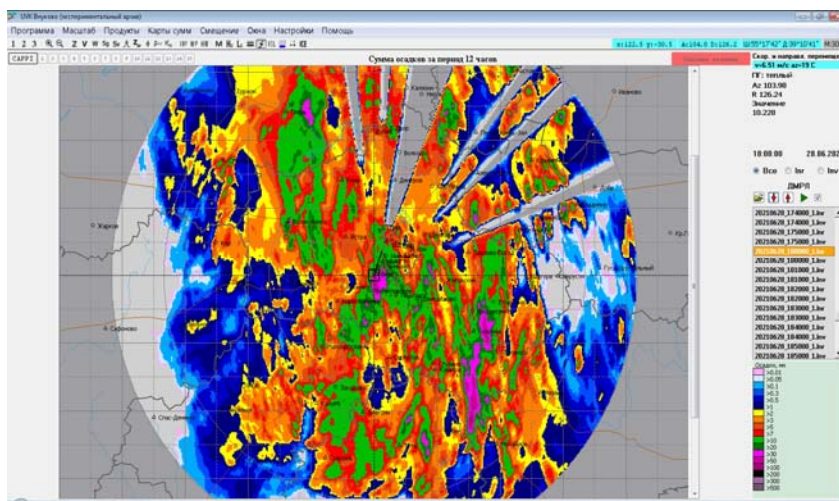
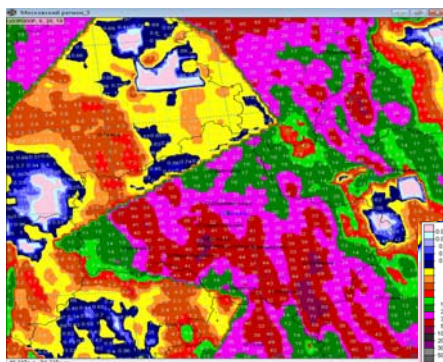
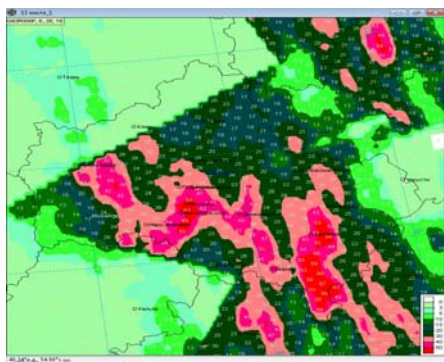


Рис. 6. Диагностированное предлагаемым подходом ежечасное за период 9.00–12.00 ч ВСВ количество осадков (мм) 28 июня 2021 г.

Fig. 6. Diagnosed hourly for the period of 09:00–12:00 UTC total precipitation (mm) on June 28, 2021.



а)



б)

Рис. 6. Диагностированное полусуточное за период 06.00–18.00 ч ВСВ количество осадков (мм) 28 июня 2021 г.: ДМРЛ-Внуково (а); предлагаемым подходом (б) в двух вариантах легенды закрашивания.

Fig. 6. Diagnosed 12-hour (for the period of 06:00–18:00 UTC) total precipitation (mm) on June 28, 2021 according to DMRL-C Vnukovo (a) and the proposed approach (б) in two variants of the color legend.

Заключение

Рассмотренный комплекс прогностической и диагностической метеорологической информации позволяет заблаговременно предупредить о возникновении конвективного шторма с неблагоприятными и опасными явлениями погоды, а диагностические спутниковые и радиолокационные данные – уточнить время и место возникновения, более детально по времени (10–15 мин) и площади (4 км) диагностировать вид и интенсивность опасных конвективных явлений погоды.

Анализ отдельных активных конвективных процессов полезен как для синоптиков-практиков, так и для совершенствования методов прогноза, что позволит принять превентивные меры защиты при возникновении неблагоприятных и опасных явлений погоды конвективного характера.

Авторы выражают благодарность сотруднику ФГБУ «НИЦ «Планета» Н.С. Мироновой за карты спутникового диагноза.

Представленные исследования выполнены в рамках темы 1.1.5 плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 годы.

Список литературы

1. Алексеева А.А. Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. канд. геогр. наук Г.К. Веселовой. 2006. Информационный сборник № 34. С. 49-69.

2. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.

3. Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2021. № 3 (381). С. 6-23.

4. Алексеева А.А., Лосев В.М., Багров А.Н. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34, от 35 до 49, 50 мм/12ч и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. канд. геогр. наук Г.К. Веселовой, канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. 2012. Информационный сборник № 39. С. 43-53.

5. Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Багров А.Н. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза шквалов с детализацией интенсивности в трех градациях (от 20 до 24, от 25 до 32, 33 м/с и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 39. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. канд. геогр. наук Г.К. Веселовой, канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. 2012. С. 54-60.

6. Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Васильев Е.В., Никифорова А.Е. Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 147-159.

7. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2019. № 4 (374). С. 127-143.

8. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.

9. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Третья редакция. М., 2019. 129 с.

References

1. Alekseeva A. A. Metody prognoza maksimal'nogo kolichestva osadkov v zonah aktivnoi konvekcii i al'ternativnogo prognoza sil'nyh livnei i shkvalov. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2006, vol. 34, pp. 49-69 [in Russ.].
2. Alekseeva A. A. A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 9, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.
3. Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M. Diagnosis of severe squalls based on the data of DMRL-C Doppler weather radars and numerical modeling – summaries. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no. 2, pp. 6-23 [in Russ.].
4. Alekseeva A.A., Losev V.M., Bagrov A.N. Rezul'taty ispytaniya avtomatizirovannogo metoda prognoza osadkov s detalizatsiey intensivnosti v trekh gradatsiyah (ot 11 do 34, ot 35 do 49, 50 mm/12ch i bolee) na osnove vyhodnykh dannykh regional'noy modeli s zablagovremennost'yu 12 i 24 ch // Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov / pod red. kand. geogr. nauk G.K. Veselovoy, kand. geogr. nauk A.A. Alekseevoy. 2012, Informacionnyy sbornik № 39, pp. 43-53 [in Russ.].
5. Alekseeva A.A., Losev V.M., Peskov B.E., Bagrov A.N. Rezul'taty ispytaniya avtomatizirovannogo metoda prognoza shkvalov s detalizatsiey intensivnosti v trekh gradatsiyah (ot 20 do 24, ot 25 do 32, 33 m/s i bolee) na osnove vyhodnykh dannykh regional'noy modeli s zablagovremennost'yu 12 i 24 ch // pod red. kand. geogr. nauk G.K. Veselovoy, kand. geogr. nauk A.A. Alekseevoy. 2012, Informacionnyy sbornik № 39, pp. 43-53 [in Russ.].
6. Alekseeva A.A., Losev V.M., Peskov B.E., Vasil'ev E.V., Nikiforova A.E. Prognoz razvitiya zon aktivnoy konvekcii s osobo opasnymi yavleniyami na osnove regional'noy modeli Gidrometcentra Rossii. 80 let Gidrometcentru Rossii, Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 147-159 [in Russ.].
7. Alekseeva A.A., Losev V.M. Forecast of severe convective weather events in summer. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 127-143 [in Russ.].
8. Alekseeva A.A., Peskov B.E. Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].
9. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike. Tret'ya redakciya. Moscow, 2019, 129 p. [in Russ.].

Поступила 26.01.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 26.01.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-43-56>

УДК 551.577.3

Пространственно-временные особенности распределения осадков на территории Азербайджана

С.Г. Сафаров¹, Д.С. Гусейнов², З.Г. Кулиев², И.В. Ибрагимова³

¹ Институт географии имени акад. Г.А. Алиева НАН Азербайджана,
г. Баку, Азербайджан;

² ЗАО «Азербайджан Хава Йоллары», УВД «Азераэронавигация»,
г. Баку, Азербайджан;

³ Министерство экологии и природных ресурсов Азербайджана,
Национальная Гидрометеорологическая Служба, г. Баку, Азербайджан
camal_huseynov_88@mail.ru

Представлены особенности пространственно-временного распределения осадков на территории Азербайджанской Республики за период с 1961 по 2016 год на основе данных наблюдений 45 гидрометеорологических станций. Основное внимание уделено региональным особенностям. На основе проведенного статистического анализа по трем временным периодам: 1881–1960, 1961–2016 и 1991–2016 гг. показано, что по сравнению с периодом 1881–1960 гг. на большей части территории страны в период 1961–2016 гг. отмечалось увеличение средних годовых сумм осадков. В то же время для большинства станций выявлено уменьшение средних за период 1991–2016 гг. годовых сумм осадков по сравнению с периодом 1961–1990 гг. Результаты исследования могут быть полезными при проведении научных исследований, а также при разработке и реализации проектов в сельском хозяйстве и в других секторах экономики.

Ключевые слова: изменение климата, осадки, рельеф, локальный процесс, конвективная облачность, ливни, доплеровские радиолокаторы

Spatiotemporal features of the precipitation regime within the territory of Azerbaijan

S.H. Safarov¹, J.S. Huseynov², Z.G. Guliyev², I.V. Ibrahimova³

¹ Institute of Geography named after academician Hasan Aliyev
Azerbaijan National Academy of Science, Baku, Azerbaijan;

² "Azerbaijan Airlines" Closed Joint-Stock Company,
Azeraeronavigation Air Traffic Control, Baku, Azerbaijan

³ Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan,
National Hydrometeorological Service, Baku, Azerbaijan
camal_huseynov_88@mail.ru

The characteristics of spatiotemporal distribution of the amount of precipitation within the territory of the Republic of Azerbaijan between 1961 and 2016 were investigated using observational data from 45 hydrometeorological stations. Main attention is paid to regional features. The statistical analysis for three time periods: 1881–1960, 1961–2016, 1991–2016 showed that an increase in average annual total precipitation was registered in most of the country in 1961–2016 as opposed to 1881–1960.

In addition to this, a decrease in average annual total precipitation for 1991–2016 as compared to 1961–1990 was found for most stations. The results of the study may be useful for scientific research, as well as for developing and implementing projects in agriculture and other economic sectors.

Keywords: climate change, precipitation, relief, local process, convective cloudiness, downpour, Doppler radars

Азербайджанская Республика по сложности рельефа и обширности территории занимает особое место в регионе Южного Кавказа, неслучайно на территории республики существуют 8 из 11 типов климата, выделенных Кеппеном [4, 7, 10, 19].

Следует отметить, что в последние годы влияние глобального потепления на региональный климат, в том числе на режим атмосферных осадков, делает необходимым проведение новых исследований в этом направлении. Хотя исследования отдельных метеорологических элементов проводились в разные периоды, изменения режима осадков, происходившие в период 1961–2016 гг., ранее не исследовались [7, 18, 19]. Изучением режима осадков в стране в разное время занимались гидрометеорологи А.М. Сихлинский, А.А. Мадатзаде, А.Д. Эйюбов, Г.А. Гаджиев, А.С. Мамедов, Р.Н. Мамедов, Р.Н. Махмудов, Саид Г. Сафаров, Н.Ш. Гусейнов и др. [1, 5, 19, 20].

В статье проанализировано распределение осадков на территории Азербайджана за период 1961–2016 гг. Целью исследований являлось определение характера современных пространственно-временных колебаний атмосферных осадков в условиях глобального изменения климата, а также выявление различий в пространственно-временном распределении количества осадков в 1881–1960, 1961–1990 и 1991–2016 годах.

При анализе использовались данные наблюдений за атмосферными осадками 45 гидрометеорологических станций. Рассматривались сезонные и годовые характеристики количества осадков. В работе использовались статистические и картографические методы. Результаты исследования представлены в виде таблиц и графиков.

На распределение атмосферных осадков по территории Азербайджана влияют воздушные массы, особенности рельефа местности, а также удаленность от Каспийского моря. Эти факторы влияют на распределение атмосферных осадков не только с севера на юг, но и на вертикальное распределение по высоте [4, 9, 12].

Рельеф Азербайджана довольно сложный, высота местности изменяется от -28 м (впадина Каспийского побережья) до 4466 м (вершина Базардюзю Большого Кавказа). Главную роль в формировании температурного режима и режима осадков в исследуемом районе играет Каспийское море, его смягчающее действие постоянно проявляется в прибрежных и прилегающих районах. Каспийское море препятствует сильному

влиянию холодного воздуха с севера, сухого зноя с юга, сухих и запыленных воздушных масс с востока во все времена года и играет ключевую роль в трансформации этих воздушных масс [5, 9, 12, 17].

Наиболее опасным видом осадков на территории Азербайджана является град [5, 13, 15, 21]. Одним из самых опасных регионов по метеорологическим условиям является западная часть страны. Это связано со сложными условиями рельефа, высокими температурными контрастами между земной поверхностью и воздушной прослойкой, сложными экспозициями горных склонов, а также взаимодействием континентальных и морских арктических воздушных масс с влажными атлантическими воздушными массами [14].

Годовые суммы осадков на побережье в северо-восточных предгорьях Большого Кавказа (Хачмаз) колеблются в пределах 300–320 мм. Однако в южных прибрежных районах (Сумгаит) этот показатель снижается до 230 мм. При подъеме в горы количество осадков постепенно увеличивается и в среднегорьях (Гырыз, Хыналыг) на высоте 2000–2100 м составляет около 550–560 мм. В прибрежной части района 38 % осадков выпадает в теплое полугодие, 62 % – в холодное; в среднегорном районе на высоте 500–1100 м 51 % осадков – в теплое, 49 % – в холодное; на высоте 2000–2100 м 65 % осадков – в теплое, а 35 % – в холодное полугодие.

Апшеронский полуостров, расположенный восточнее Большого Кавказа, постоянно подвергается воздействию воздушных масс с севера, востока и юга из-за отсутствия крупных форм рельефа. Холодные и влажные воздушные массы, проникающие в исследуемый район с севера и запада, обуславливают формирование мощных кучево-дождевых облаков (Cb) преимущественно в теплое время года [12, 14, 16]. Для обнаружения таких конвективных процессов в Азербайджане используются метеорологические радиолокаторы, в том числе доплеровские. Эти радиолокаторы позволяют определить ячейковую структуру облачных систем, следить за динамикой их развития, оценить количество и интенсивность выпадающих осадков и т. д. (рис. 1). Средние за период 1961–2016 гг. значения годовых сумм осадков на Апшеронском полуострове (Алят, Баку, Сумгаит, Маштага, Пираллахи) составляют 200–280 мм, а на морских станциях Чилов, Нефт Дашлары – 135–155 мм. В теплое полугодие выпадает 33 % осадков, в холодное полугодие – 67 %.

Режимы осадков южного и юго-восточного склонов Большого Кавказа различаются слабо. Годовые суммы осадков в предгорьях (Закатала) составляют 950–1000 мм, а в среднегорной зоне примерно до высоты 1500–1600 м (Алибей) увеличиваются до 1250–1300 мм. Однако в верхней части среднегорья этот показатель начинает снижаться. В предгорьях в теплое полугодие количество осадков составляет 61 %, в холодное полугодие – 39 %, на высоте 500–800 м в теплое полугодие – 57 %, на южном конце той же высоты в теплое полугодие – 51 %, в среднегорьях в теплое полугодие – 62 % осадков.

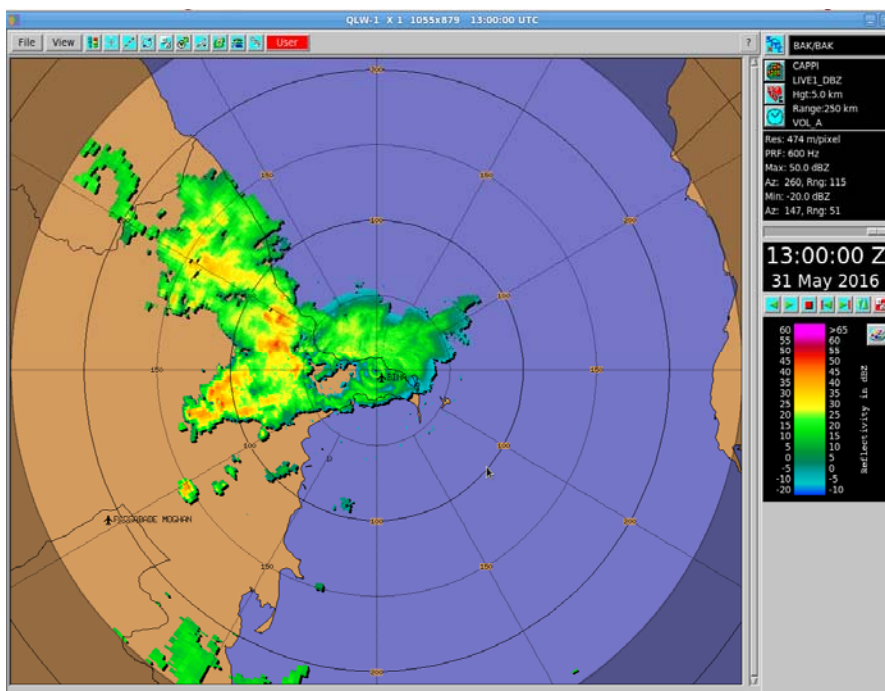


Рис. 1. Доплеровское (WRM200) радиолокационное обнаружение осадков на Апшеронском полуострове. Более красные области соответствуют более интенсивным осадкам.

Fig. 1. Determination of precipitation over the Absheron Peninsula via Dopler radar. More red zones correspond to more intense precipitation.

Среднегодовая температура в бассейне реки Кура выше, чем в других частях страны. Это не приводит к существенным различиям в годовом распределении осадков. В районе нет вертикальной поясности. Большая часть территории расположена на высоте до 300 м, за исключением Джейранчельского и Ганых-Айричайского районов.

Особенности Ганых-Айричайской долины соответствуют особенностям южных склонов Большого Кавказа. Средние за период 1961–2016 гг. в прибрежных и центральных районах годовые суммы осадков составили около 240–350 мм, а в Джейранчельской равнине и в западных районах низменности – 300–420 мм. В теплое полугодие средние за период 1961–2016 гг. суммы осадков на побережье составили 37 %, в холодное полугодие – 63 %; в центральной части в теплое полугодие – 46 %; в западной части в теплое полугодие – 55 % (табл. 1). Доля количества осадков холодного периода с запада на восток увеличивается, а теплого периода – уменьшается.

Таблица 1. Показатели осадков на гидрометеорологических станциях за 1961–2016 гг., мм**Table 1.** Precipitation parameters at hydrometeorological stations in 1961–2016, mm

Станция	H, м	Y _{ос}	Y _с	Зима	Весна	Лето	Осень	% в теплое полугодие	% в холодное полугодие
Хачмаз	27	344	313	83	75	45	110	38	62
Губа	550	52	520	102	129	110	178	46	54
Халтан	1104	-	518	92	153	116	158	52	48
Алтыгадж	1099	-	526	92	174	113	147	55	45
Гырыз	2071	490	555	65	180	183	128	65	35
Баку	2	195	269	92	63	18	96	30	70
Сумгаит	-20	185	227	70	57	19	81	34	66
Маштага	27	245	284	94	63	18	108	29	71
Пираллахи	-25	174	198	64	52	13	69	33	67
Чиллов	-17	-	157	53	43	9	51	34	66
Нефт Дашлары	-17	-	135	44	39	8	44	35	65
Алибей	1540	1210	1274	142	384	406	341	62	38
Закатала	487	939	957	123	304	276	254	61	39
Шеки	639	692	790	115	248	214	212	59	41
Габала	679	908	973	155	307	231	280	55	45
Огуз	582	-	891	138	281	216	255	56	44
Шемаха	750	493	603	126	190	107	180	49	51
Мараза	775	385	363	71	120	70	102	52	48
Джейранчель	419	-	321	46	106	97	73	63	37
Мингечаур	93	-	338	62	109	76	91	55	45
Евлах	13	278	306	53	96	73	84	55	45
Геокчай	107	433	422	93	138	74	118	50	50
Зердаб	-5	-	297	62	93	48	94	48	52
Кюрдамир	2	341	352	80	107	54	111	46	54
Аджикабул	-7	-	243	63	79	26	74	44	56
Джафархан	-16	246	291	77	92	34	88	43	57
Имишли	-1	-	286	66	91	40	89	46	54
Бейлаган	62	265	301	64	102	50	85	50	50
Билясувар	75	-	331	94	100	29	108	39	61
Нефтчала	-24	-	288	82	78	18	111	33	67
Сальян	-21	-	265	75	79	26	86	39	61
Актафа	331	-	363	53	122	103	85	62	38
Шамкир	404	-	323	50	106	91	75	61	39
Гянджа	312	246	276	37	92	81	67	62	38
Дашкесан	1655	525	645	86	218	205	136	66	34
Кедабек	1480	549	711	79	232	254	147	68	32
Геитепе	2	535	601	180	132	51	238	30	70
Ленкорань	-20	1111	1189	298	193	106	591	25	75
Астара	-23	1292	1271	291	212	147	621	28	72
Ярдымлы	730	600	632	121	167	101	242	43	57
Кальваз	1567	300	336	88	116	37	95	45	55
Шарур	812	-	270	58	113	42	56	58	42

Станция	<i>H</i> , м	<i>Y</i> _{ос}	<i>Y</i> _с	Зима	Весна	Лето	Осень	% в теплое полугодие	% в холодное полугодие
Шахбуз	1205	-	346	76	148	54	67	58	42
Нахичевань	875	251	255	55	108	40	53	58	42
Ордубад	861	276	262	59	109	38	56	56	44

Примечание. *H* – абсолютная высота станции; *Y*_{ос} и *Y*_с – средние за периоды 1881–1960 и 1961–2016 гг. годовые суммы осадков соответственно.

Гипсометрический уровень Малого Кавказа, расположенного к западу от Кура-Аразской низменности, повышается от предгорий к Муровскому (3724 м, Гамишдаг) и Шахдагскому (3367 м, Большой Хиналдаг) хребтам [4, 10]. Существуют различия в режиме осадков для районов, контраст высоты которых составляет приблизительно 3400 м. Так как часть исследуемой территории находилась в зоне военного конфликта, гидрометеорологические станции не проводили наблюдений с 1990 по 2020 год. За период 1961–2016 гг. среднее значение годовых сумм осадков в северо-западной части Малого Кавказа на северных склонах хребтов Шахдаг и Муровдаг на высоте 300–330 м составляло до 270–280 мм, а в западной части увеличивалось до 360–370 мм.

На высоте 400–450 м в регионе Шамкир этот показатель снижается до 320–330 мм. В среднегорье, расположенном на высоте 1400–1700 м (Дашкесан, Кедабек), количество осадков составляет 640–710 мм. Показатели сезонных осадков в этих районах имеют разные характеристики. В предгорье в теплое полугодие выпало 62 % осадков; в среднегорье – 67 %.

Распределение средних за период 1961–2016 гг. годовых сумм осадков в Ленкоранском природном районе несколько отличается от других районов. Так, в прибрежных районах (Ленкорань, Астара) осадки выпадали в интервале 1150–1300 мм. В северной части области, в конце Кура-Аразской низменности, на равнинах недалеко от моря (Гейтепе) и на высоте 700–750 м Талышских гор (Ярдымлы) средние суммы осадков составляют 600–650 мм, а на высоте 1500–1600 м (Кальваз) этот показатель снижается до 330–340 мм. Вверх от предгорий Талышского хребта наблюдается уменьшение количества осадков. В результате сильного испарения в этом районе теплый влажный воздух быстро насыщается и после удаления от берега конвективные процессы вызывают осадки [6, 11, 17, 19]. За период 1961–2016 гг. 28 % годовых сумм осадков на побережье выпало в теплое полугодие, 72 % – в холодное; в среднегорье в теплое полугодие – 44 %. В целом по области в теплое полугодие выпало 34 % годовых сумм осадков.

В среднегорье, на участке плато на высоте 800–900 м (Шарур, Ордубад, Нахичевань) Нахичеванской области (Средний Араз), расположенном на западных склонах Зангезурско-Даралаязского хребта на западе республики, средние значения годовых сумм осадков находятся

в пределах 250–270 мм, в верхней части среднегорья (Парагачай) – 480–520 мм. В целом по области 58 % осадков выпало в теплое полугодие.

Если обратить внимание на изменение годовых сумм осадков на гидрометеорологических станциях с 1961 по 2016 год, можно увидеть их уменьшение, за исключением станций Баку и Хачмаз (рис. 2).

Для анализа трендов в качестве критерия были использованы коэффициенты детерминации и уравнения линейной регрессии (табл. 2). Из табл. 2 видно, что для станций Нефтяные Камни и Геокчай наблюдается отрицательная тенденция во временных рядах годовых сумм осадков, т. е. идет их уменьшение, а для станции Баку – положительная тенденция.

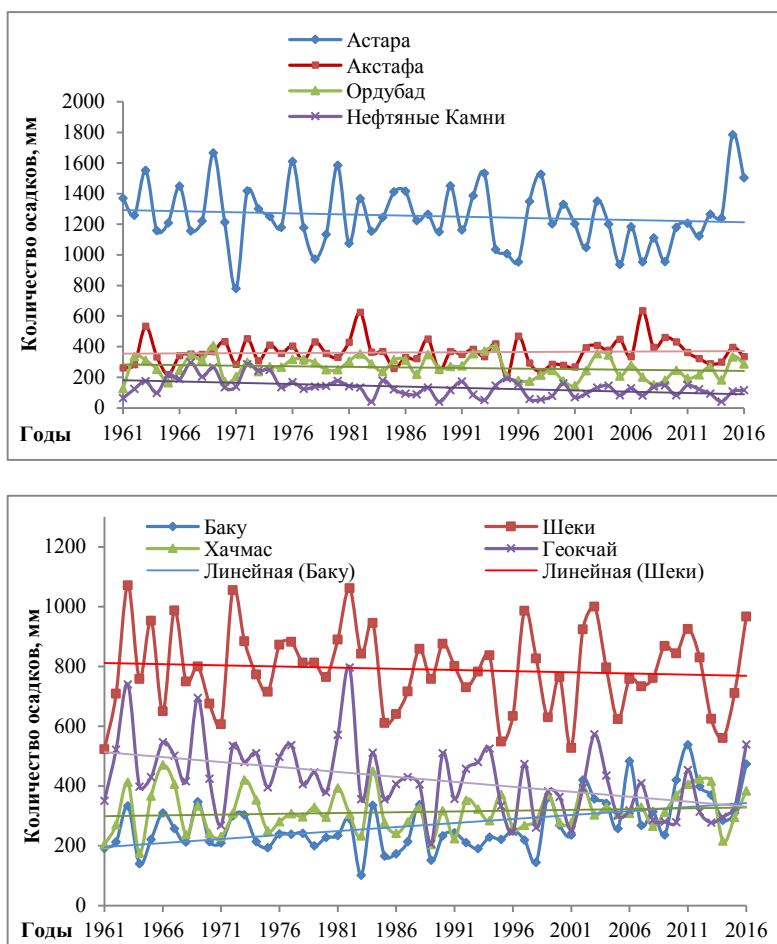


Рис. 2. Изменения годовых сумм осадков на гидрометеорологических станциях в 1961–2016 гг.

Fig. 2. The trend in annual precipitation at hydrometeorological stations in 1961–2016.

Таблица 2. Значения коэффициентов детерминации R^2 для линейных трендов и уравнения регрессии временного хода годовых сумм осадков на отдельных гидрометеорологических станциях за период 1991–2016 гг.

Table 2. The values of coefficients of determination R^2 for linear trends and regression equations for temperature variations in annual precipitation at some hydrometeorological stations in 1991–2016

Станция	Коэффициент детерминации R^2 для линейных трендов	Уравнения регрессии
Астара	0,0132	Связь отсутствует $y = 1.4145x + 4065.7$
Актафа	0,0036	Связь отсутствует $y = 0.3168x - 267.25$
Ордубад	0,0334	Связь отсутствует $y = -0.7578x + 1769.6$
Нефтяные Камни	0,2145	Отрицательная тенденция $y = -1.7011x + 3517.7$
Шеки	0,0085	Связь отсутствует $y = 0.7788x + 2338.6$
Геокчай	0,1943	Отрицательная тенденция $y = -3.2908x + 6965.9$
Хачмас	0,0158	Связь отсутствует $y = 0.5213x - 723$
Баку	0,2377	Положительная тенденция $y = 2.6733x - 5046.4$

При сравнении средних за периоды 1961–2016 и 1881–1961 гг. годовых сумм осадков отмечается увеличение количества осадков на станциях, за исключением станций Астара, Ордубад, Губа, Хачмаз и Мараза. Так, на 7 станциях увеличение данного параметра составляет до 10 %, на 9 станциях – 10–20 %, на 5 станциях – 20–38 %. На 6 станциях количество осадков уменьшилось в пределах 1–8 %. Наибольшее увеличение количества осадков наблюдалось в Баку и Кедабеке (см. табл. 1). Наглядно эти изменения представлены на рис. 3.

Если сравнить средние за периоды 1881–1960 и 1961–2016 гг. годовые суммы осадков, можно увидеть расширение изогетной области 200–400 мм в 1961–2016 гг. На рис. 3 можно увидеть, что южный склон Большого Кавказа и восточный склон Талышского хребта имеют большее количество осадков. Меньше осадков выпадает на Кура-Аразской низменности, Апшеронском полуострове и на равнине Аразбою.

Показатели количества осадков в период 1991–2016 гг. сравнивались с соответствующими показателями в период 1961–1990 гг. (рис. 4). Как видно из рис. 4, в 1991–2016 гг. количество осадков уменьшилось на 1–29 % на 35 станциях, увеличилось на 1–32 % на 10 станциях, а на 2 станциях было стабильным. Наибольшее увеличение наблюдалось на станции Баку. Уменьшение количества осадков наблюдалось на станциях Нефть Дашлары и Маразе.

Хотя в целом количество осадков на Апшеронском полуострове и северных прибрежных равнинах увеличивается, но к югу от Апшеронского полуострова их количество уменьшается (рис. 4, табл. 2) к северо-востоку от Кура-Аразской низменности и достигает своего пика (22%) в Джейранчеле. На станциях Нахичевань и Акстафа, расположенных вблизи крупных рек, не наблюдалось значительных колебаний количества осадков.

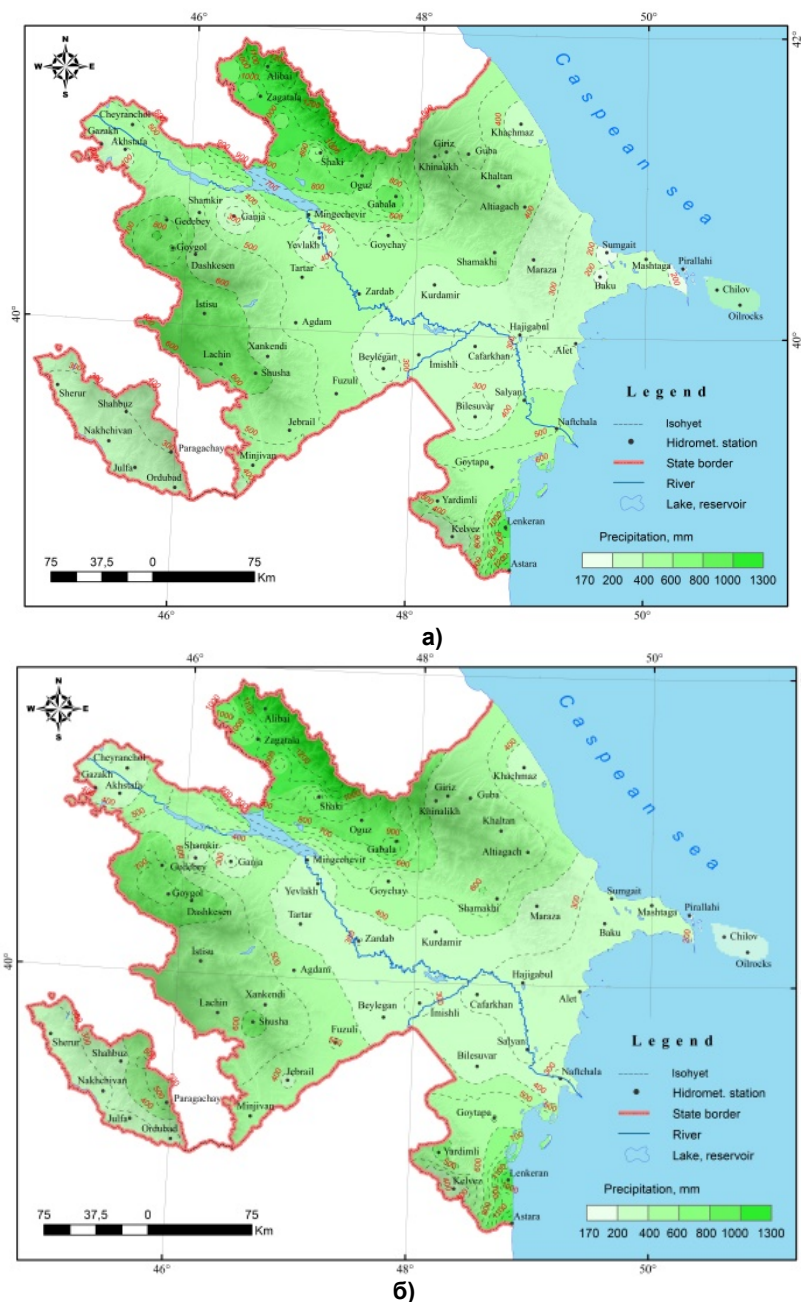
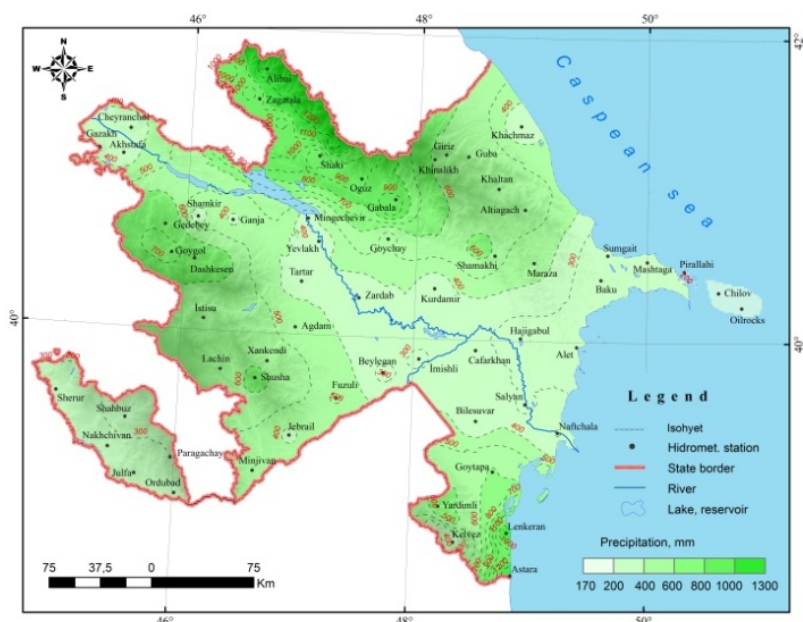


Рис. 3. Пространственное распределение средних за периоды 1881–1960 гг. (а) и 1961–2016 гг. (б) годовых сумм осадков на территории Азербайджанской Республики.

Fig. 3. Average annual precipitation in Azerbaijan for 1881–1960 (a) and 1961–2016 (b).



a)



б)

Рис. 4. Пространственное распределение средних за периоды 1961–1990 гг. (а) и 1991–2016 гг. (б) годовых сумм осадков на территории Азербайджанской Республики.

Fig. 4. Average annual precipitation in Azerbaijan for 1961-1990 (a) and 1991-2016 (б).

В табл. 3 представлены статистические характеристики годовых сумм осадков за период 1961-2016 гг.

Таблица 3. Статистические показатели многолетних рядов годовых сумм осадков

Table 3. Statistical indicators of long-term series of annual precipitation

Станция	σ_x	C_v	S_o	A		5%-ные критерии	
				мм	%	Fisher (2.17)	Styudent (2.01)
Баку	89	0,32	269	75	32	2,68	3,35
Чиллов	53	0,34	157	-31	-18	1.4	2.23
Маштага	83	0,29	284	16	6	1.24	0.71
Сумгаит	67	0,29	224	5	2	1.04	0.09
Нефт Дашлары	60	0,44	135	-44	-28	2.5	2.92
Закатала	177	0,18	957	-5	-0,5	1.11	0.11
Шеки	137	0,17	790	-39	-5	1.04	1.06
Габала	196	0,20	974	59	-6	1.19	1.12
Огуз	167	0,19	891	-57	-6	1.11	1.26
Шемаха	158	0,26	604	-59	-9	2.27	1.41
Мараза	109	0,30	363	-124	-29	1.18	4.99
Хачмаз	67	0,21	314	14	5	1.67	0.76
Губа	86	0,17	520	-6	-1	2.18	0.27
Алтыгадж	115	0,22	526	-48	-9	1.35	1.57
Гырыз	113	0,20	555	-66	-11	1.05	2.22
Геокчай	121	0,28	422	-97	-20	1.65	3.21
Мингечаур	79	0,23	339	-20	-6	1.70	0.95
Джафархан	73	0,25	291	-25	-8	1.42	1.23
Астара	248	0,20	1271	-93	-7	1.67	1.4
Ленкорань	220	0,18	1190	-36	-3	1.52	0.57
Ярдымлы	123	0,19	633	-56	-9	1.03	1.63
Актафа	86	0,24	363	0	0,0	1.13	0.02
Шамкир	79	0,24	324	-52	-15	3.38	2.41
Кедабек	148	0,21	706	48	7	2.2	0.86
Ордубад	67	0,25	263	-30	-11	1.5	1.56

Примечание. σ_x – среднее квадратическое отклонение; C_v - вариация; S_o –годовые суммы осадков; A -- разница между количеством осадков в 1961–1990 и 1991–2016 гг.; 5%-ные критерии – Фишера (порог критерия 2.17) и Стьюдента (порог критерия 2.01).

Среднее квадратическое отклонение σ изменяется в пределах 50–100 мм на 12 станциях, 100–200 мм на 11 станциях, 200–250 мм – на станциях Астара и Ленкорань. Наименьшие значения отмечены для станции Чиров. Как видно, большие отклонения наблюдаются в районах с сильными осадками. Поэтому для выявления степени временной изменчивости годовых осадков удобно использовать коэффициент вариации.

Как видно из табл. 3, за период 1961–2016 гг. значения коэффициента вариации рядов C_v для различных станций варьируют в пределах 0,17–0,44. Более высокие показатели относятся к станциям на Апшероне, более низкие – к станциям Шеки, Губа, Ленкорань, Ярдымлы и Огуз.

Наибольшие значения годовых сумм осадков наблюдаются на станциях, расположенных в Ленкоранской низменности и на южном склоне Большого Кавказа. На 17 из 25 станций наблюдалось уменьшение осадков, на 6 – увеличение, на 1 – без существенных изменений.

Таким образом, при исследовании наблюдений за осадками были получены следующие **результаты**:

1. Выявлена вертикальная зональность распределения осадков. По мере возрастания высоты над уровнем моря количество осадков увеличивается, лишь в Ленкоранской низменности эта закономерность нарушается: начиная с некоторой высоты количество осадков уменьшается.

2. В годовом измерении в горных районах осадки распределяются равномерным образом, а в прибрежных районах основная часть осадков выпадает в холодное время года.

3. В период 1961–2016 гг. отмечается увеличение средних значений годовых сумм осадков на 2–38 % на 22 станциях, а на 6 станциях уменьшение на 1–8 % по сравнению с 1881–1960 гг.

4. Среднее значение годовых сумм осадков за период 1991–2016 гг. для большинства станций уменьшилось на 3–29 % по сравнению с периодом 1961–1990 гг., а на некоторых станциях, включая Баку, наблюдалось их увеличение до 32 %.

Учитывая дефицит водных ресурсов в стране, полученные результаты имеют важное значение для сельского хозяйства и при проектировании и размещении ряда хозяйственно-производственных объектов в регионах страны

Благодарность. Авторы особенно благодарны Гюльзар Байрамовой, Эльмире Кайсын и Рагифу Ахмедову за техническую поддержку.

Список литературы

1. *Агроклиматический атлас* Азербайджанской Республики / Под редакцией А.Дж. Эйюбова. Баку, 1993. С. 7-15.
2. *Атлас* теплового баланса Азербайджанской Республики / Под редакцией А.М. Шихлинского, на азерб. и рус. яз. М., 1978. 92 с.
3. *Гаджизаде Ф. М., Ахмедов Ш.А.* Глобальное изменение климата в XXI веке // *Новости АМАКА*. 2004. Т. 7, № 1. С. 60-64.
4. *География* Азербайджанской Республики. Физическая география. Баку, 2014. 528 с.

5. Гусейнов Н.Ш. Синоптическая метеорология. Баку, 2011. 316 с.
6. Гусейнов Д.С. Особенности распределения многолетнего температурного режима на территории Азербайджана // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4. С.110-116. DOI:10.37162/2618-9631-2020-4-110-116.
7. Иманов Ф.А., Мамедов А.С. Исследование засухи в субтропической климатической зоне Азербайджана // Труды Азербайджанского географического общества. Том XVI. Баку, 2011. С. 267-270.
8. Иманов Ф.А. Статистические методы в гидрометеорологии. Баку, 2011. 272 с.
9. Мадатзаде А.А. Виды воздуха и климат на Апшероне. Баку, 1960. 325 с.
10. Мусеибеков М.А. Физическая география Азербайджана. Баку, 2003. 400с.
11. Меликов А.А. Влияние климатических условий на сток в Ленкоранском природном районе // Труды Азербайджанского географического общества. Том. XIX. Баку, 2017. С. 209-213.
12. Сафаров С.Г., Гусейнов Дж.С., Ибрагимова И.Т. Анализ особенностей многолетних изменений температуры в прикаспийских прибрежных районах Азербайджанской Республики // Научные труды НАА. 2018. № 1. С. 101-108.
13. Сафаров С.Г. Влияние климатических изменений на режим осадков в Азербайджане // Гидрометеорология и Экология. Алматы, 2008. № 4. С. 34-45.
14. Сафаров С.Г. Грозоградовые и селевые явления на территории Азербайджана и радиолокационные методы их прогнозирования. Баку, 2012. 292 с.
15. Сафаров С.Г. Современные климатические изменения на территории Азербайджана // Экология и Промышленность России. 2009. № 5. С. 56-59.
16. Сафаров С.Г. Оценка повторяемости явлений градобития и их экономических последствий в западной зоне Азербайджана // Труды Азербайджанского географического общества. Том IX. Баку, 2004. С. 341-350.
17. Сафаров С.Г., Сафаров Э.С., Гусейнов Д.С., Исмаиловой Н.Н. Современные изменения атмосферных осадков на Каспийском побережье Азербайджана // Океанологические исследования. 2020. № 1. С. 27-44.
18. Халилов С.Х., Сафаров С.Г. Месячные и годовые нормы температуры воздуха и атмосферных осадков в Азербайджанской Республике (1691–1990). Баку, 2001. 110 с.
19. Шихлинский Э.М., Мадатзаде А.А. Климат Азербайджана. Баку: Изд. АН АЗССР, 1968. 343 с.
20. Mamedov R.M., Safarov S.G., Safarov E.S. Current changes of the atmospheric precipitation regime on the territory of Azerbaijan // Geography and Natural Resources. Elsevier, 2009. Vol. 30, no. 4. P. 403-407.
21. Safarov S.H., Nasibli A.T., Huseynov J.S., Ibrahimova I.T. Influence of Climate Warming on Hail Events in the Western Part of Azerbaijan. Baku, 2017. P. 83-90.

References

1. Agroklimaticheskij atlas Azerbajdzhanskoj Respubliki. Pod redakciej A. Dzh. Ejyubova. Baku, 1993, pp. 7-15. [in Russ.].
2. Atlas teplovogo balansa Azerbajdzhanskoj Respubliki. Pod redakciej A. M. Shihlinskogo, na azerb. i rus. yaz. Moscow, 1978, 92 p. [in Russ.].
3. Gadzhizade F. M., Ahmedov Sh.A. Global'noe izmenenie klimata v XXI veke [Global climate change in the 21st century] Novosti AMAKA, 2004, vol. 7, no.1, pp. 60-64 [in Russ.].
4. Geografiya Azerbajdzhanskoj Respubliki. Fizicheskaya geografiya [Geography of the Azerbaijan Republic. Physical geography]. Baku, 2014, 528 p. [in Russ.].

5. Guseinov N. Sh. Sinopticheskaya meteorologiya [Synoptic meteorology]. Baku, 2011, 316 p. [in Russ.].
6. Guseinov D. S. Features of the distribution of long-term temperature regime on the territory of Azerbaijan. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2020, vol. 378, no. 4, pp. 110-116 [in Russ.].
7. Imanov F.A., Mamedov A.S. Issledovanie zasuhi v subtropicheskoy klimaticheskoy zone Azerbajdzhana. *Trudy Azerbajdzhanskogo geograficheskogo obshchestva*. Tom XVI. Baku, 2011, pp. 267-270 [in Russ.].
8. Imanov F.A. Statisticheskie metody v gidrometeorologii [Statistical Methods in Hydrometeorology]. Baku, 2011, 272 p. [in Russ.].
9. Madatzade A.A. Vidy vozduha i klimat na Apsheronе [Types of air and climate in Absheron]. Baku, 1960, 325 p. [in Russ.].
10. Museibov M.A. Fizicheskaya geografiya Azerbajdzhana [Physical geography of Azerbaijan]. Baku, 2003, 400 p. [in Russ.].
11. Melikov A.A. Vliyanie klimaticheskikh usloviy na stok v Lenkoranskom prirodnom rayone // *Trudy Geogr. obshchestva Azerbaydzhana*. Tom. XIX. Baku, 2017, pp. 209-213 [in Russ.].
12. Safarov S.G., Guseynov Dzh.S., Ibragimova I.T. Analiz osobennostey mnogoletnih izmeneniy temperatury v prikaspiyskikh pribrezhnykh rayonah Azerbaydzhanskoj Respubliki. *Nauchnye trudy NAA*, 2018, № 1, pp. 101-108 [in Russ.].
13. Safarov S.G. Vliyanie klimaticheskikh izmeneniy na rezhim osadkov v Azerbaydzhanе. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Almaty, 2008, no. 4, pp. 34-45 [in Russ.].
14. Safarov S.G. Grozogradovye i selevyе yavleniya na territorii Azerbaydzhana i radiolokacionnye metody ih prognozirovaniya. Baku, 2012, 292 p. [in Russ.].
15. Safarov S.G. Sovremennye klimaticheskie izmeneniya na territorii Azerbaydzhana. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2009, no. 5, pp. 56-59 [in Russ.].
16. Safarov S.G. Ocenka povtoryaemosti yavleniy gradobitiya i ih ekonomicheskikh posledstviy v zapadnoy zone Azerbaydzhana. *Trudy Geogr. Obshchestva Azerbaydzhana*. Tom IX. Baku, 2004, pp. 341-350 [in Russ.].
17. Safarov S. H., Safarov E. S., Huseynov J. S., Ismayilova N. N. Modern changes in precipitation on the Caspian coast of Azerbaijan. *Journal of Oceanological Research*, 2020, vol. 48, no. 1, pp. 27-44. [in Russ.]. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).2.
18. Halilov S.H., Safarov S.G. Mesyachnye i godovye normy temperatury vozduha i atmosferynh osadkov v Azerbaydzhanskoj Respublike (1691–1990). Baku, 2001, 110 p. [in Russ.].
19. Shihlinskiy E.M., Madatzade A.A. Klimat Azerbaydzhana. Baku, Izd. AN AzSSr, 1968, 343 p. [in Russ.].
20. Mamedov R.M., Safarov S.G., Safarov E.S. Current changes of the atmospheric precipitation regime on the territory of Azerbaijan. *Geography and Natural Resources. Elsevier*, 2009, vol. 30, no. 4, pp. 403-407.
21. Safarov S.H., Nasibli A.T., Huseynov J.S., Ibrahimova I.T. Influence of Climate Warming on Hail Events in the Western Part of Azerbaijan. Baku, 2017, pp. 83-90.

Поступила 06.02.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 06.02.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-57-70>

УДК 551.467

Моделирование характеристик ледяного покрова Каспийского моря на основе модели CICE

Е.С. Нестеров, В.Д. Жупанов, А.В. Федоренко

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

Выполнено моделирование характеристик ледяного покрова в северной части Каспийского моря на основе модели CICE (Community Ice CodE). Описана общая структура модели и опыт ее использования в оперативной практике ведущих прогностических центров. Выполнены расчеты характеристик ледяного покрова в северной части Каспийского моря для четырех зимних сезонов (октябрь–март) в 2005–2009 годах. Рассчитаны значения сплоченности и толщины льда. Сравнение результатов расчета с данными наблюдений показало, что модель удовлетворительно воспроизводит процессы нарастания и таяния льда.

Ключевые слова: Каспийское море, ледяной покров, модель CICE, сплоченность и толщина льда

Modeling the characteristics of the Caspian Sea ice cover based on the CICE model

E.S. Nesterov, V.D. Zhupanov, A.V. Fedorenko

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

The characteristics of the ice cover in the northern part of the Caspian Sea are simulated using the CICE model. The general structure of the model and the experience of its operational application in leading forecast centers are described. Calculations of the ice cover characteristics in the northern Caspian Sea for four winter seasons (October–March) in 2005–2009 are performed. The values of ice concentration and ice thickness are calculated. The comparison of the calculation results with observational data showed that the model satisfactorily reproduces the processes of ice build-up and melting.

Keywords: Caspian Sea, ice cover, CICE model, ice concentration and ice thickness

Введение

Ледяной покров Каспийского моря формируется в основном в Северном Каспии и оказывает существенное влияние на судоходство и добычу углеводородов. Ледовый сезон в Северном Каспии обычно продолжается с ноября по март [4, 5]. Однако сроки начала и окончания ледового сезона

могут сдвигаться на месяц и более в зависимости от атмосферных процессов. Опасными ледовыми явлениями считаются [1]:

- суровые зимы, когда вся акватория Северного Каспия покрывается толстым неподвижным льдом – припаем;
- появление льда в море и каналах раньше 15 ноября (средняя многолетняя дата закрытия летней навигации в Северном Каспии);
- интенсивный дрейф, подвижки, заторы и торошение льда;
- быстрое обледенение судов и гидротехнических сооружений.

Для прогноза характеристик ледяного покрова Каспийского моря до настоящего времени обычно использовались методы, основанные на статистических связях между метеорологическими и ледовыми параметрами. В качестве примера можно привести метод краткосрочного прогноза нарастания толщины льда в северо-восточной части Каспийского моря, основанный на зависимости между суммой отрицательных температур воздуха и толщиной льда [6]. Долгосрочные прогнозы основаны на статистических связях между характеристиками температуры воздуха и давления над различными районами Северного полушария и характеристиками ледовых процессов в Каспийском море [3].

Однако в последнее время для прогноза характеристик ледовых процессов стали использоваться гидродинамические модели. В [2] описан опыт применения модели CICE (Community Ice CodE) для прогноза на 5–10 суток характеристик ледяного покрова в Беринговом море. Представлены результаты прогнозов сплоченности льда, ледовитости моря, а также дат первого появления льда, устойчивого ледообразования и полного очищения для зимнего сезона 2018/2019 гг. Прогнозы сравнивались с картами ледовой обстановки Национального ледового центра США и ФГБУ «НИЦ «Планета», построенными на основе спутниковой информации. Получено, что с увеличением заблаговременности качество прогнозов падает. Так, если в прогнозе сплоченности льда на 5 суток положение кромки льда воспроизводится удовлетворительно, то с заблаговременностью 9 суток ошибка в положении кромки может достигать 30–60 миль.

В [8] для краткосрочного прогноза характеристик льда в Северном Ледовитом океане и прилегающих к нему акваторий использовалась модель динамики и термодинамики морского льда, реализованная на основе упрощенного алгоритма модели CICE с циклическим усвоением спутниковых данных по температуре поверхности океана и сплоченности льда.

В [7] представлены результаты прогноза на сутки сплоченности ледяного покрова Каспийского моря в феврале 2017 г. Для прогноза использовалась совместная модель циркуляции океана и эволюции морского льда [9], позволяющая рассчитывать толщину и сплоченность льда, а также скорость дрейфа льда. Сопоставление прогноза с анализом ледовой обстановки на основе спутниковой информации показало, что модель адекватно воспроизводит структуру ледяного покрова в Северном Каспии, в том числе положение кромки льда в прибрежных районах.

Основной целью наших исследований является создание технологии оперативного прогноза ледовых условий в Каспийском море на срок до 10 суток на основе модели CICE. Но прежде было необходимо оценить, насколько успешно модель воспроизводит изменения основных ледовых характеристик (сплоченность и толщина льда, сроки замерзания и очищения моря ото льда) в течение зимнего сезона.

В данной статье приводятся результаты опытного применения модели CICE для моделирования ледовых характеристик в зимние сезоны 2005–2008 годов.

Развитие модели CICE и ее использование в оперативных прогностических системах

Большинство систем параметризации и моделирования морского льда, разработанных в последние годы, были собраны научным сообществом и интегрированы в сложные модели морского льда, наиболее совершенной и полной из которых, по-видимому, является модель морского льда CICE, разработанная Е. Ханке (E. Hunke) в Лос-Аламосе (США) [12, 17]. Программное обеспечение общего доступа модели CICE распространяется в сочетании с пакетом Icerack, набор физических параметров которого учитывает термодинамические и динамические подсеточные процессы, обычно не разрешаемые другими моделями. Благодаря эффективности, пакет Icerack нашел применение в моделях океана и морского льда, отличных от CICE [19]. Модульная реализация программного обеспечения CICE позволяет пользователям варьировать сложность конкретной модели морского льда в зависимости от назначения и применяемого набора активных и пассивных индикаторов, описывающих состояние морского льда как в совместных океан – атмосфера моделях климата, так и в самостоятельных моделях динамики ледяного покрова.

Для учета изменений толщины морского льда, обычно наблюдаемых в подсеточных масштабах, в модели CICE выполняется дискретизация ледяного покрова на несколько классов, каждый из которых представляет диапазон толщины морского льда и описывает эволюцию распределения толщины льда во времени и пространстве. В дополнение к распределению толщины льда, CICE включает в себя дополнительную возможность для распределения льдин по размерам. Горизонтальный размер льдины может изменяться в результате вертикального и бокового роста и таяния, замораживания нового льда, разрушения волнами и т. д.

В CICE морской лед и снег разделены на пять категорий толщины; в каждой из которых есть четыре слоя льда и один слой снега (эти настройки являются настройками CICE по умолчанию). Для каждого слоя льда и снега изменения толщины происходят в результате термодинамических процессов, включая радиационные, турбулентные и тепловые потоки, вычисляемые с помощью термодинамической модели. Модельное распреде-

ление толщины льда изменяется во времени из-за термодинамических и динамических процессов и обновляется с использованием схемы изменения толщины льда. Динамические процессы включают дрейф льда, адвекцию сплоченности и параметризацию торошения.

В Канадском метеорологическом центре разработана Глобальная система прогнозирования ледяного покрова океана (GIOPS), которая предоставляет ежедневные глобальные анализы характеристик льда и океана и 10-дневные прогнозы на сетке с разрешением $1/4^\circ$ [20]. Система GIOPS работает в режиме реального времени с 2011 года. Используемая численная модель представляет собой модель океана со льдом, основанную на моделях NEMO версии 3.1 и CICE версии 4.0. Модель CICE вычисляет эволюцию распределения толщины ледяного покрова в ячейках сетки. Распределение толщины изменяется в результате термодинамических и динамических процессов. Используются 10 категорий толщины: 10, 15, 30, 50, 70, 120, 200, 400 и 600 см. Пять дополнительных категорий позволяют более подробно представить как очень тонкий лед (менее 1 м), так и более толстый многолетний лед. Динамический компонент вычисляет поле скоростей, явно решая двумерное уравнение движения льда с использованием упруго-вязко-пластической реологии (EVP). Термодинамический компонент вычисляет рост/таяние снега и льда и профиль температуры по вертикали, решая уравнение диффузии тепла. Атмосферное воздействие для NEMO-CICE берется из Глобальной системы детерминированного прогнозирования GDPS, которая в настоящее время имеет разрешение 25 км. 10-дневные прогнозы, выполнявшиеся еженедельно с 12 января по 28 декабря 2011 года, оценивались на основе анализа льда 3D-Var. Прогнозы показывают значительное снижение среднеквадратической ошибки в сплоченности льда в течение всего 10-дневного прогноза. Рост ошибок происходит быстрее в течение первых нескольких дней и постепенно уменьшается со временем. Для Арктики наиболее успешны прогнозы в Беринговом море, море Лабрадор/Баффиновом заливе и Баренцевом море.

В военно-морском флоте США с 2013 года действует система ACNFS (Arctic Cap Nowcast/Forecast System), в которой в качестве модели морского льда используется модель CICE версии 4.0, связанной с гибридной координатной моделью океана HYCOM. Ежедневно выпускаются прогнозы на 7 дней арктического морского льда [13]. Прогнозы включают сплоченность и толщину льда, скорость дрейфа льда, температуру, соленость и течения на поверхности моря. Оценки прогнозов сплоченности льда сосредоточены на областях, где сплоченность изменяется за неделю на 65 % или более, и поэтому ограничены в основном пограничной ледовой зоной.

В ACNFS модель CICE и модель океана HYCOM имеют двустороннюю связь через платформу Earth System Modeling Framework. Модели CICE и HYCOM запускаются индивидуально и обмениваются данными каждый модельный час. Толщина льда, потоки и напряжения передаются

в HYCOM из CICE, в то время как температура, соленость и течения на поверхности моря передаются из HYCOM в CICE. Атмосферное воздействие для ACNFS обеспечивается глобальной атмосферной моделью NAVGEM с разрешением $0,28^\circ$ и включает с дискретностью 3 часа температуру воздуха на 2 м, влажность, коротковолновое и длинноволновое излучение, осадки, зональную и меридиональную скорости ветра на 10 м, среднее давление на уровне моря и точку росы. Прогнозы за период с февраля 2014 по июнь 2015 года показали удовлетворительное качество на срок до 102 ч. Прогностическая кромка льда, определяемая как сплоченность 5 %, сравнивалась с независимо полученными данными. Анализ проводился для семи районов. Наилучший результат был получен для Баренцева моря, где ошибка в положении кромки льда при прогнозе на 6 ч составляла до 30 км, при прогнозе на 126 ч – до 40 км. Хуже всего результат оказался для Канадского архипелага, где ошибка в положении кромки льда при прогнозе на 6 ч составляла до 60 км, при прогнозе на 126 ч – до 80 км.

Разработанная для ледовых прогнозов Метеослужбы Великобритании (Met Office) система FOAM (Forecast Ocean Assimilation Model) включает модель CICE для определения пространственной и временной эволюции распределения толщины льда за счет адвекции, термодинамического роста, таяния и др. В каждой точке сетки модели ледяной покров разделен на пять категорий толщины (нижние границы: 0; 0,6; 1,4; 2,4; 3,6 м) [10]. Термодинамический рост и таяние морского льда рассчитываются с использованием термодинамической модели нулевого слоя с одним слоем льда и одним слоем снега, а динамика льда рассчитывается с использованием упруго-вязко-пластической реологии. Результаты расчетов для Арктики указывают на хорошее совпадение осредненных за 50-летний период моделирования значений сплоченности и толщины льда с эквивалентными 11-летними данными наблюдений в марте и сентябре 1995–2004 гг. [16].

Модель CICE, адаптированная для трехполярной вычислительной сетки типа ORCA025, была применена также и в модели океана NEMO со связью NEMO-CICE [15], обеспечивающей формирование в NEMO необходимых приземных метеорологических данных и последующее обращение к CICE. Качество ледовых прогнозов в данном случае оценивалось с учетом площади льда, т. е. общей площади всех точек сетки океана со сплоченностью льда не менее 15 %. Результаты показывают, что эволюция прогнозируемой площади льда в целом соответствует фактической, однако модель занижает скорость таяния льда в июле и завышает скорость нарастания в январе, при этом прогнозы для апреля и октября показывают хорошее согласие с анализом.

Широкое использование модели CICE вызвано тем, что она является вычислительно эффективной для моделирования роста, таяния и движения морского льда, а также благодаря ее обширной пользовательской базе

и документации. Модель CICE используется более чем в 20 странах для исследования ледовых процессов и их взаимодействия с климатической системой в моделях из проектов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), а также в оперативных прогнозистических центрах различных стран. Доступные в свободном доступе версии пакета CICE реализованы на языке Fortran90 и адаптированы для работы на вычислительных платформах, использующих MPI и OpenMP параллельные вычисления в среде UNIX\Linux операционных систем. В [17] приведены результаты инициированной консорциумом CICE независимой оценки качества пяти различных применений (автономная (standalone) и совместная (coupled)) модели CICE, включая бета-версию последнего 6-го пакета, тестирование которого выполнено на 17-летних данных NCEP CDAS/cfsV2 атмосферного форсинга [19] начиная с 1 октября 1998 г. По результатам тестирования программные пакеты CICE были сертифицированы для свободного распространения в научном сообществе.

Модификация модели CICE для расчета характеристик ледяного покрова Каспийского моря

В отличие от широкого использования CICE в совместных моделях океан – атмосфера и региональной практики ее применения, рассмотренной в [2], для моделирования характеристик ледяного покрова в Северном Каспии на базе пакета CICE-v6.3.1 [12], сформирована версия автономной прогностической модели с биполярной ортогональной расчетной сеткой [11, 18] и анизотропной упруго-вязко-пластической реологией [14]. Такой подход позволяет выполнять численные эксперименты с использованием обширного тестового архива консорциума CICE, включающего следующие глобальные данные:

- батиметрию морского дна;
- среднемесячные значения температуры воды, солёности и течений;
- 3-часовые данные реанализа JRA55 [21] с 2005 по 2009 г. для потоков коротковолновой и длинноволновой радиации;
- направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

В статье используется конфигурация CICE с сеткой «gx1», которая включает:

- размеры сетки (320×384 , $1 \times 1^\circ$),
- ориентацию границ (юг-север, запад-восток),
- области расчета и граничные условия (глобус).

Начальные данные «iced_gx1_v5.nc» задают:

- солёность Каспия – 34 промилле,
- среднемесячные значения температуры воды.

Упруго-вязко-пластичная реология рекомендована ВМО для расчета динамики ледяного покрова под влиянием атмосферного форсинга.

В отличие от гидродинамических моделей, например INMOM, расчеты по используемой в CICE упруго-вязко-пластичной модели льда менее критичны к размерам сетки и позволяют (условие Куранта) шаг интегрирования по времени 1 час, что и подтвердили результаты расчетов для Каспийского моря.

Следует отметить, что в период 2005–2009 гг. в северо-восточной части Каспийского моря наблюдались как различные сроки начала формирования льда и продолжительности ледового периода, так и существенные колебания максимальной толщины льда, что позволяет оценить возможности адекватного учета в CICE межгодовых колебаний метеорологического форсинга при прогнозе ледовой обстановки для морей неарктической зоны. Ниже в табл. 1 приведены характеристики ледяного покрова для района пункта Большой Пешной (52° с. ш., 46.5° в. д.). Все характеристики ледяного покрова Каспийского моря, так же как карты ледовой обстановки, взяты из ледового архива отдела морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России».

Таблица 1. Продолжительность ледового сезона (дни) и толщина льда (см) в районе пункта Большой Пешной в 2005–2009 гг.

Table 1. The duration of the ice season (days) and the ice thickness (cm) in the area of the Bolshoi Peshnoi point in 2005–2009

Сезон	Ледовый сезон	Декабрь	Январь	Февраль	Март
2005/2006	90	Нет данных	10–26	16–26	Нет данных
2006/2007	113	6–12	8–15	8	8
2007/2008	132	5–17	29–45	51–60	42
2008/2009	109	5–18	22–23	20–21	18

В процессе конфигурации модели использовались в основном рекомендованные параметры за исключением следующих:

- 360 дней в году и 12 месяцев по 30 дней;
- заблаговременность прогноза – 180 дней начиная с 1 ноября;
- временной шаг осреднения результатов расчетов – 10 дней;
- значение солёности, равное 34 промилле;
- начальные данные – комплект 'iced_gx1_v5.nc'.

Последний параметр вынужденный, поскольку используемый в модели метод расчета начальных значений температуры воды, основанный на ее среднемесячных значениях, в аномальных, с точки зрения метеорологического форсинга, годах приводил к существенному – от 20 до 35 дней – смещению сроков начала формирования льда ввиду значительных отклонений начальных значений температуры воды от фактической

для данного года. Для согласования начальных данных температуры воды и воздуха была разработана внешняя интерактивная процедура коррекции с использованием метода прогонки. В дальнейшем, при использовании в качестве атмосферного форсинга метеорологических полей анализа и прогноза, коррекция начальных значений температуры воды будет выполняться в модели на основе характеристик подстилающей поверхности.

Результаты моделирования характеристик ледяного покрова в Северном Каспии

Расчеты проводились для района вблизи острова Большой Пешной как наиболее презентативного для ледовых условий Северного Каспия [6]. Одними из рассчитываемых характеристик являлись даты образования льда и очищения моря ото льда. По многолетним наблюдениям, наиболее ранней датой ледообразования в этом районе является 17.10.1976 г., а наиболее поздней – 28.12.2005 г., наиболее ранняя дата очищения – 1.03.2002 г., а наиболее поздняя – 21.04.1956 г. [4]. Разность между датами образования и очищения считается продолжительностью ледового сезона. Для рассматриваемого района наименьшая продолжительность (83 дня) была в сезоне 2003/2004 гг., а наибольшая (148 дней) – в сезоне 1993/1994 гг. [4].

Качество моделирования оценивалось путем сравнения рассчитанных и фактических дат замерзания и очищения, а также величин и дат формирования максимальной толщины льда (табл. 2).

Таблица 2. Рассчитанные и фактические характеристики ледяного покрова для пункта Большой Пешной в 2005–2009 гг.

Table 2. Calculated and actual characteristics of the ice cover for the Bolshoi Peshnoi point in 2005–2009

Период наблюдения		Характеристика ледяного покрова		
		Дата замерзания	Дата очищения	Максимальная толщина (см) и дата
2005/2006	Расчет	1.01.2006	8.04.2006	30–32 (18.01.2006)
	Факт	28.12.2005	4.04.2006	26 (21–30.01.2006)
2006/2007	Расчет	18.12.2006	8.04.2007	25 (1.03.2007)
	Факт	20.12.2006	24.03.2007	15 (1–10.01.2007)
2007/2008	Расчет	13.12.2007	17.04.2008	45–47 (1.03.2008)
	Факт	13.11.2007	25.03.2008	60 (11–20.02.2008)
2008/2009	Расчет	18.12.2008	5.04.2009	27–28 (18.01.2009)
	Факт	19.12.2008	27.03.2009	21 (1–10.02.2009)

Даты замерзания и очищения в табл. 2 определялись по расчетам сплоченности льда. В трех случаях (2005, 2006 и 2008 гг.) даты замерзания были рассчитаны успешно (ошибка составила 1–4 дня), а в 2007 г. замерзание произошло ранее расчета на 30 дней. Во всех случаях очищение произошло ранее расчета на срок от 4 дней в 2006 г. до 24 дней в 2008 г. В качестве примера успешного определения даты замерзания на рис. 1 представлен расчет изменения сплоченности в сезон 2008–2009 годов.

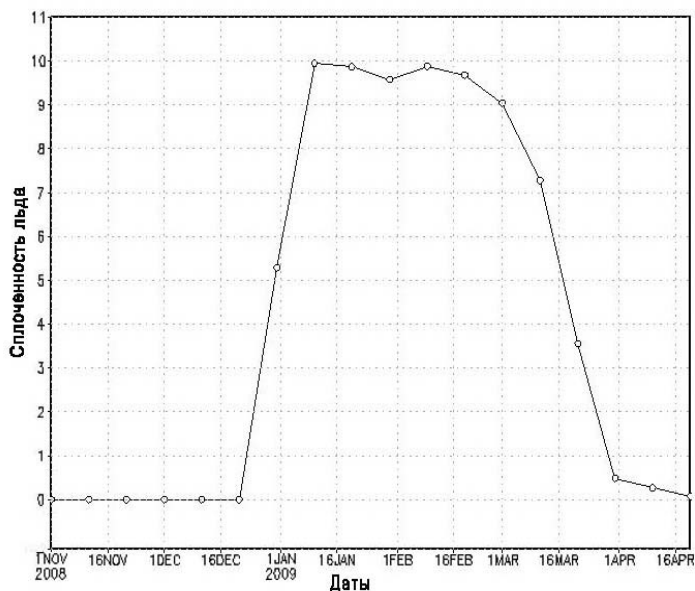


Рис. 1. Расчет сплоченности льда (баллы) в зимний сезон 2008/2009 гг.

Fig. 1. Calculation of ice concentration (points) in the winter season of 2008/2009.

Данные о фактической толщине льда имелись только по декадам. Наибольшие отличия в величине максимальной толщины и дате формирования относятся к январю–марту 2007 г., когда толщина льда была наименьшей (15 см) из четырех сезонов (по расчету 25 см). В то же время в феврале 2008 г., когда толщина была наибольшей из четырех сезонов (60 см), расчет по модели можно признать удовлетворительным как по толщине (47 см), так и по дате формирования (рис. 2). Рассчитанное распределение ледяного покрова в Северном Каспии в этот период в общих чертах похоже на анализ ледовой обстановки, полученный на основе спутниковой информации (рис. 3). Более качественного совпадения трудно ожидать, поскольку атмосферный форсинг в расчетах основан на сглаженных полях реанализа [21].

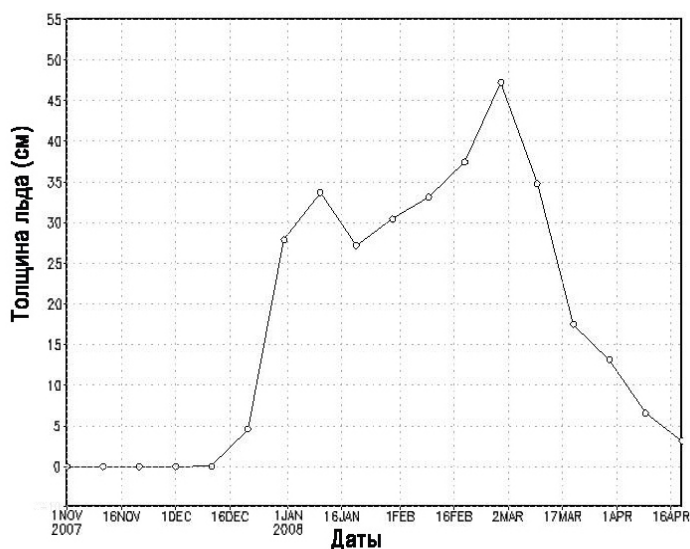


Рис. 2. Расчет толщины льда (см) в зимний сезон 2007/2008 гг.

Fig 2. Calculation of ice thickness (cm) in the winter season of 2007/2008.

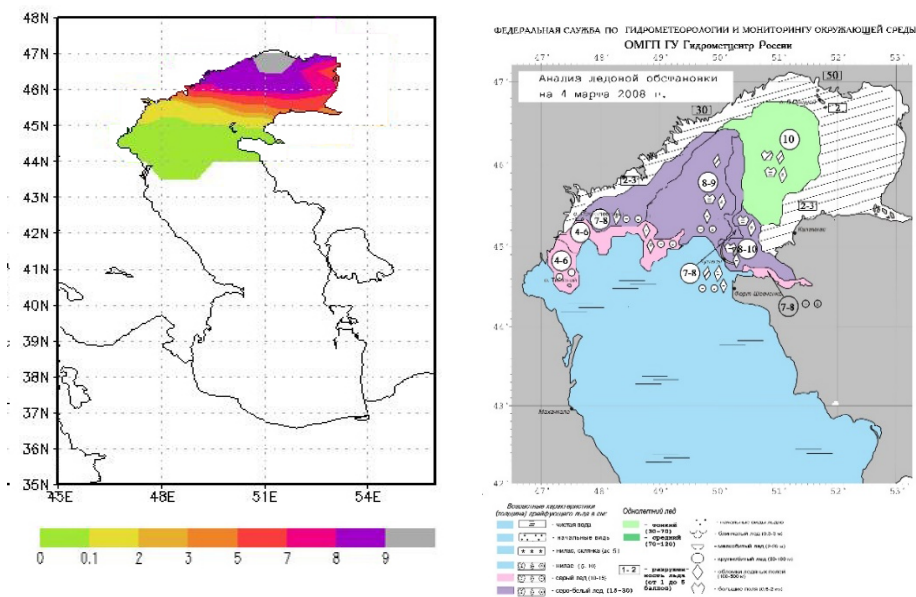


Рис. 3. Расчет сплоченности льда (баллы) в Северном Каспии

на 1–10.03.2008 г. (слева) и анализ ледовой обстановки в Северном Каспии 4.03.2008 г. (справа).

Fig. 3. Calculation of ice concentration (points) in the Northern Caspian on March 1-10, 2008 (left) and analysis of the ice situation in the Northern Caspian 4.03.2008 (right).

Заключение

На основе численных экспериментов с моделью CICE, версия V6.3.1 которой интегрирована в программную среду суперкомпьютера Скау-ХС40 Росгидромета, показано, что модель CICE с биполярной ортогональной расчетной сеткой и анизотропной упруго-вязко-пластической реологией удовлетворительно воспроизводит межгодовые колебания характеристик ледовой обстановки для морей неарктической зоны.

Для оценки возможности использования модели CICE в оперативной практике выполнены расчеты с использованием в качестве атмосферного форсинга полей реанализа [21]. Для периода декабрь–апрель 2005–2009 гг. рассчитывались значения сплоченности льда (по которым определялись даты замерзания и очищения моря ото льда) и толщины льда.

Сравнение результатов расчета с данными наблюдений вблизи острова Большой Пешной показало, что модель удовлетворительно воспроизводит процессы нарастания и таяния льда, хотя в некоторые годы имеются существенные расхождения между рассчитанными и фактическими датами замерзания и очищения моря ото льда. Следует отметить хорошее совпадение результатов расчета максимальной толщины льда с данными наблюдений.

На следующем этапе подготовки модели к оперативному применению планируется адаптация CICE для расчета ледовой обстановки на период 10–15 суток с использованием фактических начальных полей и детализированного атмосферного форсинга.

Список литературы

1. Бухарицин П.И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря: Автореф. дис. к. г. н. Л.: ААНИИ, 1986. 20 с.
2. Вражский А.Н. Среднесрочный прогноз ледовой обстановки Берингова моря // Известия ТИНРО. 2020. Т. 200, вып. 1. С. 131–140.
3. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 64–77.
4. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
5. Лобанов В.А., Наурызбаева Ж.К. Климатические изменения толщины льда на северном Каспии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 172–187.
6. Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А. Методика краткосрочного прогнозирования нарастания толщины льда в северо-восточном секторе Каспийского моря // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 81–97.
7. 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.
8. Фомин В. В., Панасенкова И.И., Гусев А.В., Чаплыгин А.В., Дианский Н.А. Система оперативного моделирования Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской модели INMOM-Арктика //

Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 2. С. 205-218. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218 [in Russ.].

9. Яковлев Н. Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948-2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 1-16.

10. Blockley E.W., Martin M.J., McLaren A.J., Ryan A.G. et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new global FOAM forecasts // Geosci. Model Dev. 2014. Vol. 7. P. 2613-2638. DOI: 10.5194/gmd-7-2613-2014.

11. Bouillon S. et al. An elastic-viscous-plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids // Ocean Modelling. 2009. T. 27, №. 3-4. С. 174-184.

12. CICE Documentation 2021. <https://github.com/CICE-Consortium/>

13. Hebert D.A., Allard R.A., Metzger E.J., Posey P.G. et al. Short-term sea ice forecasting: an assessment of ice concentration and ice drift forecasts using the U.S. Navy's Arctic Cap Nowcast/Forecast System // J. Geophys. Res. Oceans. 2015. Vol. 120. P. 8327-8345. DOI: 10.1002/2015JC011283

14. Hunke E. C. et al. The multiphase physics of sea ice // Sea. 2011. Vol. 5. P. 1949-1993.

15. Massonnet F. et al. On the influence of model physics on simulations of Arctic and Antarctic sea ice // The Cryosphere. 2011. Vol. 5, №. 3. P. 687-699.

16. Rae J.G.L., Hewitt H.T., Keen A.B., Ridley J.K. et al. Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model // Geosci. Model Dev. 2015. Vol. 8. P. 2221-2230.

17. Roberts A.F. et al. Quality control for community-based sea-ice model development // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2018. Vol. 376, №. 2129. P. 20170344.

18. Ross J.M. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models // J. Computational Physics. 1996. Vol. 126. P. 251-273.

19. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system version 2 // J. Clim. 2014. Vol. 27. P. 2185-2208.

20. Smith G.C., Roy F., Reszka M., Surcel D. et al. Sea ice forecast verification in the Canadian global ice ocean prediction system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2016. Vol. 142. P. 659-671. DOI:10.1002/qj.2555

21. Tsujino H. et al. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do) // Ocean Modelling. 2018. Vol. 130. P. 79-139.

22. Zampieri L., Kauker F., Fröhle J., Sumata H., Hunke E.C., Goessling H.F. Impact of sea-ice model complexity on the performance of an unstructured-mesh sea-ice/ocean model under different atmospheric forcings // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2021. Vol. 13. e2020MS002438. <https://doi.org/10.1029/2020MS002438>

References

1. Buharicin P.I. Osobennosti ledovogo rezhima i metody prognoza ledovykh usloviy severnoy chasti Kaspiyskogo morya: Avtoref. dis. k. g. n. L.: AANII, 1986. 20 p. [in Russ.].

2. Vrazhkin A.N. Mid-term forecast for the ice conditions in the Bering Sea. *Izvestiya TINRO*, 2020, vol. 200, no. 1, pp. 131-140. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-131-140 [in Russ.].

3. Dumanskaya I.O. On the method of long-range forecasting of ice conditions in the European seas of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 11, pp. 747–757. DOI: 10.3103/S1068373911110069.
4. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morey evropeyskoy chasti Rossii. M., Obninsk: IG-SOCIN publ., 2014, 608 p. [in Russ.].
5. Lobanov V.A., Naurozbaeva Zh.K. Klimaticheskie izmeneniya tolshchiny l'da na severnom Kasp'ii. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2018, no. 53, pp. 172–187 [in Russ.].
6. Naurozbayeva Z. K., Lobanov V. A. Methods of short-term forecasting of ice thickness growth in the north-eastern part of Caspian sea. *Geograficheskiy vestnik [Geographical Bulletin]*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 81–97 [in Russ.].
7. Fomin V.V., Diansky N.A., Korshenko E.A., Vyruchalkina T. Yu. 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, pp. 639–649. DOI: 10.3103/S1068373920090058.
8. Fomin V.V., Panasenkov I.I., Gusev A.V., Chaplygin A.V., Diansky N.A. Operational forecasting system for Arctic Ocean using the Russian marine circulation model INMOM-Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 205–218. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-205-218 [in Russ.].
9. Yakovlev N.G. Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic ocean in 1948–2002: Part I. Numerical model. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2009, vol. 45, no 3, pp. 357–371. DOI: 10.1134/S0001433809030098.
10. Blockley E.W., Martin M.J., McLaren A.J., Ryan A.G. et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new global FOAM forecasts. *Geosci. Model Dev.*, 2014, vol. 7, pp. 2613–2638. DOI: 10.5194/gmd-7-2613-2014.
11. Bouillon S. et al. An elastic–viscous–plastic sea ice model formulated on Arakawa B and C grids. *Ocean Modelling*, 2009, vol. 27, no. 3–4, pp. 174–184.
12. CICE Documentation 2021. Available at: <https://github.com/CICE-Consortium/>
13. Hebert D.A., Allard R.A., Metzger E.J, Posey P.G. et al. Short-term sea ice forecasting: an assessment of ice concentration and ice drift forecasts using the U.S. Navy's Arctic Cap Nowcast/Forecast System. *J. Geophys. Res. Oceans.*, 2015, vol. 120, pp. 8327–8345. DOI: 10.1002/2015JC011283
14. Hunke E. C. et al. The multiphase physics of sea ice. *Sea*, 2011, vol. 5, pp. 1949–1993.
15. Massonnet F. et al. On the influence of model physics on simulations of Arctic and Antarctic sea ice. *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 687–699.
16. Rae J.G.L., Hewitt H.T., Keen A.B., Ridley J.K. et al. Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model. *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, pp. 2221–2230.
17. Roberts A.F. et al. Quality control for community-based sea-ice model development. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018, vol. 376, no. 2129, pp. 20170344.
18. Ross J.M. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models. *J. Computational Physics*, 1996, vol. 126, pp. 251–273.

19. Saha S. et al. The NCEP climate forecast system version 2. *J. Clim.*, 2014, vol. 27, pp. 2185-2208.

20. Smith G.C., Roy F., Reszka M., Surcel D. et al. Sea ice forecast verification in the Canadian global ice ocean prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2016, vol. 142, pp. 659-671. DOI:10.1002/qj.2555.

21. Tsujino H. et al. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modelling*, 2018, vol. 130, pp. 79-139.

22. Zampieri L., Kauker F., Fröhle J., Sumata H., Hunke E.C., Goessling H.F. Impact of sea-ice model complexity on the performance of an unstructured-mesh sea-ice/ocean model under different atmospheric forcings. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, vol. 13, e2020MS002438. DOI: 10.1029/2020MS002438

Поступила 17.02.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 17.02.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-71-88>

УДК 551.461:551.468(265.51)

Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря

Ю.В. Любичский, С.О. Романский

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия
yuvadlub@gmail.com*

Рассмотрены основные характеристики метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря. Пространственно-временные вариации сгонно-нагонной составляющей уровня моря в пределах Берингова моря и прилегающих к нему районов рассчитываются по двумерной численной гидродинамической модели совместной динамики воды и льда. Форсинг модели реализуется с помощью полей приземного атмосферного давления и ветра, прогнозируемых в рамках атмосферной модели WRF-ARW. Прилив вычисляется только в береговых пунктах, для которых выпускается прогноз, по гармоническим постоянным 11 основных волн. Информация о распределении ледяного покрова в пределах рассматриваемого объекта формируется по данным Global Forecast System. Технологическая линия метода прогноза работает в автоматическом режиме. Результаты сравнения рассчитанных прогнозов с данными наблюдений автоматизированных постов службы цунами Никольское, Оссора, Корф (Тиличики) свидетельствуют о соответствии разработанного метода прогноза требованиям руководящих документов Росгидромета.

Ключевые слова: метод прогноза, уровень моря, Берингово море, численная гидродинамическая модель, сгонно-нагонные явления, прилив, ледяной покров, оценки качества прогнозов

Method and technology of short-term forecasting of sea level variations in the southwestern Bering Sea

Yu. V. Lyubitskiy, S. O. Romanskiy

*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research
Institute, Vladivostok, Russia
yuvadlub@gmail.com*

The main characteristics of the method to forecast sea level with a lead time of 72 hours for the southwestern part of the Bering Sea are considered. Spatiotemporal variations in storm surges within the Bering Sea and adjacent areas are calculated using a two-dimensional numerical hydrodynamic model of the coupled water and ice dynamics. The model forcing is implemented using the data on surface air pressure and wind, which are predicted by the WRF-ARW atmosphere model. Tidal elevations are calculated only

at coastal points, 11 major tidal harmonic constituents are used. Information about the distribution of the ice cover within the study object is formed based on the Global Forecast System data. A technological line of the forecasting method operates in automatic mode. The results of the comparison of sea level forecasts and observations at Nikol'skoye, Ossora, and Korf (Tilichiki) tide gages indicate that the developed forecast method complies with the requirements of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet).

Keywords: forecast method, sea level, Bering Sea, numerical hydrodynamic model, storm surge, tide, ice cover, forecast skill scores

Введение

Для реализации эффективной и безопасной морской деятельности на побережье и акватории морей и океанов требуется информация об ожидаемых характеристиках гидрометеорологических явлений [1, 4]. Особую важность имеют прогнозы опасных природных явлений (ОЯ), которые вызывают существенный материальный ущерб и могут угрожать жизни людей.

В данной статье рассмотрены основные структурные блоки и технологическая линия метода краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря, разработанного в ФГБУ «ДВНИГМИ». Эти прогнозы необходимы для обеспечения работы грузопассажирского и рыболовного флота, успешной эксплуатации береговых объектов.

Следует отметить, что на побережье юго-западной части Берингова моря часто возникают опасные нагонные явления, во время которых затопляются населенные пункты, транспортные коммуникации и сооружения.

Во время штормового нагона 17–19 ноября 1981 г. в п. Анапка были затоплены лодочная станция и жилые постройки, в п. Корф разрушены два дома, залит склад рыбокооп.

15–16 декабря 2008 г. подтоплены населенные пункты Корф, Ивашка и Вывенка. В поселке Корф затопило восемь жилых домов, туберкулезный диспансер, три трансформаторные подстанции, котельную. В селе Ивашка были повреждены 13 жилых домов, один из которых стал непригодным для проживания, во многих домах залило подвалы. В Корфе и Ивашке частично было эвакуировано население.

В Никольском (о. Беринга) во время штормов регулярно затопляется пирс зверокомбината.

Следовательно, задача разработки и внедрения в оперативную практику учреждений Росгидромета метода краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря является весьма актуальной.

Основные характеристики метода прогноза

В рамках разработанного метода прогноза для расчета пространственно-временных колебаний сгонно-нагонной составляющей уровня моря используется численное гидродинамическое моделирование. Данный подход успешно применяется во многих современных методах краткосрочного прогноза уровня моря [8–10, 13, 16].

Для обеспечения корректного учета влияния ледяного покрова на процессы формирования сгонно-нагонных явлений используется двумерная нелинейная численная гидродинамическая модель совместной динамики воды и льда [2, 6]. Касательные напряжения на границах разделов воздух – вода, воздух – лед, лед – вода, вода – дно вычисляются по квадратичным зависимостям. Силы внутреннего взаимодействия ледяного покрова учитываются с помощью приближения, предложенного в [2].

Для численной аппроксимации уравнений модели используется явная конечно-разностная схема, реализованная на сетке типа «С» по классификации Аракавы.

Сеточная область численной модели с пространственным шагом 7,5 км включает акватории Берингова моря, прилегающих к нему районов Тихого океана и Чукотского моря (рис. 1). Выбор столь обширного объекта позволяет, во-первых, корректно задать условия на жидких границах сеточной области, во-вторых, в перспективе, при некотором усовершенствовании метода (например, детализации сетки в Анадырском заливе), предусмотреть выпуск прогнозов уровня моря и для побережья Чукотки. В соответствии с критерием Куранта – Фридрихса – Леви шаг по времени составляет 12 секунд.

На твердых границах сеточной области модели нормальные к ним компоненты скорости течения и дрейфа льда принимаются равными нулю. На жидких границах сеточной области для льда применяется условие свободного протекания, для воды учитываются два условия: импедансное и гидростатического изменения уровня моря по «закону обратного барометра» в результате вариаций приземного атмосферного давления относительно их средних месячных значений, рассчитанных для интервала времени с 1993 по 2017 год (данный подход позволяет в первом приближении воспроизводить сезонный (годовой) ход уровня моря).

В качестве начальных условий при расчете сгонно-нагонных колебаний уровня моря используются поля уровня моря и течений, рассчитанные в рамках предшествующего сеанса прогноза для заблаговременности 12, 24, 36 или 48 ч. Выбор полей для выполняемого расчета определяется наличием пропусков предыдущих прогнозов: если таких пропусков не было, учитывается информация для заблаговременности 12 ч, если пропущен один прогноз – для заблаговременности 24 ч и т. д. В ситуациях, когда не рассчитаны более трех последовательных прогнозов, расчет очередного прогноза выполняется при нулевых начальных условиях.

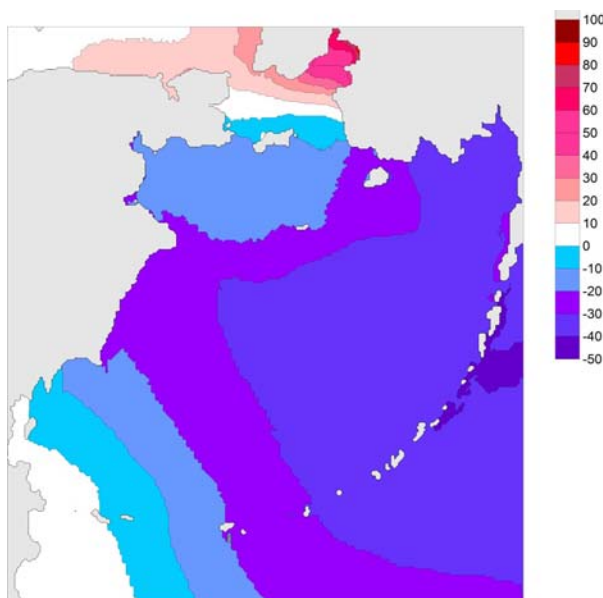


Рис. 1. Прогнозируемые сгонно-нагонные уровни моря в 00 ч ВСВ 14.01.2020 г. (прогноз от 12 ч ВСВ 11.01.2020 г.), см.

Fig. 1. Forecasted storm surge heights at 00.00 UTC 2020-01-14 (initial time of the forecast is 12.00 UTC 2020-01-11), cm.

Для форсинга численной модели, применяемой для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня моря, используется прогностическая продукция (поля ветра на высоте 10 м и приземного атмосферного давления на уровне земли) региональной атмосферной модели WRF-ARW [17] с пространственным шагом 15 км [3]. Для построения сетки модели WRF-ARW использована равноугольная коническая проекция Ламберта. В целях экономии вычислительных ресурсов сетки обеих моделей сопряжены между собой. Значения метеорологических характеристик вводятся в модель для расчета уровня моря с дискретностью, равной одному часу. Для их получения в узлах расчетной сетки применяется линейная интерполяция.

Сведения о распределении ледяного покрова в пределах сеточной области модели формируются по данным Global Forecast System.

Численная модель, используемая в разработанном методе прогноза для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня моря, при задании на жидких границах сеточной области гармонических постоянных уровня и средних по глубине скоростей течений основных волн прилива [14] позволяет успешно воспроизводить пространственно-временные вариации суммарного уровня моря и его приливной составляющей [7]. Тем не менее для экономии вычислительных ресурсов прилив (соответственно,

и суммарный уровень моря) вычисляется только в восьми береговых пунктах, для которых выпускается прогноз (рис. 2). При этом используются рассчитанные заранее по материалам наблюдений гармонические постоянные одиннадцати основных волн прилива (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4 , MS_4 , M_6). Для пунктов Никольское и Корф (Тиличики) (рис. 2) учитывается сезонная изменчивость гармонических постоянных.

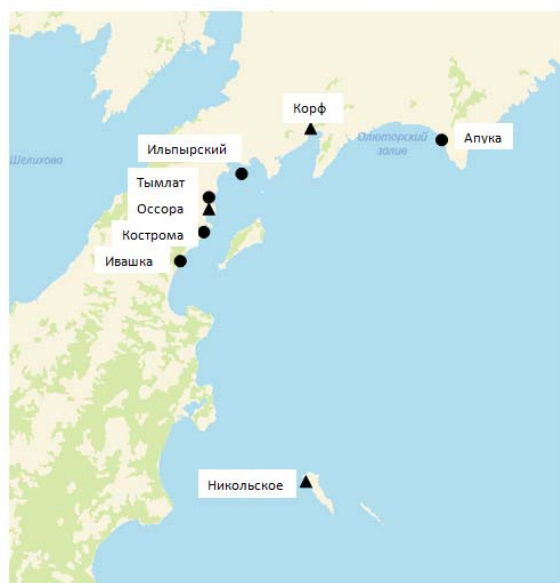


Рис. 2. Пункты, для которых рассчитывается прогноз суммарного уровня моря (треугольники – станции, где выполняются наблюдения над уровнем моря).

Fig. 2. The points at which the total sea level is forecasted (triangles represent the tide gauges).

Технологическая линия метода прогноза

Технологическая линия метода прогноза реализована на вычислительном комплексе CRAY XC-40 Регионального вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и работает в автоматическом режиме.

Заблаговременность прогноза составляет до 72 ч. Прогноз рассчитывается два раза в сутки от сроков 00 и 12 ч ВСВ.

Во время каждого сеанса прогноза выполняется следующая последовательность действий.

1. После завершения работы региональной атмосферной модели WRF-ARW формируется файл с ежечасными прогнозируемыми значениями направления и скорости ветра на высоте 10 м и приземного атмосферного давления в узлах сетки данной модели.

2. С сайта <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/> загружается информация о распределении и сплоченности ледяного покрова в северной части Тихого океана и в Чукотском море с разрешением 0,25 градуса. Файл с этой информацией сохраняется на локальном сервере для возможности его использования в дальнейшем, если в последующих сеансах прогноза уровня моря при передаче ледовых данных по сети Интернет произойдет сбой.

3. Перед стартом расчета из файлов считываются константы, используемые в модели: гармонические постоянные основных волн прилива в береговых пунктах, значения параметра Кориолиса в узлах расчетной численной сетки, средние за многолетний период месячные значения приземного атмосферного давления в узлах жидких границ сеточной области и ряд других характеристик.

4. Из архивных файлов предыдущего сеанса прогноза считываются поля сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря и течений, которые используются в качестве начальных данных при расчетах по численной модели в текущем сеансе прогноза.

5. Информация о состоянии ледяного покрова и значения метеорологических характеристик интерполируются в узлы сеточной области модели для расчета сгонно-нагонной составляющей уровня моря. Приземное атмосферное давление приводится к уровню моря.

6. По дате и времени выпуска прогноза вычисляются астрономические характеристики [15]: средняя долгота Солнца, средняя долгота Луны, средняя долгота перигея лунной орбиты, долгота восходящего узла лунной орбиты. Эти значения используются для вычисления редуцированных множителей и астрономических частей фаз основных волн прилива.

7. По гармоническим постоянным волн прилива и значениям астрономических характеристик рассчитывается приливная составляющая суммарного уровня моря в береговых пунктах.

8. Выполняется расчет пространственно-временных изменений сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря по численной модели. В процессе вычислений на дисковой полке вычислительного комплекса сохраняются поля уровня моря и течений с заблаговременностью прогноза 12, 24, 36 и 48 ч, которые будут использованы в последующих сеансах прогноза в качестве начальных условий.

9. Формируются и архивируются файлы с информацией об ожидаемых ежечасных значениях суммарного уровня моря, его сгонно-нагонной и приливной составляющих в восьми береговых пунктах, расположенных в юго-западной части Берингова моря, и в 134 дополнительных пунктах на побережье и акватории Берингова моря, прилегающих к нему районов Тихого океана и Чукотского моря. Первый файл автоматически передается по электронной почте в отдел морских прогнозов ФГБУ «Камчатское УГМС», второй используется для исследования особенностей и закономерностей возникновения и развития сгонно-нагонных колебаний уровня моря в пределах рассматриваемого объекта.

Технологическая линия метода прогноза работает в оперативном режиме с 1 октября 2020 г. Для оценки качества работы метода в квазиоперативном режиме (по прогностическим полям метеорологических характеристик и информации о состоянии ледяного покрова) дополнительно рассчитаны прогнозы изменений уровня моря для периода с января по сентябрь 2020 года.

С 1 января 2020 г. по 31 декабря 2021 г. по техническим причинам (в периоды плановых технологических работ на вычислительном комплексе) не были рассчитаны всего 10 прогнозов (0,7 % от общего числа возможных прогнозов), что свидетельствует о надежности и устойчивости работы технологической линии метода прогноза.

Оценка качества прогнозов

Наблюдения над уровнем моря в юго-западной части Берингова моря в настоящее время выполняются только на трех автоматизированных постах (АП) службы цунами Росгидромета: Никольское, Оссора и Корф (Тиличики) (см. рис. 2).

АП службы цунами производят измерения с минутной дискретностью. Для получения рядов ежечасных значений уровня моря, традиционно используемых для оценки точности прогнозов уровня моря, исходные ряды сглаживались с помощью треугольного фильтра Бартлетта с интервалом фильтрации 181 минута [5]. Данные измерений прошли детальный критический контроль с помощью методов, рассмотренных в [5].

Сведения о данных наблюдений, использованных для оценки качества прогнозов уровня моря, приводятся в табл. 1. Пропуски в наблюдениях продолжительностью менее пяти дней в этой таблице не указаны.

Таблица 1. Наблюдения над уровнем моря, использованные для оценки точности метода прогноза

Table 1. Sea level observations used to assess the accuracy of the forecasting method

Пункт	Период наблюдений
Никольское	1.01–27.10, 22.11–31.12.2020, 1.01–31.12.2021
Оссора	12.11–31.12.2020, 1–12.01, 17.01–5.03, 11–18.03, 24.03–24.04, 13–28.05, 4.06–30.08, 18.09–31.12.2021
Корф (Тиличики)	21.04–20.10, 30.10–31.12.2020, 1.01–31.12.2021

Данные наблюдений АП службы цунами не приводятся к нулям постов. Поэтому, чтобы исключить в первом приближении их искажение в результате изменения высотного положения измерительных датчиков и влияния ряда других причин, имеющих технический характер, при оценке

точности прогноза суммарного (наблюдаемого) уровня моря сравнивались отклонения данных измерений АП и прогнозируемых ежечасных уровней моря от их значений, средних для каждого месяца.

Точность прогнозов оценивалась с помощью статистических критериев, утвержденных действующими нормативными документами Росгидромета [11, 12].

При оценке оправдываемости морских прогнозов [12] величину допустимой ошибки прогноза рекомендуется рассчитывать по формуле $\delta_{\text{доп}} \leq 0,674\sigma_x$, где σ_x – среднеквадратическое отклонение данных наблюдений от их среднего значения.

В соответствии с этой формулой допустимая ошибка прогноза для Никольского составляет 24 см, Оссоры – 37 см, Корфа (Тиличиков) – 25 см. Тем не менее было решено использовать более «жесткие» критерии: для Никольского и Корфа (Тиличиков) допустимая ошибка прогноза принята равной 20 см, для Оссоры – 25 см.

Наблюденные значения суммарного уровня моря сравнивались с его прогнозируемыми значениями с заблаговременностью 24, 36, 48, 60 и 72 ч. Прогноз считался оправдавшимся, если его ошибка была меньше или равна допустимой ошибки $\delta_{\text{доп}}$.

Точность прогноза суммарных уровней моря в береговых пунктах достаточно высокая (табл. 2, рис. 3). Средняя оправдываемость прогнозов составляет от 93,9 % (Корф (Тиличики)) до 97,8 % (Никольское), средняя абсолютная ошибка прогноза не превышает 10,4 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – 13,3 см. Значение критерия S/σ_x находится в диапазоне 0,22–0,28. Это существенно меньше его порогового значения, равного 0,67, при количестве проверочных прогнозов большем или равном 25 [12].

Таблица 2. Характеристики качества прогнозов суммарного уровня моря
Table 2. Characteristics of the accuracy of the total sea level forecasts

Пункт	N	$\hat{\delta}$, см	δ , см	S , см	S/σ_x	P , %
Никольское	6858	0,3	6,5	7,7	0,22	97,8
Оссора	3204	–0,1	10,4	13,3	0,24	94,8
Корф (Тиличики)	5871	0,0	8,1	10,5	0,28	93,9

Примечание. N – количество сравниваемых наблюдавшихся и прогнозируемых значений уровня моря (заблаговременность прогноза 24, 36, 48, 60, 72 ч); $\hat{\delta}$ – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза; δ – средняя абсолютная ошибка прогноза; S – среднеквадратическая ошибка прогноза; σ_x – среднеквадратическое отклонение значений суммарного уровня моря по данным наблюдений; P – оправдываемость метода прогноза.

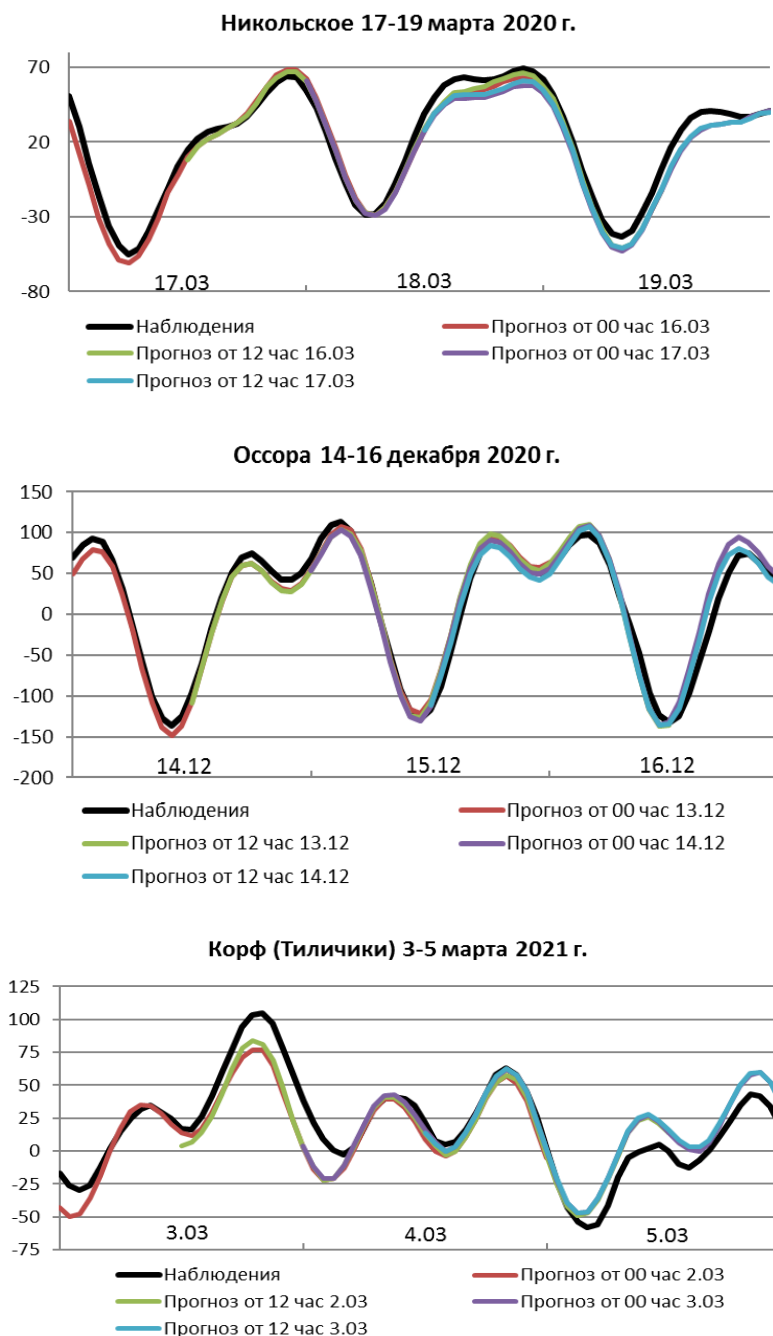


Рис. 3. Изменения суммарного уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений и результатам прогнозов во время штормовых нагонов, см
Fig. 3. Observed and forecasted total sea level variations at the tide gauges during the surges, cm

Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря в целом уменьшается при увеличении заблаговременности прогноза, но эти изменения относительно невелики (табл. 3). Увеличение оправдываемости в Оссоре при заблаговременности прогноза 72 ч, очевидно, имеет случайный характер.

Таблица 3. Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря при различной заблаговременности прогноза, %

Table 3. Accuracy of the total sea level forecasts for various leading time, %

Пункт	Заблаговременность прогноза, ч				
	24	36	48	60	72
Никольское	98,4	98,3	97,8	97,7	97,1
Оссора	95,6	95,3	94,5	93,8	94,9
Корф (Тиличики)	94,0	94,0	94,1	94,0	93,4
Средняя	96,0	95,8	95,5	95,1	95,1

Оправдываемость прогнозов уменьшается с ноября по март (табл. 4). Вероятно, при активизации циклонической деятельности над Беринговым морем в этот период, атмосферная модель, прогностическая продукция которой используется для форсинга численной модели для расчета стонно-нагонных колебаний уровня моря, не всегда адекватно воспроизводит поля ветра и атмосферного давления над морем. Например, на это указывает факт низкой оправдываемости прогнозов суммарных уровней моря в относительно недалеко расположенных друг от друга пунктах Оссора и Корф (Тиличики) в марте 2021 г. (85,3 и 82,3 % соответственно).

Таблица 4. Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря по месяцам, %

Table 4. Accuracy of the total sea level forecasts by months, %

Месяц	Пункт			Средняя
	Никольское	Оссора	Корф (Тиличики)	
Январь	96,2	91,6	95,7	94,5
Февраль	95,1	94,5	97,0	95,5
Март	96,5	85,3	82,3	88,0
Апрель	99,0	99,1	97,8	98,6
Май	100,0	97,9	88,0	95,3
Июнь	96,6	98,5	95,3	96,8
Июль	99,7	96,5	99,1	98,4
Август	99,9	100,0	99,7	99,8
Сентябрь	100,0	98,0	97,8	98,6
Октябрь	97,9	98,1	95,4	97,1
Ноябрь	97,5	91,7	87,7	92,3
Декабрь	94,8	91,9	89,2	92,0

В отдельные месяцы оправдываемость прогнозов суммарных уровней моря в Оссоре и Корфе (Тиличиках) может существенно отличаться (в мае 2021 г. – 97,9 и 84,3 % соответственно). Возможными причинами данной особенности могут быть локальные явления, которые не учитываются в разработанном методе прогноза (например, заторы льда, нарушающие водообмен между районом расположения АП службы цунами в Корфе (Тиличиках) и открытым морем), или погрешности в данных измерений АП, не выявленные при критическом контроле материалов наблюдений.

Высокая точность прогноза суммарных уровней моря в береговых пунктах во многом определяется надежностью расчета прилива (как указывалось ранее, для этого в методе прогноза используются гармонические постоянные одиннадцати основных волн, полученные заранее по данным наблюдений).

Поэтому отдельно оценивалось качество прогноза (расчета по численной модели) сгонно-нагонной (непериодической) составляющей уровня моря по прогнозируемым полям ветра и приземного атмосферного давления. Исходя из специфики наблюдений АП службы цунами, ежеhourные значения непериодической составляющей уровня моря для каждой сгонно-нагонной ситуации вычислялись в виде разностей между суммарными (наблюдавшимися) уровнями и приливом, рассчитанным методом наименьших квадратов [15], а также средним уровнем моря. Для каждой ситуации обрабатывался ряд измерений продолжительностью 31 сутки, центральная дата которого соответствовала времени формирования максимума нагона (сгона). Принятая длительность исходных рядов, при соблюдении критерия Релея, позволяет учесть при расчете приливной составляющей суммарного уровня моря 31 волну прилива [15].

Анализировались только ситуации, во время которых максимальная величина нагонов и сгонов была больше 30 см. Статистические характеристики качества расчетов вычислялись для периодов, когда значения непериодической составляющей уровня моря, полученные по данным наблюдений, по абсолютной величине превышали 25 см. На основании рассмотренной ранее методики определения величины допустимой ошибки прогноза, ее значение принималось равным: для нагонов в Никольском – 15 см, в Оссоре и Корфе (Тиличиках) – 19 см; для сгонов в Никольском – 15 см, в Оссоре и Корфе (Тиличиках) – 17 см.

Небольшое количество сгонов и нагонов в юго-западной части Берингова моря в 2020–2021 гг. не позволяет объективно рассмотреть изменения характеристик точности прогнозов сгонно-нагонных уровней моря в зависимости от заблаговременности прогноза. Поэтому при расчете этих характеристик каждое ежеhourное значение непериодической составляющей уровня моря, полученное по данным наблюдений, сравнивалось с соответствующими ему несколькими (от одного до пяти) уровнями, прогнозируемыми с различной заблаговременностью.

Установлено, что точность прогноза нагонов и сгонов с помощью разработанного метода удовлетворяет требованиям руководящих документов Росгидромета [11, 12] (табл. 5).

Таблица 5. Оценки точности прогноза нагонов и сгонов

Table 5. Accuracy of surge forecasts

Пункт	Количество нагонов (сгонов)	N	$\hat{\delta}$, см	δ , см	S , см	S / σ_x	P , %
Нагоны							
Никольское	7	384	-2,2	6,0	7,7	0,25	94,0
Оссора	7	938	-13,6	14,5	17,3	0,48	69,4
Корф (Тиличики)	9	788	-5,1	13,9	15,3	0,46	83,0
Сгоны							
Никольское	1	37	9,4	9,4	9,5	0,34	100,0
Оссора	3	284	9,9	10,6	12,0	0,37	89,8
Корф (Тиличики)	2	252	9,7	10,1	12,8	0,40	73,8

Примечание. N – количество сравниваемых значений уровня моря;

$\hat{\delta}$ – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза;

δ – средняя абсолютная ошибка прогноза; S – среднеквадратическая ошибка прогноза; σ_x – среднеквадратическое отклонение значений нагонов (сгонов) по данным наблюдений; P – оправдываемость метода прогноза.

Для нагонов оправдываемость прогнозов непериодической составляющей уровня моря составляет больше 69 процентов, отношение S / σ_x не превышает 0,48, средняя абсолютная ошибка прогноза находится в диапазоне 6,0–14,5 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – в интервале от 7,7 до 17,3 см (табл. 5).

Для сгонов оправдываемость прогнозов непериодической составляющей уровня моря превосходит 73 %, средняя абсолютная ошибка прогноза не превышает 10,6 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – 12,8 см, отношение $S / \sigma_x = 0,40$.

Наиболее высокую точность прогнозы нагонов и сгонов имеют в Никольском. Это объясняется небольшой шириной и приглубостью шельфа вблизи о. Беринга, в результате чего вариации приземного атмосферного давления, прогнозируемые с помощью атмосферной модели достаточно качественно, оказывают доминирующее влияние на процессы формирования сгонно-нагонных колебаний уровня моря в данном районе (табл. 5).

Рассчитанные прогнозы вполне удовлетворительно воспроизводят изменения сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря во времени (рис. 4).

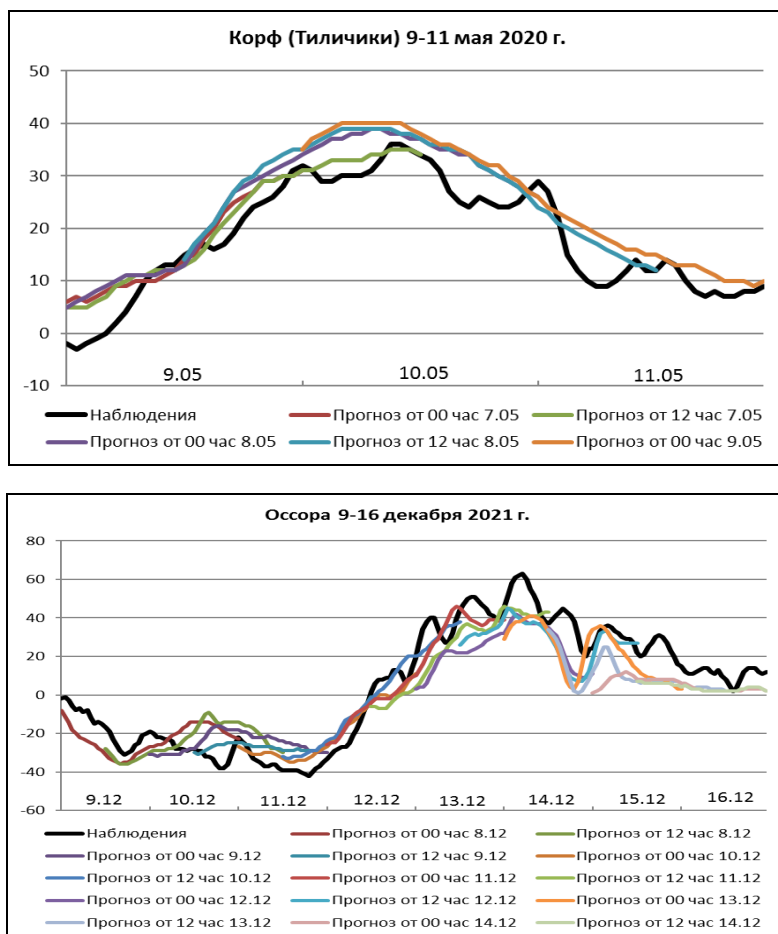


Рис. 4. Сгонно-нагонные колебания уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений и результатам прогнозов, см.

Fig. 4. Observed and forecasted surges at the tide gauges, cm.

Тем не менее следует отметить, что средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза значений непериодической составляющей уровня моря во время нагонов во всех пунктах отрицательна, а во время сгонов – положительна (см. табл. 5). Это указывает на то, что применяемая в рамках разработанного метода прогноза численная модель несколько занижает величину сгонно-нагонных колебаний уровня моря. Очевидно, это является следствием недостаточно подробного учета морфометрии моделируемого объекта, имеющей очень сложный характер. Следовательно, усовершенствование разработанного метода прогноза в первую очередь должно предусматривать детализацию сетки модели в прибрежных районах.

Для исследования причин не оправдавшихся прогнозов уровня моря, рассмотрим изменения сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря по данным наблюдений и результатам прогнозов в марте 2021 г. – в месяце, когда оправдываемость рассчитанных прогнозов была самой низкой в течение рассматриваемого интервала времени (рис. 5).

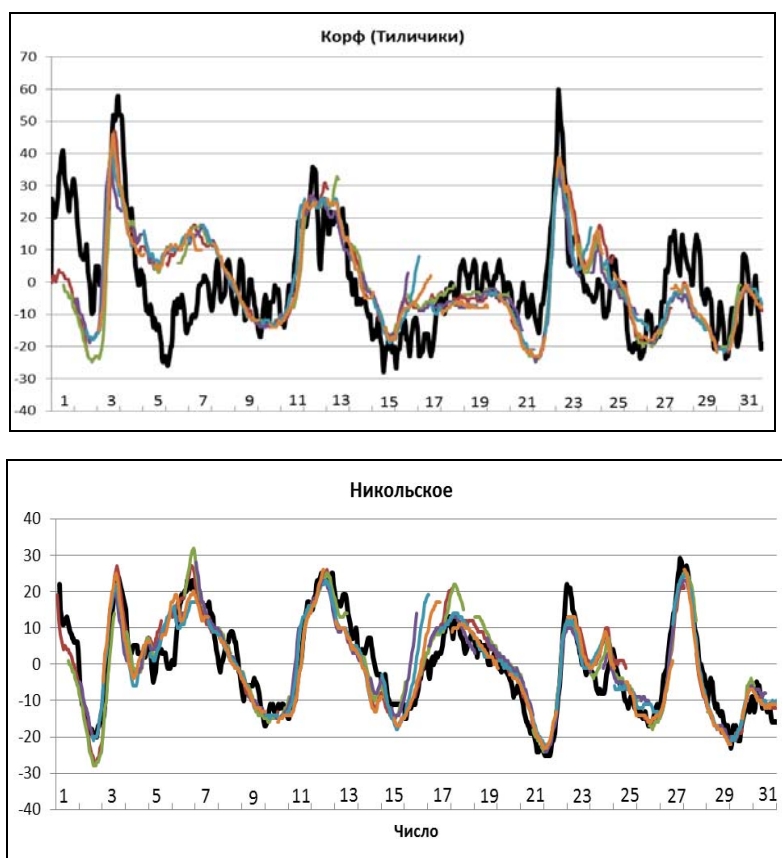


Рис. 5. Сгонно-нагонные колебания уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений (черные сплошные линии) и результатам прогнозов (цветные линии) в марте 2021 г., см.

Fig. 5. Observed (solid black lines) and forecasted (colored lines) surges at the tide gauges in March 2021, cm.

Очевидно, что основной причиной ухудшения качества прогнозов уровня моря в отдельные периоды является недостаточно высокая точность прогностических полей ветра и атмосферного давления, рассчитанных по атмосферной модели. Об этом наглядно свидетельствует низкая точность прогноза уровня моря 1–2 марта в Корфе (Тиличихах) и 16–17 марта в Корфе (Тиличихах) и Никольском (рис. 5).

Не исключено, что заметное различие между наблюдавшимися и прогнозируемыми уровнями моря в Корфе (Тиличиках) 5–8 марта может быть следствием возникновения ледовой пробки в проливе, соединяющем бухту Скрытную, где установлен АП службы цунами, и открытым морем.

Заключение

Метод краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря, разработанный в ФГБУ «ДВНИГМИ», обеспечивает качество прогнозов с точностью, соответствующей требованиям руководящих документов Росгидромета. Следовательно, данный метод может быть использован для выпуска оперативных прогнозов изменений уровня моря, включая сгонно-нагонные явления, в пределах рассматриваемого объекта.

При доработке метода (детализации сетки численной модели для расчета сгонно-нагонных колебаний уровня моря в отдельных районах, оптимизации информации о состоянии ледяного покрова, учете стока крупных рек) в рамках его структуры можно предусмотреть выпуск краткосрочных прогнозов уровня моря для побережья Чукотского моря и северо-западной части Берингова моря.

Технологическая линия метода прогноза работает устойчиво, процессы сбора исходной информации, выполнения расчетов, формирования результатов прогнозов и отправки их в ФГБУ «Камчатское УГМС» реализуются в автоматическом режиме.

Разработанный метод прогноза будет использован в качестве элемента системы прогноза возможности возникновения опасных явлений, во время которых затопливаются населенные пункты, береговые сооружения и объекты на российском побережье Берингова моря.

Для повышения точности прогнозов по разработанному методу необходимо детализировать сетку численной модели, применяемой для расчета изменений уровня моря, в прибрежной зоне юго-западной части Берингова моря, разработать алгоритмы и технологии учета локальных явлений, которые могут возникать в отдельных районах (например, ледовые заторы в проливах, соединяющих заливы и бухты с открытым морем).

В перспективе представляется необходимым использование в методе прогноза уровня Берингова моря трехмерной бароклинной численной модели, позволяющей более корректно воспроизводить динамику вод в пределах рассматриваемого объекта.

Список литературы

1. Абузаров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 287 с.
2. Ашик И.М. Численный гидродинамический метод прогноза колебаний уровня в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского моря // Результаты испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. 2005. Информационный сборник № 31. С. 85-103.

3. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Конфигурация модели WRF-ARW для прогноза погоды в Дальневосточном регионе // 65 лет ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 172-203.
4. *Думанская И.О., Зеленко А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С.* Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 149-183.
5. *Любицкий Ю.В., Манько А.Н., Соколов О.В.* Перспективы использования данных измерений автоматизированных постов службы цунами для формирования многолетних массивов наблюдений над уровнем моря // 65 лет ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 8-32.
6. *Любицкий Ю.В.* Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Труды ДВНИГМИ. 2017. Вып. 155. С. 32-68.
7. *Любицкий Ю.В.* Численное моделирование приливов Берингова моря // Материалы докладов XII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер», 6-10 сентября 2021 г., Владивосток. 2021. С. 239-241.
8. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учётом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80-89.
9. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 90-99.
10. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 104-118.
11. РД 52.27.284-91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов: Методические указания. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
12. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА-ЛТД, 2011. 195 с.
13. *Bernier N.B., Thompson K.R.* Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days // Ocean Modelling. 2015. Vol. 86. P. 114-127.
14. *Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atm. Ocean. Tech. 2002. Vol. 19, no. 2. P. 183-204.
15. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction // Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.
16. *Glahn B., Taylor A., Kurkowski N., Shaffer W.* The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting // Nat. Weath. Dig. 2009. Vol. 33, no. 1. P. 3-14.
17. *Skamarock W. C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G.* A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for atmospheric research. 2008. 125 p.

References

1. Abuzarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S. Operativnoe okeanograficheskoe obsluzhivanie. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN publ., 2009, 287 p. [in Russ.].
2. Ashik I.M. Chislennyj gidrodinamicheskij metod prognoza kolebanij urovnja v jugo-vostochnoj chasti Barenceva i jugo-zapadnoj chasti Karskogo morja [Numerical hydrodynamic method for forecasting level fluctuations in the south-eastern part of the Barents Sea and south-western part of the Kara Sea]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2005, vol. 31, pp. 85-103 [in Russ.].
3. Verbitskaya E.M., Romanskiy S.O. Konfiguracija modeli WRF-ARW dlja prognoza pogody v Dal'nevostochnom regione [Configuration of the WRF-ARW model for weather forecasting in the Far East region]. *65 let DVNIGMI*. Vladivostok, Dalnauka publ., 2015, pp. 172-203 [in Russ.].
4. Dumanskaya I.O., Zelen'ko A.A., Myslenkov S.A., Nesterov E.S., Popov S.K., Resnyanskiy Y.D., Strukov B.S. Morskie gidrologicheskie prognozy i operativnaja okeanologija v Gidrometcentre Rossii [Marine hydrological forecasts and operational oceanology at the Hydrometeorological Center of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 149-183 [in Russ.].
5. Lyubitskiy Yu.V., Man'ko A.N., Sokolov O.V. Perspektivy ispol'zovaniya dannyh izmerenij avtomatizirovannyh postov sluzhby cunami dlja formirovaniya mnogoletnih massivov nabljudenij nad urovнем morja [Perspectives for the use of measurement data from automated tsunami posts for the formation of long-term arrays of observations above sea level]. *65 let DVNIGMI*. Vladivostok, Dalnauka publ., 2015, pp. 8-32 [in Russ.].
6. Lyubitskiy Yu.V. Metod kratkosrochnogo prognoza urovnja morja na poberezh'e i akvatorii Ohotskogo i Japonskogo morej i na vostochnom poberezh'e poluoostrova Kamchatka [Short-range sea level forecasting method for the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan, and at the Eastern coast of the Kamchatka Peninsula]. *Trudy DVNIGMI [Proceedings of Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute]*, 2017, vol. 155, pp. 32-68 [in Russ.].
7. Lyubitskiy Yu.V. Chislennoe modelirovanie prilivov Beringova morja [Numerical simulation of the Bering Sea tides]. *Proc. 12th All-Russia Symp. "Physics of Geospheres"*. Vladivostok, 2021, pp. 239-241 [in Russ.].
8. Popov S.K., Lobov A.L. Hydrodynamic modeling of floods in Saint Petersburg considering the operating dam. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 4, pp. 267-274 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373917040070.
9. Popov S.K., Lobov A.L. Diagnosis and forecast of the Caspian Sea level with the operational hydrodynamic model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp. 607-614 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373917090084.
10. Popov S.K., Lobov A.L. Short-term forecasts of sea level fluctuations in the Sea of Azov in the ice-free period of 2017. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*. 2018. vol. 369, no. 3, pp. 104-118 [in Russ.].
11. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytanij novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh i geliofizicheskikh prognozov [Methodical instructions. Conducting production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heli-

ogeophysical forecasts]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1991, 150 p. [in Russ.].

12. RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov [Manual for the forecasting service. Section 3. Part III. Marine Hydrological Forecasting Service]. Moscow, TRIADA-LTD publ., 2011, 195 p. [in Russ.].

13. Bernier N.B., Thompson K.R. Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days. *Ocean Modelling*, 2015, vol. 86, pp. 114-127.

14. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atm. Ocean. Tech.*, 2002, vol. 19, no 2, pp. 183-204.

15. Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004, 58 p.

16. Glahn B., Taylor A., Kurkowski N., Shaffer W. The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting. *Nat. Weath. Dig.*, 2009, vol. 33, no 1, pp. 3-14.

17. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for atmospheric research. 2008. 125 p.

*Поступила 02.03.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.*

*Submitted 02.03.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-89-107>

УДК 551.465

Система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря

К.П. Сильвестрова¹, С.А. Мысленков^{1,2,3}, Д.С. Репков⁴

¹ Институт океанологии имени П.П. Ширишова

Российской академии наук, Москва, Россия;

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, Москва, Россия;

⁴ ООО "ВАТСЕН", Севастополь, Россия

stasocean@gmail.com

Представлена система прогноза ветровых экмановских апвеллингов для побережья Черного моря. Система основана на расчете критерия апвеллинга, который зависит от скорости и направления ветра и толщины верхнего квазиоднородного слоя. В качестве прогноза ветра используются данные модели COSMO-Ru07. Прогноз явлений апвеллинга в период с мая по ноябрь 2019 г. был рассчитан для трех точек у побережья Крыма с заблаговременностью 24-72 часа. Оценка качества прогнозов апвеллинга выполнена на основе данных измерений температуры воды в Балаклаве, Форосе и Партените. Сопоставление показало, что 50 % случаев значительного понижения температуры для Фороса и Балаклавы успешно прогнозирует с заблаговременностью 24–72 часа. Случаи значительного понижения температуры воды в исследуемом регионе наблюдаются редко, поэтому полученный результат является удовлетворительным. Часть случаев, которые система не спрогнозировала, вероятно, являются сгонными апвеллингами либо горизонтальной адвекцией холодных вод.

Ключевые слова: апвеллинг, Черное море, прогноз апвеллинга, COSMO-Ru07, температура воды

Wind upwelling forecast for the Russian Black Sea coast

K.P. Silvestrova¹, S.A. Myslenkov^{1,2,3}, D.S. Repkov⁴

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

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

³Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

⁴WATSEN LLC, Sevastopol, Russia

stasocean@gmail.com

The paper presents a forecast system for wind Ekman upwelling for the Black Sea coast. The system is based on the calculation of the upwelling criterion, which depends on the wind speed and wind direction and the thickness of the upper mixed layer. The archived wind forecast was extracted from the COSMO-Ru07 model. The upwelling forecast with a lead time of 24–72 hours was calculated for three points of the Crimean coast for the period from May to November 2019. The quality of upwelling forecasts was assessed using in situ water temperature measurements in Balaklava, Foros, and Partenit.

The comparison showed that 50% of the cases of a significant temperature decrease for Foros and Balaklava are successfully predicted with a lead time of 24–72 hours. The cases of the significant temperature drop are rare in the study region, so the result is unsatisfactory. A part of cases that were not predicted by the system are probably downsurge upwellings or the horizontal advection of cold water.

Keywords: upwelling, Black Sea, upwelling forecast, COSMO-Ru07, sea temperature

Введение

Апвеллинг – это подъем глубинных вод, который может быть вызван различными динамическими факторами. Когда апвеллинг происходит вследствие сильного и продолжительного вдольберегового ветра, его называют экмановским, если ветер направлен с берега, апвеллинг называют сгонным. Изменчивость поля температуры поверхности моря в зоне прибрежного апвеллинга определяется пространственно-временной структурой поля ветра, региональными геоморфологическими и гидрологическими особенностями [17]. В данной работе рассмотрены особенности системы прогноза ветровых экмановских апвеллингов для российского побережья Черного моря.

При апвеллинге на побережье Черного моря происходит резкое падение температуры воды, что негативно влияет на качество отдыха туристов [4]. Актуальность создания системы прогноза апвеллингов обусловлена тем, что Черное море является основной рекреационной акваторией для граждан России, особенно в условиях ограничений международного туризма, вызванных пандемией. По оценкам Министерства курортов и туризма Республики Крым [<https://mtur.rk.gov.ru/ru/article/show/2202>], только за первое полугодие 2021 года более 3 млн туристов посетили полуостров, в 2020 г. отдыхающих было более 6 млн. В Краснодарском крае туристический поток к сентябрю 2021 г. превысил 12 млн человек [https://admkr.krasnodar.ru/content/1131/show/598174/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop].

Помимо прямого воздействия на рекреационный потенциал, апвеллинг считается одним из основных процессов кросшельфового водообмена [27], при котором из глубинных слоев поднимается большое количество биогенных элементов, являющихся важным первичным звеном в пищевой цепи шельфовых экосистем.

Исследованию апвеллингов в Черном море посвящено достаточно большое количество статей [1, 3, 5, 7, 11, 16, 36 и др.]. В работах [2, 12] представлены первые современные исследования апвеллингов у побережья Крымского полуострова, позже по данным натурных исследований и моделирования апвеллинг у Южного берега Крыма исследован в работах [6, 7, 9, 14, 15, 17, 23, 28, 29].

Последние исследования также показали важность прогнозирования процессов апвеллинга, так как иногда подъем вод приводит не только к росту биологической продуктивности за счет поступления биогенных

веществ, но для Черного моря и к критическим заморам бентосных сообществ, при подъеме границы сероводородной зоны [24].

Работы по прогнозированию апвеллингов для Черного моря авторам неизвестны. Для других районов Мирового океана существуют системы прогноза, как правило, основанные на гидродинамических моделях. В 1973 году в техническом отчете NOAA Национальной морской службой по рыболовству анализировались индексы прибрежного апвеллинга у западного побережья Северной Америки [25]. Методика расчета индекса апвеллинга была основана на расчете геострофического ветра по полю давления и затем экмановского переноса, направленного от берега. Данная методика используется во многих современных исследованиях, однако она была разработана для анализа сезонных апвеллингов, проявление которых закономерно возникает при смене типов атмосферной циркуляции, что позволяет найти время начала и окончания апвеллингового режима и не подходит для анализа синоптических и мезомасштабных апвеллингов в морях. Помимо анализа апвеллингов, данный принцип используется в моделях для прогнозирования времени весеннего перехода от даунвеллинга к апвеллингу, например в Северо-западной ассоциации сетевых систем наблюдения за океаном [<http://www.nanoos.org/products/j-scope/forecasts.php?forecast=2020-04&var=overview>]. Для Ботнического залива Балтийского моря, где апвеллинги проявляются довольно часто, была создана система ансамблевого прогноза апвеллинга, основанная на биогеохимической модели BALECO Финского метеорологического института [34], а также на сервисе COPERNICUS доступна модель для прогноза апвеллинга во всем Балтийском море [https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=BALTICSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY_003_006]. Для озера Мичиган на основе спутниковых данных радиометра высокого разрешения AVHRR проведена идентификация и классификация случаев апвеллинга, а затем проанализирован ветер для полученных событий, и на основе данных о ветре уже выполнен краткосрочный прогноз апвеллинга [33]. В работе [31] для прогноза апвеллинга у Африканского побережья используются технологии нейронных сетей, которые применяются к данным о ветре и спутниковым данным о температуре поверхности моря (ТПМ).

Современные гидродинамические модели позволяют успешно воспроизводить процессы апвеллинга/даунвеллинга [8, 30, 32]. Однако для корректной работы модели необходимо точно задать начальные и граничные условия. Для прибрежной зоны Черноморского побережья распределение температуры и солености, как правило, неизвестно, и задается сезонное среднее с усвоением спутниковой температуры поверхности моря. Также усваиваются данные по уровню со спутниковых альтиметров, которые имеют существенные погрешности вблизи берега и низкое разрешение по времени, что приводит к ухудшению результатов моделирования. Следовательно, для прибрежных районов с характерным

пространственным масштабом 10–30 км и событий с синоптическим периодом (1–3 суток) в гидродинамических моделях возникают сложности с корректным заданием начальных и граничных условий. Упрощенные методы диагноза и прогноза апвеллингов имеют свои ограничения, однако в ряде случаев они могут быть более эффективны, чем гидродинамические модели.

Предлагаемая система прогноза ветровых экмановских апвеллингов основана на расчете критерия апвеллинга, который главным образом зависит от скорости и направления ветра и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). Преимуществами данной системы являются простота расчета и доступность входных данных. В настоящей работе выполнены тестовые прогнозы возникновения апвеллинга в прибрежной зоне Крымского полуострова и проведена их верификация на основе данных наблюдений.

Данные и методы

Предлагаемая система прогноза апвеллинга основана на методике определения критерия апвеллинга, предложенного в [10] и подтвержденного на натурных данных в районе г. Геленджика [20, 35]. Критерий апвеллинга отражает процесс поднятия к поверхности подтермоклинных вод с температурой около 10 °С. Критерий R_u рассчитывается следующим образом:

$$R_u = \tau_v t / f \rho_w H R_d,$$

где τ_v – вдольбереговая составляющая напряжения трения ветра; t – время квазистационарного действия апвеллингового ветра; f – параметр Кориолиса; ρ_w – плотность морской воды; H – толщина ВКС; R_d – локальный бароклинный радиус деформации Россби. Более подробно см. [19].

Апвеллинговый ветер направлен вдоль берега таким образом, что в Северном полушарии берег остается слева. Согласно формуле, если критерий $R_u \leq -1$, тогда подтермоклинные воды поднимаются под действием экмановского переноса и оказываются у поверхности моря. Диапазон критерия от -0.8 до -1 включен в анализ, так как в расчетах есть неопределенности из-за средних значений толщины ВКС и занижения моделью прогностических скоростей ветра. Знак критерия определяется направлением действия касательного напряжения трения ветра относительно берега. При значениях критерия -0.8 и менее происходит апвеллинг, и температура воды на поверхности может падать от текущих значений до 8–10 °С (в зависимости от температуры подтермоклинных вод). Таким образом, амплитуда колебаний ТПМ может быть разной. Для анализа оправдываемости прогноза апвеллинга падение ТПМ на 5 °С и более, согласно данным измерений, принимается значимым событием, поскольку существенно превышает суточный ход ТПМ в исследуемом районе. Если для такого значимого события $R_u \leq -0.8$, то прогноз считается успешным.

В качестве входных данных используются данные о прогнозе ветра на высоте 10 м мезомасштабной атмосферной модели COSMO-Ru07 [18]. Шаг по пространству модели COSMO-Ru07 составляет около 7 км, а шаг по времени 3 часа, использованы данные с заблаговременностью 72 часа. Сетка узлов модели COSMO-Ru07 представлена на рис. 1.

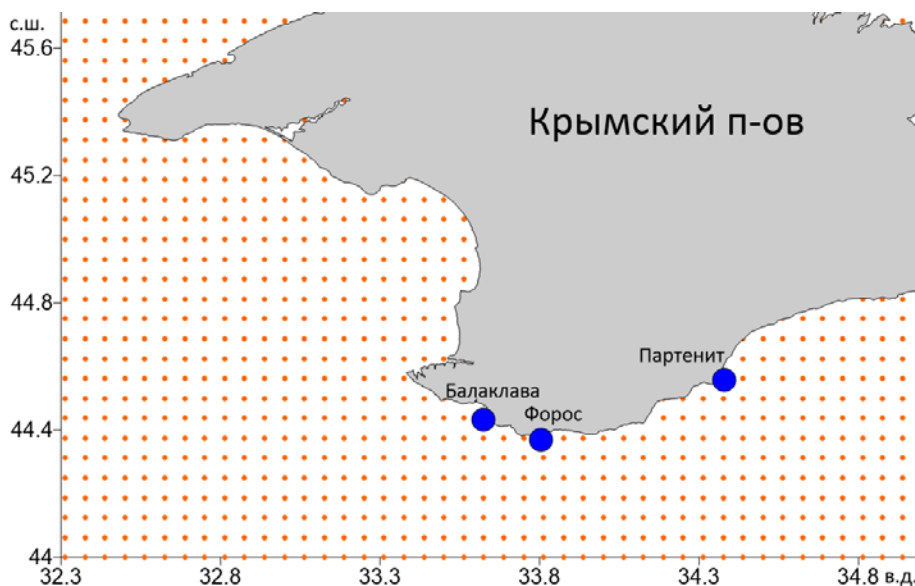


Рис. 1. Сетка узлов модели COSMO-Ru07 (оранжевые точки). Синими кружками отмечены точки, где проводились измерения температуры воды.
Fig. 1. COSMO-Ru07 grid (orange dots). The blue circles mark the points where the water temperature was measured.

Для расчета критерия апвеллинга также необходимо знать параметры морской среды, такие как плотность и толщина ВКС. Среднемесячные температура и соленость для расчета плотности взяты с портала ЕСИМО [http://portal.esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_913¶meter=tempwater&sea=black&filter=workingstations] – вклад ошибки из-за разницы плотностей незначительный, поэтому использовались среднемесячные значения. Толщина ВКС принята равной климатическим среднемесячным оценкам (по натурным данным 1985–2017 гг.) из [13]. Этот параметр более важный и изменчивый, основные погрешности расчета возникают при ошибках в толщине ВКС. В перспективе толщина ВКС может усваиваться из гидродинамической модели или по натурным данным, в зависимости от района. В работе рассматривается теплый период года (май–ноябрь), так как именно в этот период сокращается толщина ВКС, а также становится возможным подтверждение наличия апвеллинга по данным ТПИМ.

Для оценки качества прогноза апвеллингов были использованы данные о температуре воды, полученные в рамках российского проекта WatSen. Авторами проекта являются В.В. Елышев и Д.С. Репков, более подробное описание представлено на сайте [<https://watsen.info>]. Датчики состоят из автоматической платы с модулем GSM и выведенным во внешнюю среду цифровым термистором DS18B20 (точность $\pm 0.5^\circ\text{C}$ в диапазоне от -10°C до $+85^\circ\text{C}$) (рис. 2). Плата помещена в герметичную пластиковую плавучесть. Проект WatSen стартовал в 2016 г., за это время вдоль береговой линии Крымского полуострова размещено 15 датчиков, с помощью которых выполнено более 330000 измерений температуры. Датчики заякорены таким образом, чтобы термистор находился на глубине не более 30 см, а удаление от берега не превышало 100 метров.



Рис. 2. Датчик температуры воды проекта WatSen.
Fig. 2. WatSen water temperature sensor.

Для тестирования системы прогноза выбрано 3 точки на побережье Крымского полуострова: Балаклава (44.488° с. ш., 33.618° в. д.), Форос (44.395° с. ш., 33.821° в. д.) и Партенит (44.586° с. ш., 34.353° в. д.). Выбор точек обусловлен наличием в них продолжительных рядов данных о температуре воды с датчиков WatSen за 2019 год. Для каждой из этих точек был собран архив данных о прогнозе ветра за 2019 год, который представляет собой ряд из 25 значений прогнозов один раз в сутки от 00 часов, с заблаговременностью до 75 ч с дискретностью 3 часа. Таким образом, получен ряд из значений прогноза скорости ветра для всего года, содержащий для каждого дня прогноз на 3 суток.

По входным данным для каждого срока прогноза рассчитаны касательное напряжение ветра (вдольбереговое и поперек берега) и параметр,

характеризующий вертикальную скорость подъема вод. Угол, определяющий направление берега и используемый в расчетах касательного напряжения трения ветра для поворота осей, взят для Балаклавы равным -55° , для Фороса -97° , а для Партенита -155° (отсчет угла идет от направления на север). После расчета вертикальной скорости проводилось интегрирование по времени и вывод значений критерия экмановского апвеллинга для разной заблаговременности (24, 48, 72 ч). Критерий апвеллинга рассчитывается на временном ряде и является накопительной величиной, т. е. он возрастает в случае продолжительного действия апвеллингового ветра, а при смене ветра обнуляется. Сменой ветра считается смена знака касательного напряжения трения ветра (имеется ввиду вдольбереговая составляющая). Было реализовано 2 варианта расчетов. Первый – когда в текущий день расчеты стартуют с 00 часов. Второй – «сквозной» расчет, когда значения параметров сохраняются для прогноза на 24 часа от текущего дня, а в расчетах для последующих суток используются в качестве стартовых значений. Таким образом, в первом варианте присутствует эффект «холодного» старта, при длительном воздействии апвеллингового ветра (более 2 суток) сквозной расчет более предпочтителен.

Результаты

Прогноз критерия апвеллинга с заблаговременностью 24–72 ч был рассчитан ежедневно для трех точек в Крыму для периода с мая по ноябрь 2019 года. В таблице приведена статистика для всех случаев, когда температура понижалась на 5°C и более в течение 1–2 суток, и соответствующие значения прогноза критерия апвеллинга. Анализ событий из таблицы показал, что для Балаклавы и Фороса больше половины событий понижения температуры согласуются с низкими значениями критерия апвеллинга. Для Партенита критерий апвеллинга не согласуется с понижениями температуры.

По данным измерений в 2019 году для Балаклавы зарегистрировано 8 случаев значимого понижения ТПМ (рис. 3). Однако, как видно из таблицы, не все случаи значительного охлаждения вод поверхностного слоя отражаются в значениях прогноза критерия апвеллинга. Так, во время события начала июля, когда ТПМ менее чем за сутки опустилась на 11.3°C , максимальное значение критерия апвеллинга составило -0.61 (-0.61) и зарегистрировано для прогноза от 3 июля на 48 часов.

Согласно прогнозу, ветер был восточного и северо-восточного направления, что для Балаклавы более похоже на сгонный, а не экмановский апвеллинг. К тому же предыдущее событие, подтвердившиеся по прогнозу (27–29 июня), предварительно сильно подняло термоклин к поверхности, ТПМ уже упала на 6°C , затем в течение нескольких суток при отсутствии ветра была релаксация апвеллинга, и далее 3 июля начался сгон теплых вод. В этом случае термоклин явно залегал выше, т. е. ВКС был значительно меньше, чем в расчете, отсюда недооценка критерия.

С 8 по 10 июня был еще один эпизод апвеллинга, предсказанный прогнозом только с заблаговременностью 72 ч от 6 июля, значение критерия апвеллинга -1.03 (-1.03). Необходимо отметить, что продолжительность события была более суток.

Таблица. Случаи значительного понижения ТПМ и прогноз критерия апвеллинга (R_u) за период май-октябрь 2019 г. Критерий апвеллинга рассчитан в двух вариантах: без разгона и при «сквозном» расчете, значения «сквозного» расчета указаны в скобках. Жирным шрифтом выделены события, когда рассчитанный критерий составляет -0.8 или менее

Table. Cases of a significant decrease in SST and the value of the upwelling criterion (R_u) for May-October 2019. The upwelling criterion was calculated in two versions: "cold start" and "hot start" from previous day, the values of the "hot start" calculation are indicated in brackets. Some events marked bold type, these are with criterion -0.8 or less

Дата	Местоположение	Перепад температуры воды, °C	Max T воды, °C	Min T воды, °C	Продолжительность события, ч	R_u прогноз на 24 ч	R_u прогноз на 48 ч	R_u прогноз на 72 ч
27-28 июня	Балаклава	6.3	26.3	20	16	-1.48 (-2.4)	-1.2 (-1.2)	-2.23 (-2.27)
3-4 июля	Балаклава	11.3	23	11.7	10	-0.33 (-0.46)	-0.61 (-0.61)	-0.16 (-0.16)
6-7 июля	Балаклава	5.8	25.1	19.3	20	-0.03 (-0.03)	-0.03 (-0.03)	-0.04 (-0.04)
8-10 июля	Балаклава	10.7	22.5	11.8	39.5	-0.33 (-0.54)	-0.12 (-0.12)	-1.03 (-1.03)
20-22 июля	Балаклава	5	25.3	20.3	39	-0.49 (-0.89)	-0.34 (-0.34)	-0.6 (-0.6)
4-5 августа	Балаклава	8.2	22.3	14.1	18	-1.19 (-1.19)	-0.94 (-0.94)	-1.1 (-1.1)
6-7 августа	Балаклава	5.8	25.1	19.3	34	-0.06 (-0.08)	-1.3 (-1.3)	-1.03 (-1.03)
16-18 августа	Балаклава	5.2	26.6	21.4	32	-0.86 (-1.37)	-1.26 (-1.26)	-1.99 (-1.99)
2-3 июня	Форос	8.1	20.8	12.7	26	0.02 (0.02)	-0.03 (-0.03)	-0.03 (-0.03)
27-29 июня	Форос	5.4	26.2	20.8	40	-0.86 (-1.13)	-2.15 (-2.42)	-1.34 (-1.34)
1-2 июля	Форос	5.1	22.6	17.5	25	-1.03 (-3.79)	-2.68 (-3.8)	-3.04 (-3.31)
3-4 июля	Форос	11.1	21.5	10.4	10	-0.04 (-0.04)	-0.48 (-0.48)	-1.95 (-4.7)
6-7 июля	Форос	14	24	10	17	-0.34 (-0.34)	-0.37 (-0.37)	-0.2 (-0.2)
8-9 июля	Форос	10	23.5	13.5	22.5	-0.62 (-0.87)	-1.49 (-1.54)	-1.59 (-1.59)
12-13 июля	Форос	7.3	19.7	12.4	17	-0.59 (-0.86)	-0.89 (-0.89)	-0.58 (-0.58)
13-14 июля	Форос	5.4	20	14.6	14.5	-0.52 (-1.39)	-1.13 (-1.4)	-0.44 (-0.44)

30 июля - 1 августа	Форос	8.9	26.1	17.2	40	-0.42 (-0.73)	-0.68 (-0.68)	-0.46 (-0.46)
4 августа	Форос	12	24.8	12.8	10	-2.55 (-2.55)	-2.38 (-2.38)	-2.55 (-2.55)
6-7 августа	Форос	5.1	19.6	14.7	11	-0.27 (-3.01)	-2.92 (-2.92)	-2.72 (-2.72)
10-11 августа	Форос	5.7	24.1	18.4	33	-0.16 (-0.17)	-0.51 (-0.51)	0
26-28 мая	Партенит	5.3	18.5	13.2	38.5	-0.07 (0.12)	-0.2 (-0.2)	-0.45 (-0.45)
29-30 мая	Партенит	5.2	21.5	16.3	7	0	0	0.01 (0.01)
31 мая - 2 июня	Партенит	5.5	23.7	18.2	35	-0.01 (-0.01)	-0.03 (-0.03)	0
2-3 июля	Партенит	8.5	22.8	14.3	11	-0.22 (-0.35)	-0.23 (-0.29)	-0.32 (-0.32)
8-9 июля	Партенит	9	23	14	10.5	-0.28 (-0.34)	-0.39 (-0.39)	-0.45 (-0.45)

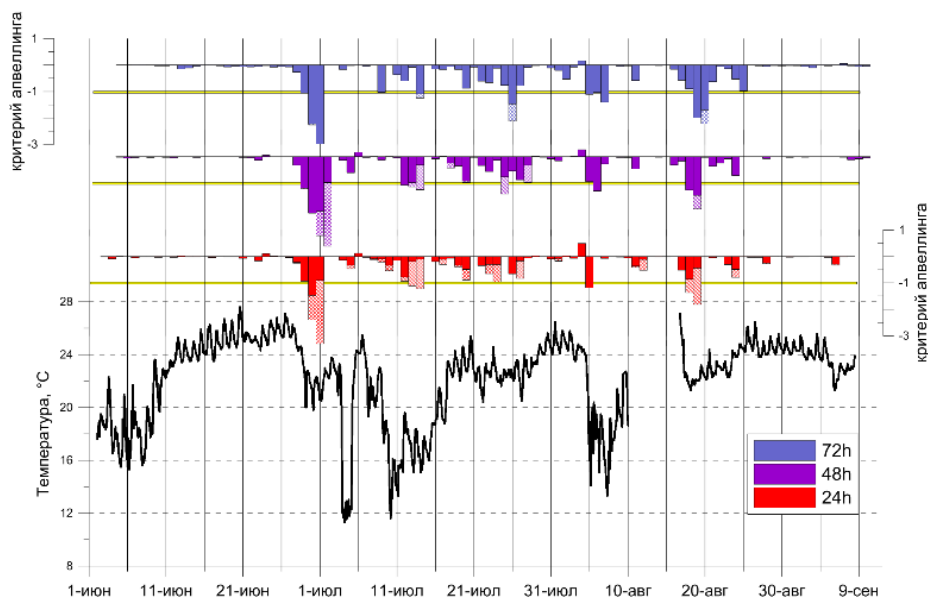


Рис. 3. Изменение ТПМ по данным буя WATSEN в Балаклаве и критерия апвеллинга. Красными столбцами показаны значения критерия апвеллинга для заблаговременности 24 ч (красной штриховкой, значения критерия апвеллинга при «сквозном» расчете), фиолетовыми столбцами – то же для заблаговременности 48 ч, синими столбцами – для заблаговременности 72 ч, черной линией показана температура воды.

Fig. 3. SST change according to the data of the WATSEN buoy in Balaklava and the upwelling criterion. The red columns show the values of the upwelling criterion for a lead time of 24 h (red shading, the values of the upwelling criterion in the "hot start" calculation), the purple columns show the same for a lead time of 48 h, the blue columns for a lead time of 72 h, the black line shows the water temperature.

Далее в период с 11 по 13 июля по прогнозу был полный апвеллинг, ТПМ опустилась до 15°C . Еще одно значимое падение температуры произошло через неделю, 20–22 июля, ветер был восточный и северо-восточный, значения критерия апвеллинга менялись от -0.34 до -0.89 для разных заблаговременностей. Интенсивное событие 4–5 августа было предсказано в обоих расчетах и с разной заблаговременностью, следующее за ним повторное понижение температуры было в прогнозе с заблаговременностью 48 и 72 ч. Последнее событие в этом сезоне было предсказано с заблаговременностью 24 и 48 ч, зафиксированный перепад температуры воды составил 5.2°C .

Согласно расчетам, был всего один случай ложного прогноза апвеллинга на 25–26 июля (заблаговременность 48 и 72 ч), ТПМ понизилась только через сутки на 3°C . Во всех остальных случаях хотя и не было полного апвеллинга, все же наблюдалось значительное понижение температуры. Из наблюдаемых 8 событий, представленных в таблице, успешно спрогнозированы с заблаговременностью 24 и 48 ч – 4 события, 5 событий из 8 предсказано за 72 ч. Еще для 2 событий критерий апвеллинга имел значения менее -0.5 , что говорит о значительном подъеме термоклина и также может отображаться на ТПМ.

Согласно рассчитанным значениям, критерий апвеллинга опускался ниже порогового значения от 4 до 15 раз в зависимости от прогноза для Фороса (рис. 4). Для 14 случаев наблюдалось понижение температуры, подтвержденное данными буя (с июня по сентябрь), падения температуры составили от 2°C до 15°C . Событие 3 июля не было точно спрогнозировано за 24 и 48 ч (был прогноз на полный апвеллинг с 29 июня по 2 июля), а с заблаговременностью 72 часа критерий достигал порогового значения 29, 30 июня, 1 и 3 июля. После этого события температура воды опять повторно упала до 10°C 7 июля, но значения критерия апвеллинга менялись от -0.2 до -0.37 .

По данным спутниковых снимков от 6 июля, в это время напротив Фороса находился вихрь, который вполне мог привести к подъему охлажденных вод, поднявшихся за несколько дней до этого благодаря экмановскому апвеллингу. О взаимодействии апвеллинга и вихрей говорится в [7, 22, 26]. В Форосе довольно часто наблюдались значения критерия апвеллинга, превышающие пороговое значение в несколько раз, это может быть связано с тем, что наблюдается положительный тренд толщины ВКС, связанный с интенсификацией летних штормов, согласно [13]. Для расчетов в данной работе толщина ВКС с июня по август изменялась в пределах 8.8 – 10.2 м.

Из наблюдаемых 12 событий, представленных в таблице, 7 предсказано за 24 и 48 ч, с заблаговременностью 72 ч предсказано 6 событий, при этом еще во время 2 событий критерий апвеллинга был менее -0.5 .

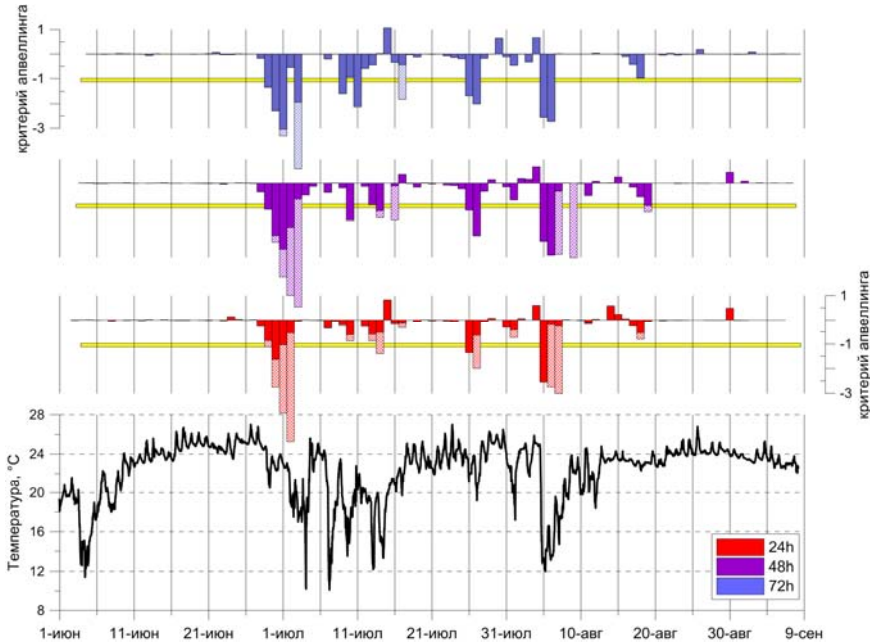


Рис. 4. Изменение ТПМ по данным буя WATSEN в Форосе и критерия апвеллинга. Красными столбцами показаны значения критерия апвеллинга для заблаговременности 24 ч (красной штриховкой, значения критерия апвеллинга при «сквозном» расчете), фиолетовыми столбцами – то же для заблаговременности 48 ч, синими столбцами – для заблаговременности 72 ч, черной линией показана температура воды.

Fig. 4. SST change according to the data of the WATSEN buoy in Foros and the upwelling criterion. The red columns show the values of the upwelling criterion for a lead time of 24 h (red shading, the values of the upwelling criterion in the "hot start" calculation), the purple columns show the same for a lead time of 48 h, the blue columns for a lead time of 72 h, the black line shows the water temperature.

Согласно рассчитанным значениям, критерий апвеллинга в Партените не опускался ниже порогового значения (рис. 5), однако здесь наблюдалось три значительных падения температуры, которые были приурочены к тем же событиям, которые наблюдались в других исследуемых районах. Основные понижения температуры зарегистрированы 3 и 9 июля. В данном случае значительные понижения температуры, вероятно, вызваны адвекцией или динамикой вод. Прогнозирование для данного района усложняется из-за расположения буя рядом с мысом Аю-Даг и горой Аю-Даг, которые служат естественным препятствием для юго-западного ветра – апвеллингового для восточного побережья Крыма. В то же время континентальный склон довольно близко расположен к берегу именно в районе Партенита. Квазисинхронность возникновения аномалий температуры с предыдущими районами обусловлена конфигурацией береговой черты.

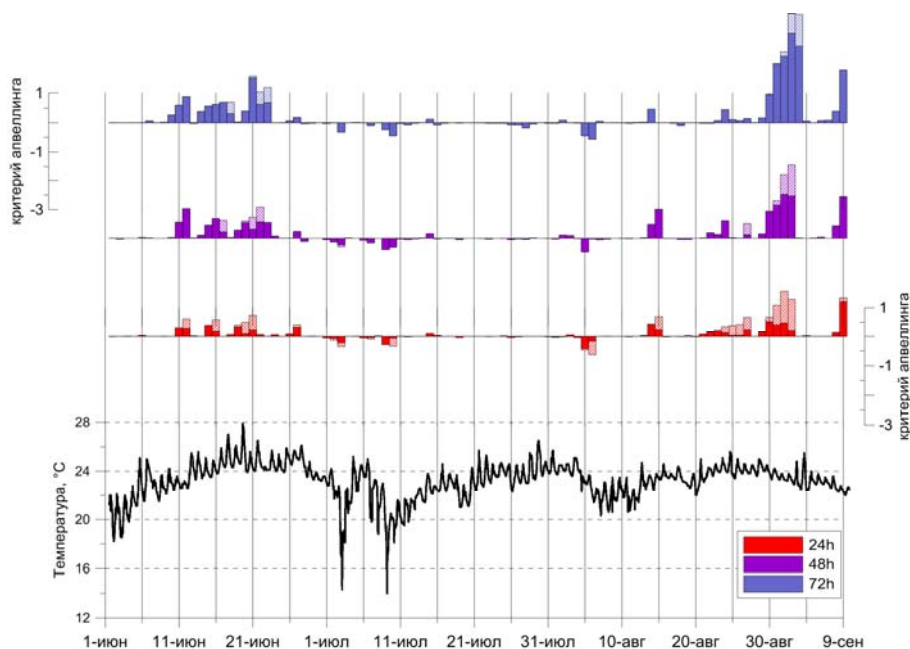


Рис. 5. Изменение ТПМ по данным буя WATSEN в Партените и критерия апвеллинга. Красными столбцами показаны значения критерия апвеллинга для заблаговременности 24 ч (красной штриховкой, значения критерия апвеллинга при «сквозном» расчете), фиолетовыми столбцами – то же для заблаговременности 48 ч, синими столбцами – для заблаговременности 72 ч, черной линией показана температура воды.

Fig. 5. SST change according to the data of the WATSEN buoy in Balaklava and the upwelling criterion. The red columns show the values of the upwelling criterion for a lead time of 24 h (red shading, the values of the upwelling criterion in the "hot start" calculation), the purple columns show the same for a lead time of 48 h, the blue columns for a lead time of 72 h, the black line shows the water temperature.

Обсуждение

Существуют несколько факторов, которые влияют на возникновение апвеллинга. Помимо продолжительности действия апвеллингового ветра, не менее важным является направление фонового потока в исследуемом районе. Если течение действует «сонаправленно» ветру, то апвеллинг может возникать и при более слабых ветрах, однако если происходит интенсификация Основного черноморского течения (ОЧТ), то это будет иметь «запирающий» эффект для Южного берега Крыма. Стоит также упомянуть, что Южный берег Крыма сам по себе является активной динамической зоной, врезающийся в море полуостров стоит на пути ОЧТ, что приводит к частому вихреобразованию. Вихри в свою очередь способны сами по себе поднимать холодную воду из более глубоких слоев. На побережье Крыма в некоторых мелководных зонах, таких как

побережье от о. Долгий до м. Тарханкут, от м. Меганом до Керченского пролива, часто возникает именно сгонный апвеллинг [17]. Однако несмотря на сложную природную систему Черного моря, мы можем довольно точно спрогнозировать более половины случаев интенсивного и резкого падения температуры. Для более успешного прогноза необходимо параметризовать процесс сгонного апвеллинга, а также учитывать фоновое течение. Форма проявления апвеллинга на морской поверхности для данного района определяется не только контуром береговой линии, скоростью и направлением ветра, но и взаимодействием апвеллинга с окружающими разномасштабными динамическими структурами [22].

Ранее проверка системы прогноза была проведена по данным термоксы, закоренной в акватории заповедника Утриш (44.719° с. ш. и 37.434° в. д.). При достижении рассчитанным критерием апвеллинга -0.9 падение температуры воды на поверхностном датчике составило $2\text{--}3.5^{\circ}\text{C}$, температура на придонных датчиках изменялась на $5\text{--}13^{\circ}\text{C}$ (что свидетельствовало о подъеме термоклина) [21].

Заключение

На основе методики определения критерия апвеллинга и прогноза ветра COSMO-Ru07 была создана система прогноза апвеллинга для побережья Черного моря. Оценка качества прогнозов апвеллинга выполнена на основе данных прямых измерений температуры воды в Балаклаве, Форосе и Партените. Сопоставление данных о ТПМ с прогнозом критерия апвеллинга показало, что 50 % случаев значительного понижения температуры (на 5°C и более) для Фороса и Балаклавы успешно прогнозируются и, вероятно, являются экмановскими апвеллингами. Однако для оценки разницы в оправдываемости прогнозов разной заблаговременности выборка была недостаточной. Часть случаев понижения температуры, которые система не спрогнозировала, вероятно, являются сгонными или повторными апвеллингами либо горизонтальной адвекцией холодных вод. Для Партенита в теплый сезон 2019 года по данным архивного прогноза ветра экмановских апвеллингов не зарегистрировано, соответственно, резкие понижения ТПМ предсказаны системой не были.

В дальнейшем предполагается доработка системы прогноза включением варианта сгонных апвеллингов (с оценкой их вероятности для конкретных пунктов), а также с данными из оперативных гидродинамических моделей для описания фонового потока. В перспективе прогнозы будут визуализированы в виде карт для Черноморского побережья Российской Федерации.

Работа К.П. Сильвестровой выполнена при финансовой поддержке гранта президента № МК-709.2021.1.5. Работа С.А. Мысленкова выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Анализ данных выполнен в рамках темы госзадания FMWE-2021-0002.

Список литературы

1. *Архипкин В.С.* Гидрология прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей: Дис. ... канд. геогр. наук. – М., 1996.
2. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев: Наукова думка, 1992. 242 с.
3. *Блатов А.С., Тузилкин В.С.* Среднемасштабные вихри и синоптическая изменчивость в Мировом океане // Итоги науки и техники. Серия Океанология. 1990. Т. 8. 248 с.
4. *Боровская Р.В., Боровская К.В.* Роль апвеллинга в рекреационной деятельности Крыма // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2015. Т. 53. С. 19-28.
5. *Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О.* Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26-36.
6. *Власенко В.И., Стацук Н.М., Иванов В.А., Романов А.С., Внуков Ю.Л.* Исследование влияния прибрежного апвеллинга на динамику полей кислорода и сероводорода в шельфовой зоне Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 3. С. 348–355.
7. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // Исследование Земли из космоса. 1998. № 3. С. 83-88.
8. *Демьшев С.Г., Кочергин С.В., Кочергин В.С.* Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености / // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. Вып. 15. С. 215-226.
9. *Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б., Музылева М.А.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 45-57.
10. *Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б., Пиотух В.Б., Подымов О.И.* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга-даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИОРАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56, № 2. С. 203-214.
11. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н.* Апвеллинг в Черном море. Севастополь: НПП “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2008. 92 с.
12. *Иванов В.А., Янковский А.Е.* Длинноволновые движения в Черном море. Киев: Наукова думка, 1992. 112 с.
13. *Кубряков А.А., Белокопытов В.Н., Зацепин А.Г., Станичный С.В., Пиотух В.Б.* Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5 (209). С. 449-468. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
14. *Михайлова Э.Н., Музылева М.А.* Ветровые условия возникновения апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у ЮБК // Системы контроля окружающей среды. 2007. С. 284-286.
15. *Михайлова Э.Н., Музылёва М.А., Полонский А.Б.* Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части

Черного моря и у побережья Крыма в 2005-2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. №. 20. С. 160-170.

16. Новиков А.А., Тужилкин В.С. Сезонные и региональные вариации синоптических аномалий температуры воды в северо-восточной части прибрежной зоны Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 42-52.

17. Полонский А.Б., Музылёва М.А. Современная пространственно-временная изменчивость апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. №. 4. С. 96-108.

18. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Татаринович Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. №. 4 (374). С. 37-53.

19. Сильвестрова К.П. Прибрежные апвеллинги в северо-восточной части Черного моря: связь с ветром и течением: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 2019.

20. Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 521-530.

21. Сильвестрова К.П., Пузина О.С., Мысленков С.А. Прогноз ветровых апвеллингов и его сравнение с данными термоксы, установленной в заповеднике Утриш в 2020 г. // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: Год науки и технологий в РФ – Десятилетие наук об океане ООН». 2021. С. 316-318.

22. Станичная Р.Р., Станичный С.В. Апвеллинги Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, №. 4. С. 195-207.

23. Щуров С.В., Субботин А.А., Троценко О.А., Богданова Т.А. и др. Исследование апвеллингов в районе мидийной фермы в бухте Ласпи (Черное море) // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона: материалы VIII Международной конференции. Керчь, 26-27 июня 2013 г. 2013. С.157-164.

24. Островский А.Г., Сильвестрова К.П., Соловьев Д.М., Зацепин А.Г., Очередник В.В., Подымов О.И., Федоров А.В. Квази-инерционные внутренние волны в апвеллингах над континентальным склоном северо-восточной части Черного моря // 19-я Международная конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 266. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a

25. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71 // NOAA Tech. Rep NMFS SSRF-671. U.S. Dept. of Commerce, 1973.

26. Brannigan L. Intense submesoscale upwelling in anticyclonic eddies // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43, no. 7. P. 3360-3369.

27. Crise A., Kaberi H., Ruiz J., Zatsepin A., Arashkevich E., Giani M. et al. A MSFD complementary approach for the assessment of pressures, knowledge and data gaps in Southern European Seas: The PERSEUS experience // Marine pollution bulletin. 2015. Vol. 95, no 1. P. 28-39.

28. Gawarkiewicz G., Korotaev G.K., Stanichny S.V. et al. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along Crimean coast of the Black Sea // *Contin. Shelf Res.* 1999. Vol. 19. P. 977-1005.
29. Goryachkin Y.N. Upwelling nearby the Crimea Western Coast // *Physical oceanography*. 2018. Vol. 25, no. 5. P. 368-379.
30. Korotaev G., Oguz T., Dorofeyev V., Demyshev S., Kubryakov A., Ratner Y. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science // Ocean Science*, 2011. Vol. 7, no. 5. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.
31. Kriebel S.K.T., Brauer W., Eifler W. Coastal upwelling prediction with a mixture of neural networks // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 1998. Vol. 36, no. 5. P. 1508-1518. DOI: 10.1109/36.718854.
32. Mizyuk A.I., Puzina O.S., Senderov M.V. Accuracy of the reconstructed temperature in the Black Sea upper layer from nowcasting/forecasting systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. C. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012146.
33. Plattner S., Mason D.M., Leshkevich G. A., Schwab D.J., Rutherford E.S. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data // *Journal of Great Lakes Research*. 2006. Vol. 32, no. 1. P. 63-76.
34. Roiha P., Westerlund A., Haavisto N. Forecasting upwelling events with monthly ensembles for the eastern coast of the Gulf of Bothnia in the Baltic Sea // *Journal of Operational Oceanography*. 2016. Vol. 9, no. 2. P. 115-125.
35. Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G. Variability of wind-driven coastal upwelling in the North-eastern Black Sea in 1979-2016 according to NCEP/CFR data // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 175, no. 11. C. 4007-4015.
36. Sur H. Í., Özsoy E., Ünlüata Ü. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // *Progress in Oceanography*. 1994. Vol. 33, no. 4. P. 249-302.

References

1. Arkhipkin V.S. *Gidrologiya pribreznogo apvellinga CHernogo i Kaspiyskogo morey: Dis. ... kand. geogr. nauk.* Moscow, 1996 [in Russ.].
2. Blatov A.S., Ivanov V.A. *Gidrologiya i gidrodinamika shel'fovoy zony Chernogo morya (na primere Yuzhnogo berega Kryma)*. Kiev, Naukova dumka publ., 1992, 242 p. [in Russ.].
3. Blatov A.S., Tuzhilkin V.S. *Srednemashtabnye vihiri i sinopticheskaya izmenchivost' v Mirovom okeane. Itogi nauki i tekhniki. Seriya Okeanologiya*, 1990, vol. 8, 248 p. [in Russ.].
4. Borovskaya R.V., Borovskaya K.V. The role of upwelling in recreational activities of Crimea. *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo khozyaistva i okeanografii*, 2015, vol. 53, pp. 19-28 [in Russ.].
5. Borovskaya R.V., Lomakin P.D., Panov B.N., Spiridonova E.O. Structure and Interannual Variability of Characteristics of Inshore Black Sea Upwelling on Basis of Satellite Monitoring Data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2008, no. 2, pp. 26-36 [in Russ.].
6. Vlasenko V.I., Stashchuk N.M., Ivanov V.A., Romanov A.S., Vnukov Yu.L. Research of the coastal upwelling effect on the dynamics of the oxygen and hydrogen

sulfide fields in the Black Sea shelf area. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2002, vol. 42, no. 3, pp. 348-355 [in Russ.].

7. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Stanichnyy S.V. Cyclonic eddies of upwelling origin near the southwestern tip of Crimea. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Observation and Remote Sensing], 1998, no. 3, pp. 83-88 [in Russ.].

8. Demyshev S.G., Kochergin S.V., Kochergin V.S. Postroenie polya techeniy v Chernom more na osnove vihrerazreshayushchey modeli s assimilyaciey klimaticheskikh poley temperatury i solenosti. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources], 2007, vol. 15, pp. 215-226 [in Russ.].

9. Dzhiganshin G.F., Polonskii A.B., Muzyleva M.A. Upwelling in the northwest part of the Black sea at the end of the Summer season and its causes. *Physical Oceanography*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 281-293.

10. Zatsepin A.G., Silvestrova K.P., Piotoukh V.B., Kuklev S.B., Podymov O.I. Observations of a cycle of intense coastal upwelling and downwelling at the research site of the Shirshov institute of oceanology in the Black sea. *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 188-199.

11. Ivanov V.A., Mihaylova E.N. Apvelling v Chernom more [Upwelling in the Black Sea]. Sevastopol', NPC "EKOSI-Gidrofizika", 2008, 92 p. [in Russ.].

12. Ivanov V.A., Yankovskiy A.E. Dlinnovolnovye dvizheniya v Chernom more Kiev, Naukova dumka, 1992, 112 p. [in Russ.].

13. Kubryakov A.A., Belokopytov V.N., Zatsepin A.G., Stanichny S.V., Piotukh V.B. The Black Sea Mixed Layer Depth Variability and Its Relation to the Basin Dynamics and Atmospheric Forcing. *Physical Oceanography* [e-journal], 2019, vol. 26, no. 5, pp. 397-413. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-397-413.

14. Mihaylova E.N., Muzyleva M.A. Vetrovye usloviya vzniknoveniya apvellinga v severo-zapadnoy chasti CHernogo morya i u YUBK. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Monitoring systems of environment], 2007, pp. 284-286 [in Russ.].

15. Mihaylova E.N., Muzyleva M.A., Polonskiy A.B. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' harakteristik apvellinga v severo-zapadnoy chasti CHernogo morya i u poberezh'ya Kryma v 2005-2008 gg. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources], 2009, vol. 20, pp. 160-170 [in Russ.].

16. Novikov A.A., Tuzhilkin V.S. Seasonal and regional variations of water temperature synoptic anomalies in the Northeastern coastal zone of the Black sea. *Physical Oceanography*, 2015, no 1, pp. 39-48 [in Russ.].

17. Polonskii A.B., Muzyleva M.A. Modern spatial-temporal variability of upwelling in the North-western Black Sea and off the Crimea coast. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography], 2016, no. 4, pp. 96-108 [in Russ.].

18. 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.].

19. *Sil'vestrova K.P.* Pribrezhnye apvellingi v severo-vostochnoy chasti Chernogo morya: svyaz's vetrom i techeniem: Dis. ... kand. geogr. nauk. Moscow, 2019 [in Russ.].

20. *Silvestrova K.P., Zatsepin A.G., Myslenkov S.A.* Coastal upwelling in the Gelendzhik area of the Black sea: effect of wind and dynamics. *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 469-477.

21. *Silvestrova K.P., Puzina O.S., Myslenkov S.A.* Wind upwelling forecast and its comparison with the thermistor chain data in the Black Sea (Utrish Reserve) in 2020. *The Seas of Russia: Year of Science and Technology in the RF – United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development*, 2021, pp. 316-318 [in Russ.].

22. *Stanichnaya R.R., Stanichny S.V.* Black Sea upwellings. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 195-207 [in Russ.].

23. *Shchurov S.V., Subbotin A.A., Troshchenko O.A., Bogdanova T.A.* i dr. Issledovanie apvellingov v rayone midiynoy fermi v buhte Laspi (Chernoe more). *Sovremennye rybohozyaystvennyye i ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo regiona: materialy VIII Mezhdunarodnoy konferencii. Kerch', 26-27 june 2013.*, 2013, pp.157-164 [in Russ.].

24. *Ostrovskiy A.G., Silvestrova K.P., Solov'ev D.M., Zatsepin A.G., Ocherednik V.V., Podymov O.I., Fedorov A.V.* Kvazi-inercionnye vnutrennie volny v apvellingah nad kontinental'nym sklonom severo-vostochnoy chasti Chernogo moray. 19-ya Mezhdunarodnaya konferencii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». *Elektronnyy sbornik materialov konferencii. Moscow, IKI RAN publ.*, 2021, p. 266. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a [in Russ.].

25. *Bakun A.* Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71. *NOAA Tech. Rep NMFS SSRF-671*. U.S. Dept. of Commerce, 1973.

26. *Brannigan L.* Intense submesoscale upwelling in anticyclonic eddies. *Geophysical Research Letters*, 2016, vol. 43, no. 7, pp. 3360-3369.

27. *Crise A., Kaberi H., Ruiz J., Zatsepin A., Arashkevich E., Giani M.* et al. A MSFD complementary approach for the assessment of pressures, knowledge and data gaps in Southern European Seas: The PERSEUS experience. *Marine pollution bulletin*, 2015, vol. 95, no 1, pp. 28-39.

28. *Gawarkiewicz G., Korotaev G.K., Stanichny S.V. et al.* Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along Crimean coast of the Black Sea. *Contin. Shelf Res.*, 1999, vol. 19, pp. 977-1005.

29. *Goryachkin Y.N.* Upwelling nearby the Crimea Western Coast. *Physical oceanography*, 2018, vol. 25, no. 5, pp. 368-379.

30. *Korotaev G., Oguz T., Dorofeyev V., Demyshev S., Kubryakov A., Ratner Y.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science. Ocean Science*, 2011, vol. 7, no. 5. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.

31. *Kriebel S.K.T., Brauer W., Eifler W.* Coastal upwelling prediction with a mixture of neural networks. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1998, vol. 36, no. 5, pp. 1508-1518. DOI: 10.1109/36.718854.

32. *Mizyuk A.I., Puzina O.S., Senderov M.V.* Accuracy of the reconstructed temperature in the Black Sea upper layer from nowcasting/forecasting systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, p. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012146.

33. Plattner S., Mason D.M., Leshkevich G. A., Schwab D.J., Rutherford E.S. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data. *Journal of Great Lakes Research*, 2006, vol. 32, no. 1, pp. 63-76.

34. Roiha P., Westerlund A., Haavisto N. Forecasting upwelling events with monthly ensembles for the eastern coast of the Gulf of Bothnia in the Baltic Sea. *Journal of Operational Oceanography*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 115-125.

35. Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G. Variability of wind-driven coastal upwelling in the North-eastern Black Sea in 1979-2016 according to NCEP/CFSR data. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, vol. 175, no. 11, pp. 4007-4015.

36. Sur H.Í., Özsoy E., Ünlüata Ü. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea. *Progress in Oceanography*, 1994, vol. 33, no. 4, pp. 249-302.

Поступила 22.12.2021; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 22.12.2021; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-108-127>

УДК 551.583:633.1(476)

Определение оптимальных сроков сева озимых культур на территории Беларуси в условиях современного изменения климата

***В.И. Мельник, Ю.А. Бондаренко,
Ю.А. Бровка, М.А. Хитриков***

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь
v.melnik2016@mail.ru*

На основании данных наблюдений гидрометеорологической сети Беларуси, полученных результатов исследований по кустистости и литературным данным уточнены критерии сумм температур для расчета оптимальных сроков сева озимых зерновых культур (пшеница, тритикале, рожь). Определены периоды сроков сева и средняя температура воздуха за эти периоды, обеспечивающие наиболее тесную связь между началом и окончанием сроков сева озимых зерновых культур. Получены уравнения связи дат начала и окончания сроков сева озимых зерновых культур по пунктам наблюдений в зависимости от средней температуры воздуха. Определены оптимальные сроки сева озимых зерновых культур за 2000–2020 гг. Получено распределение сумм активных температур осеннего периода (районирование) территории Беларуси. Разработан алгоритм учета прогнозируемой температуры воздуха на сентябрь для уточнения оптимальных сроков сева озимых зерновых культур в конкретном году.

Ключевые слова: изменение климата, суммы температур, даты прекращения вегетации, оптимальные сроки сева озимых зерновых культур

Determination of optimal sowing periods for winter crops on the territory of Belarus in the context of modern climate change

***V.I. Melnik, Yu.A. Bondarenko,
Yu.A. Brovka, M.A. Khitrykau***

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Belarus
v.melnik2016@mail.ru*

Criteria of cumulative temperatures for the calculation of optimal sowing periods for winter grain crops (wheat, triticale, rye) were specified on the basis of monitoring data from the hydrometeorological observation network, results of tilling capacity studies, and literary sources. The optimal sowing periods and average air temperature for these periods were determined, which provide the highest correlation between the beginning and end of the sowing periods for winter crops. The equations of the relationship between the dates of the beginning and end of winter grain crop sowing at the observation stations are derived depending on average air temperature. Optimal periods for sowing winter grain crops were determined for the period from 2000 to 2020. A distribution of cumulative

active temperatures (zoning) on the territory of Belarus for the autumn period was obtained. An algorithm for specifying optimal sowing periods for winter grain crops in a particular year on the basis of forecasted temperature for September was developed.

Keywords: climate change, cumulative temperatures, nongrowing season dates, optimal sowing periods for winter grain crops

Введение

Последствия изменения климата в Беларуси оказывают существенное влияние на сектор сельского хозяйства. В условиях изменения климата и увеличения теплообеспеченности осеннего периода требуется уточнение сроков сева озимых зерновых культур. Для озимых зерновых культур сроки сева устанавливаются с таким расчетом, чтобы растения до прекращения вегетации хорошо раскустились и приобрели закалку к низким температурам в зимний период. При отклонении сроков сева от оптимальных на 15–20 дней урожайность озимых в зависимости от почвенно-климатических условий района снижается на 15–30 % и более [11]. По другим оценкам, посев озимых до оптимальных сроков сева также ведет к снижению урожая в пределах 1–1,2 % за одни сутки по причине перерастания и более значительного повреждения посевов вредителями и болезнями из-за ухудшения условий перезимовки. Посев озимых после оптимальных сроков снижает урожайность в пределах 0,9–1 % за сутки опоздания из-за плохого осеннего кушения и ухудшения перезимовки [15]. Принято считать, что посев раньше оптимальных сроков приводит к большему недобору зерна, чем посев после них. В условиях Нечерноземной зоны подтверждено, что темпы развития озимых культур в основном определяет температура воздуха. Цель данного исследования – определить оптимальные сроки сева озимых зерновых культур на территории Беларуси в условиях современного изменения климата.

Материалы и методы исследований

Исходными данными для выполнения работы являются данные Государственного климатического кадастра, агрометеорологические наблюдения государственной сети гидрометеорологических наблюдений Республики Беларусь. Анализ материалов, построение рисунков, таблиц выполнено с применением программного пакета MS Office Excel. Для анализа пространственных особенностей изменения средних значений температуры и осадков в период потепления климата 2000–2020 гг. использован разработанный в Институте природопользования НАН Беларуси сеточный архив метеорологических данных государственной сети гидрометеорологических наблюдений Республики Беларусь с 1945 по 2020 год. Для расчета оптимальных сроков сева озимых зерновых культур на территории Беларуси (по полученным уравнениям связи дат начала и окончания сроков сева озимых зерновых культур по пунктам

наблюдений в зависимости от средней температуры за периоды) использована созданная в среде MATLAB специальная компьютерная программа.

Результаты и их обсуждение

Оценка теплообеспеченности осеннего периода на территории Беларуси в условиях современного изменения климата

В условиях современного потепления климата теплообеспеченность растений осенью улучшилась. Прирост тепла обусловлен не только повышением температурного режима, но и увеличением продолжительности осенней вегетации. Сроки перехода средней суточной температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$ осенью за период потепления сместились на более поздние. По средним многолетним данным за период 2000–2020 гг. почти на всей территории Брестской, в западной половине Гродненской и Гомельской областей переход среднесуточной температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$ сместился на первую декаду ноября. Позже всего данный переход осуществляется в крайних юго-западных районах Брестской области (рис. 1).

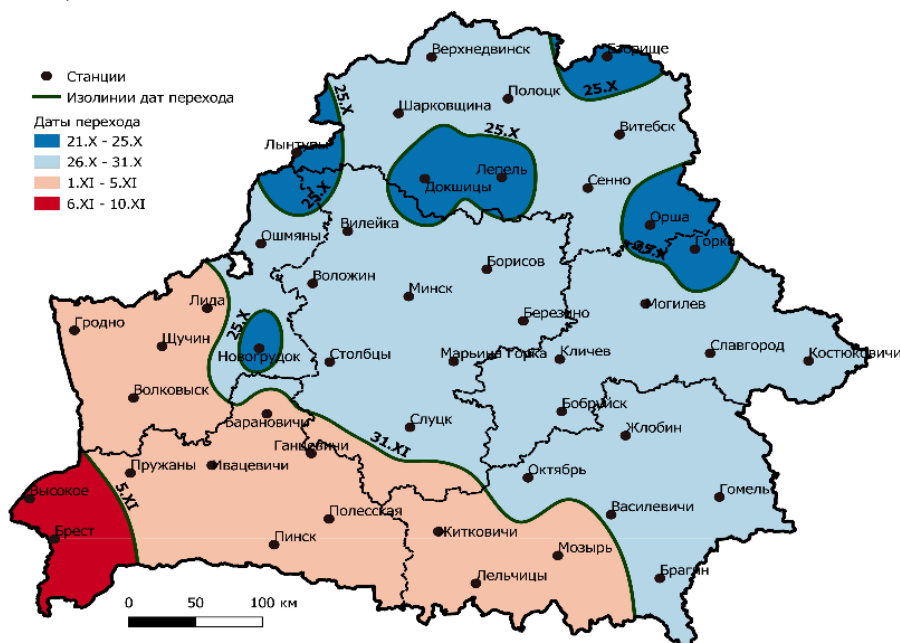


Рис. 1. Дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха осенью через $+5^{\circ}\text{C}$ за 2000–2020 гг.

Fig. 1. Date of sustainable transition of average daily temperature below $+5^{\circ}\text{C}$ in autumn in 2000–2020.

В сравнении с периодом до потепления (1960–1988 гг.), за последнее двадцатилетие переход среднесуточной температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$ осенью на большей территории Беларуси происходит в среднем на 2–4 дня, в Могилевской и на юго-западе Брестской области – на 5–7 дней позже.

Увеличение сумм температур в период осенней вегетации в условиях изменения климата более ярко выражено в последнем двадцатилетии. Суммы активных температур выше $+5^{\circ}\text{C}$ за период с 1 сентября до даты перехода среднесуточной температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$ за 2000–2020 гг. в сравнении с периодом до потепления на большей территории страны увеличились в среднем на 60–90 $^{\circ}\text{C}$, на юге Брестской области – на 100 $^{\circ}\text{C}$ [6]. Территория, на которой за период осенней вегетации накапливается 600 $^{\circ}\text{C}$ и более активных температур выше $+5^{\circ}\text{C}$, за последнее двадцатилетие заметно расширилась. В Гомельской, на большей части территории Брестской и в западной половине Гродненской области сумма активных температур выше $+5^{\circ}\text{C}$ за период с 1 сентября до даты перехода среднесуточной температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$ в среднем за 2000–2020 гг. составляет 600–650 $^{\circ}\text{C}$, в крайних южных и западных районах Брестской области – более 650 $^{\circ}\text{C}$, максимум в Бресте – 735 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 2).

Распределение сумм температур осеннего периода на территории Беларуси за 2000–2020 гг.

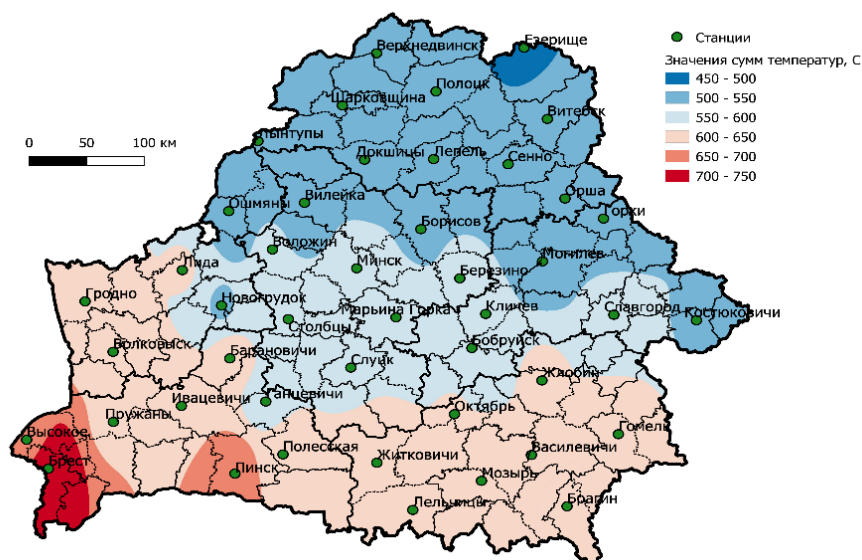


Рис. 2. Распределение сумм температур ($^{\circ}\text{C}$) осеннего периода за 2000–2020 гг. на территории Беларуси.

Fig. 2. Distribution of sums of temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for autumn period in Belarus in 2000–2020.

Приведенные данные распределения сумм температур осеннего периода могут быть использованы при планировании работ по севу озимых зерновых культур в районах, не имеющих пунктов наблюдений.

Оценки увлажнения осеннего периода территории Беларуси подробно изложены в [6]. В целом отмечается улучшение агрометеорологических условий осеннего периода для сева и последующего роста и развития озимых зерновых культур.

Вызвано это прежде всего ростом температур и увеличением количества осадков за сентябрь–октябрь. Начало сева и последующая вегетация озимых культур в осенний период проходит в целом при достаточном почвенном увлажнении, за исключением отдельных лет, когда сроки посева могут задерживаться из-за отсутствия продуктивной влаги в пахотном слое почвы.

Исследования условий кустистости озимых культур осенью по суммам температур при разных сроках сева

На многочисленных опытах показано, что степень кустистости растений зависит от многих агрономических причин: сроков и способов осеннего сева, качества семян, нормы высева и глубины заделки семян, типа почвы и уровня ее плодородия, а также от агрометеорологических условий – режимов влажности и температуры почвы [11]. В зависимости от погодных условий для достижения кустистости 1,0 требовались суммы температур от 360 до 460 °С. По данным пунктов наблюдений гидрометеорологической сети за 2010–2020 гг. кустистость растений озимой пшеницы в зависимости от сроков сева и погодных условий осеннего периода изменялась от 1,3 до 4,4 побегов на растение. Суммы температур за период от сроков сева на момент ухода растений в зимовку изменялись от 330 до 630 °С.

При этом следует отметить, что не всегда самой высокой кустистости соответствовали самые большие значения сумм температур воздуха, хотя тенденция увеличения числа побегов с ростом сумм температур воздуха имеет место [6] (рис. 3).

Оценка урожайности зерна озимой пшеницы в условиях Центральной зоны Беларуси в зависимости от сроков сева в опытах, проведенных в 2019–2020 гг. на опытном поле РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», показала, что наибольшей урожайности все сорта озимой пшеницы достигали при посеве их в начале третьей декады сентября. При этом кустистость растений перед уходом в зимовку изменялась от 1,0 до 2,6 и составила в среднем 1,7 [4].

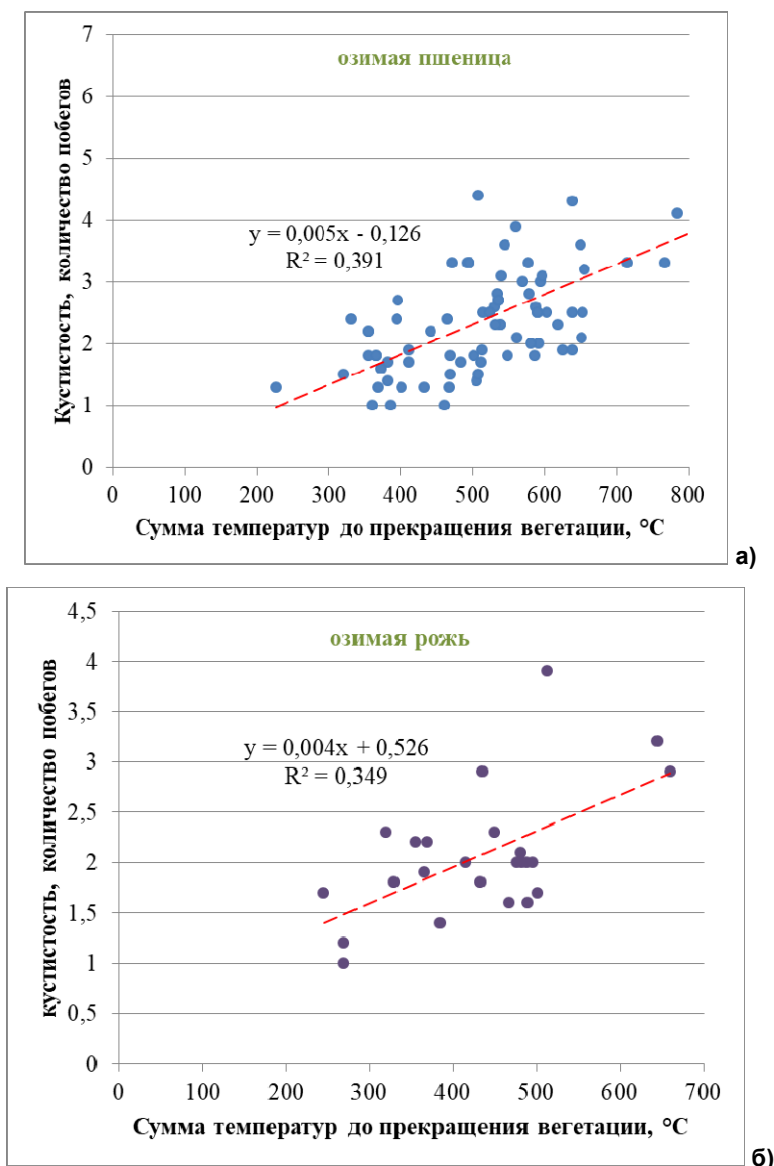


Рис. 3. Зависимость кустистости озимой пшеницы (а) от сумм температур (°C) перед уходом в зимовку (по данным пунктов наблюдений за 2010–2020 гг. и полевых опытов за 2019–2020 гг.) и озимой ржи (б) по данным пунктов наблюдений за 2010–2020 гг.

Fig. 3. Dependence of the bushiness of winter wheat (a) on the sum of temperatures (°C) before going into winter (according to data from observation points from 2010 to 2020 and field experiments in 2019–2020) and winter rye (b) (according to data from observation points from 2010 to 2020).

Обоснование сумм температур, необходимых для проведения оптимальных сроков сева озимых культур

Для расчета оптимальных сроков сева озимых зерновых культур, обеспечивающих 2–4 побега, ряд авторов используют суммы эффективных температур 200–300 °С (выше +5 °С) от посева до прекращения вегетации [1, 5, 7, 10], другие авторы используют суммы активных температур воздуха за указанный период [1–3, 9, 12, 14]. В Беларуси в последние годы оптимальные сроки начала и конца сева озимых зерновых культур установлены исходя из следующих показателей достижения сумм температур от посева до прекращения вегетации: озимая пшеница (580, 620–350 °С), озимая рожь (520–290 °С), тритикале (550–320 °С). При таких сроках сева растения могут достигнуть кустистости не менее четырех побегов [12, 13].

В нашем исследовании наряду с литературными данными использованы данные фенологических наблюдений за фазами развития озимых зерновых культур на наблюдательных участках пунктов гидрометеорологических наблюдений за период 1989–2020 гг. За указанный период выбраны годы со сроками сева озимых культур, обеспечивающими наступление кушения только в осенний период. По данным многолетних наблюдений за фазами развития, кушение озимых осенью наступало при достижении в среднем сумм температур от посева до прекращения вегетации 294–430 °С для озимой ржи и 359–479 °С для озимой пшеницы. Суммы температур, необходимые для начала кушения при поздних сроках сева, полученные по данным наблюдений за фазами развития в пунктах метеорологических наблюдений, хорошо согласуются с имеющимися литературными данными (290 °С для озимой ржи и 340–350 °С для озимой пшеницы). Объясняется это тем, что посев в более поздние сроки (окончание посева) происходит при умеренных температурах воздуха и достаточных запасах влаги.

На основании литературных источников, полученных результатов исследований по кустистости, данных пунктов наблюдений гидрометеорологической сети за фазами развития озимых культур осеннего периода, в данном исследовании приняты следующие критерии сумм активных температур: для озимой пшеницы – 465 °С (начало сева) и 350 °С для периода «посев – начало кушения» (конец сева), для озимого тритикале – 435–320 °С соответственно, озимой ржи – 405–290 °С. Принятые суммы температур обеспечивают не менее 2–3-х побегов к моменту прекращения вегетации озимых культур. С учетом дат прекращения вегетации и установленных критериев сумм температур, необходимых для достижения начала и массового кушения озимых, были рассчитаны средние многолетние сроки начала и окончания сева озимых культур за период 2000–2020 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Оптимальные сроки сева озимых зерновых культур по областям Беларуси за 2000–2020 гг.

Table 1. Optimal sowing terms for winter crops for administrative regions of Belarus in 2000–2020

Область	Озимые зерновые	В том числе		
		озимая пшеница	озимая тритикале	озимая рожь
Витебская	2–20 IX	2–16 IX	5–17 IX	7–20 IX
Минская	5–23 IX	5–19 IX	7–20 IX	10–23 IX
Гродненская	6–26 IX	6–22 IX	8–23 IX	10–26 IX
Могилевская	4–21 IX	4–17 IX	6–19 IX	8–21 IX
Брестская	10 IX–3 X	10–29 IX	12–30 IX	14 IX–3 X
Гомельская	9–28 IX	9–24 IX	11–25 IX	13–28 IX

Примечание. Суммы накопленных температур для озимой пшеницы – 465–350 °С, тритикале – 435–320 °С, озимой ржи – 405–290 °С.

Приведенные в табл. 1 оптимальные сроки сева озимых культур рассчитаны по многолетним данным. Планирование оптимальных сроков начала сева озимых культур требует возможности оценок и учета изменения температуры воздуха в осенний период в каждом конкретном году. Для этого были разработаны расчетные методы определения оптимальных сроков сева озимых культур.

Определение оптимальных сроков сева озимых по уравнениям

В 80-х годах прошлого столетия агрометеорологами Беларуси была установлена зависимость между оптимальной датой начала сева озимых культур и средней температурой воздуха за осенний период (с 25 августа по 25 октября), которая выражается полиномом второй степени [7]. В современный период изменения климата зависимость сроков сева озимых зерновых культур от средней температуры воздуха за период третья декада августа – третья декада сентября для северных районов Нечерноземной зоны – получена российскими учеными и хорошо описывается полиномом третьей степени [10]. Нами для расчета оптимальных сроков сева с помощью установленных критериев по суммам температур, необходимых для наступления кущения озимых культур осенью до даты прекращения вегетации, были рассчитаны ежегодные оптимальные сроки сева. Проведенный анализ материалов за 2000–2020 гг. (рассмотрено более 1000 годо-случаев; расчеты оптимальных сроков сева за каждый год велись с использованием компьютерной программы, созданной в среде MATLAB) помог установить наиболее тесную связь между средней

температурой воздуха за осенний период с 10 сентября по 15 ноября и оптимальным сроком начала сева озимых (озимой пшеницы) (рис. 4).

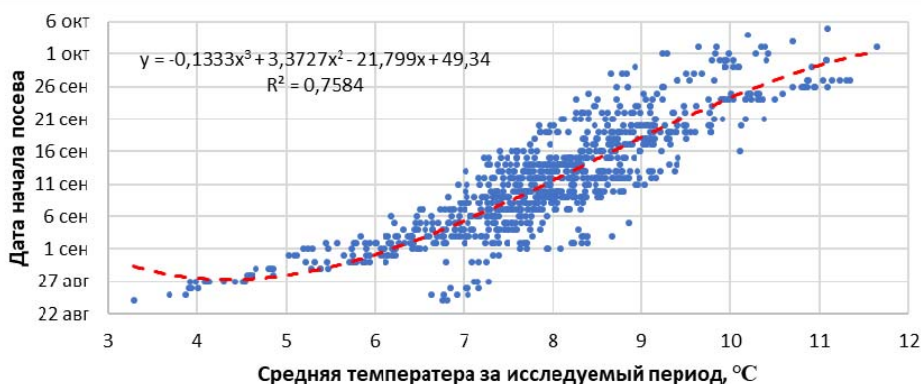


Рис. 4. Зависимость даты начала сева озимой пшеницы от средней температуры воздуха (°C) за период с 10 сентября по 15 ноября (по данным пунктов наблюдений) за 2000–2020 гг.

Fig. 4. Dependence of the beginning date of winter wheat sowing from average air temperature (°C) from September 10th to November 15th (according to the data from observation points) in 2000–2020.

Уравнение этой зависимости имеет следующий вид:

$$D = -0,13T^3 + 3,37T^2 - 21,8T + 49,34, \quad (1)$$

где D – искомая дата начала оптимального срока сева озимой пшеницы (количество дней, прошедших с 20 августа); T – средняя температура воздуха за текущий период (с 10 сентября по 15 ноября) на ближайшей станции.

Аналогичные зависимости были установлены между средней температурой воздуха за период с 10 сентября по 15 ноября и оптимальным сроком начала сева озимого тритикале, а также между средней температурой воздуха за период с 15 сентября по 15 ноября и оптимальным сроком начала сева озимой ржи (уравнения 2, 3):

$$D = -0,14T^3 + 3,5T^2 - 22,28T + 51,27, \quad (2)$$

$$D = -0,17T^3 + 3,87T^2 - 22,67T + 50,67, \quad (3)$$

где D – искомая дата начала оптимального срока сева озимого тритикале (2), озимой ржи (3), считается по количеству дней, прошедших с 20 августа); T – средняя температура воздуха за текущий период (с 10 сентября по 15 ноября для озимого тритикале и с 15 сентября по 15 ноября для озимой ржи) на ближайшей станции.

Коэффициенты детерминации (уравнения 1–3), соответственно, равны $R^2_{\text{пш}} = 0,758$, $R^2_{\text{тр}} = 0,731$, $R^2_{\text{рж}} = 0,763$, что характеризует

высокую зависимость дат начала сева от средних температур воздуха за указанные периоды.

Аналогичным способом были рассчитаны и оптимальные сроки окончания сева озимых культур. В качестве критериев были использованы следующие суммы температур: озимая пшеница – 350 °С, озимое тритикале – 320 °С, озимая рожь – 290 °С. Связь между средней температурой за период и оптимальными датами окончания сева озимых выражается уравнениями:

$$D = -0,21T^3 + 4,6T^2 - 26T + 58, \quad (4)$$

$$D = -0,19T^3 + 4,3T^2 - 24T + 55, \quad (5)$$

$$D = -0,22T^3 + 4,8T^2 - 26T + 60, \quad (6)$$

где D – искомая дата окончания срока сева озимой пшеницы (4); озимого тритикале (5); озимой ржи (6). Считается по количеству дней, прошедших с 20 августа); T – средняя температура воздуха за период с 20 сентября по 10 ноября.

Коэффициенты детерминации (уравнения 4–6), соответственно, равны $R^2_{\text{пш}} = 0,76$, $R^2_{\text{тр}} = 0,745$, $R^2_{\text{рж}} = 0,722$.

Установлена тесная связь между оптимальными датами начала и окончания сева озимых культур, которая выражается уравнением:

$$y = -0,0049x^2 + 1,225x + 8,104, \quad R^2 = 0,99, \quad (7)$$

где y – дата окончания сева; x – дата начала сева. Ошибка уравнения $E = \pm 1$ день.

Для удобства в работе связь дат начала и окончания сева озимых указана в виде графика на рис. 5.

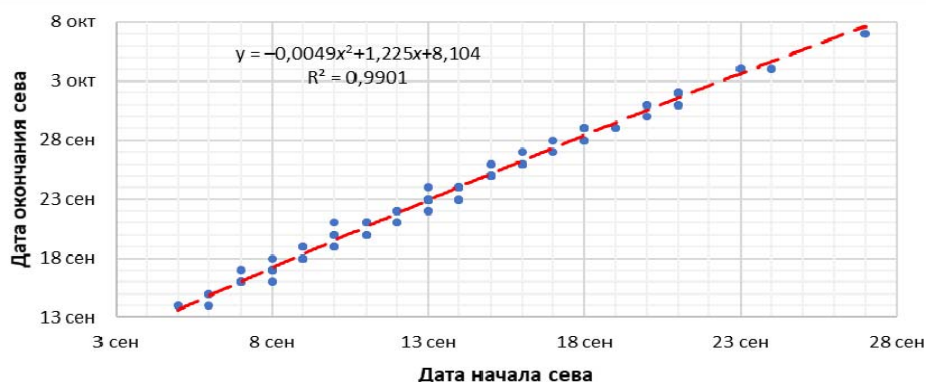


Рис. 5. Связь между сроками начала (x) и окончания (y) сева озимых культур на территории Беларуси.

Fig. 5. Dependence between beginning (x) and end (y) of sowing of winter crops in Belarus.

Как видно из графика, сев озимых должен проводиться в сжатые сроки, в основном в течение 10 дней. Зависимость дат окончания сева от дат его начала позволяет по графику определить дату окончания сева озимых без прогноза погоды (по дате начала сева и многолетней разнице дат начала и окончания сева) и не требует расчетов по уравнению по каждой культуре ежегодно.

В табл. 2 приведена средняя температура воздуха для каждого пункта наблюдений за периоды (10.09 – 15.11 для озимой пшеницы и озимого тритикале и 15.09 – 15.11 для озимой ржи), которая были использованы для расчетов дата начала и окончания сроков сева озимых культур.

Таблица 2. Средняя температура воздуха (°C) за периоды для расчетов сроков сева озимых культур

Table 2. Average air temperature (°C) for the periods used for calculations of sowing terms of winter crops

Пункт наблюдений	Срок сева озимых культур		
	Начало сева озимых		Окончание сева озимых
	пшеница, тритикале 10.09 – 15.11	рожь 15.09 – 15.11	пшеница, тритикале, рожь 20.09 – 10.11
Витебская область			
Езерище	6,92	6,47	6,49
Верхнедвинск	7,26	6,77	6,70
Полоцк	7,15	6,63	6,56
Шарковщина	7,55	7,05	7,01
Витебск	7,46	6,93	6,92
Лынтупы	7,20	6,72	6,67
Докшицы	7,22	6,75	6,71
Лепель	7,21	6,74	6,73
Сенно	7,42	6,95	6,99
Березинский заповедник	7,06	6,56	6,52
Орша	7,11	6,60	6,58
Минская область			
Вилейка	7,70	7,21	7,16
Борисов	7,55	7,02	7,00
Воложин	7,79	7,26	7,24
Минск	7,86	7,32	7,29
Березино	7,56	7,04	7,02
Марьина Горка	7,94	7,41	7,41
Столбцы	8,02	7,51	7,48
Слуцк	8,17	7,65	7,64

Пункт наблюдений	Срок сева озимых культур		
	Начало сева озимых		Окончание сева озимых
	пшеница, тритикале 10.09 – 15.11	рожь 15.09 – 15.11	пшеница, тритикале, рожь 20.09 – 10.11
Гродненская область			
Ошмяны	7,66	7,16	7,12
Лида	8,25	7,76	7,73
Гродно	8,46	7,98	7,96
Новогрудок	7,79	7,27	7,27
Волковыск	8,63	8,14	8,14
Могилевская область			
Горки	6,95	6,43	6,43
Мстиславль	7,46	6,89	6,82
Могилев	7,28	6,76	6,76
Кличев	7,59	7,09	7,07
Славгород	7,68	7,16	7,16
Костюковичи	7,44	6,93	6,93
Бобруйск	7,68	7,18	7,17
Брестская область			
Барановичи	8,33	7,82	7,82
Ганцевичи	8,26	7,78	7,76
Ивацевичи	8,71	8,22	8,20
Пружаны	8,61	8,13	8,12
Высокое	8,96	8,49	8,47
Полесская	8,25	7,76	7,76
Пинск	9,03	8,53	8,53
Брест	9,51	9,02	9,01
Гомельская область			
Чечерск	7,82	7,36	7,82
Жлобин	8,27	7,75	8,27
Октябрь	8,21	7,70	8,21
Гомель	8,57	8,03	8,57
Василевичи	8,31	7,81	8,31
Житковичи	8,54	8,04	8,54
Мозырь	8,67	8,13	8,67
Брагин	8,31	7,81	8,31
Лельчицы	8,55	8,11	8,55

С использованием уравнений 1–6 и данных табл. 2 рассчитаны оптимальные сроки начала и конца сева озимых культур (табл. 3, 4).

Таблица 3. Оптимальные сроки сева озимых культур за 2000–2020 гг. на территории Беларуси

Table 3. Optimal sowing terms of winter crops in Belarus in 2000–2020

Пункт наблюдений	Оптимальные сроки сева начала и конца сева озимых культур		
	пшеница	тритикале	рожь
Витебская область			
Езерище	5–14 IX	7–17 IX	9–19 IX
Верхнедвинск	7–16 IX	9–18 IX	11–21 IX
Полоцк	6–15 IX	8–17 IX	10–20 IX
Шарковщина	9–18 IX	11–20 IX	13–23 IX
Витебск	8–17 IX	10–20 IX	12–22 IX
Лынтупы	6–15 IX	9–18 IX	11–20 IX
Докшицы	7–16 IX	9–18 IX	11–21 IX
Лепель	7–16 IX	9–18 IX	11–21 IX
Сенно	8–18 IX	10–20 IX	13–23 IX
Березинский заповедник	6–15 IX	8–17 IX	10–19 IX
Орша	6–15 IX	8–17 IX	10–20 IX
Минская область			
Вилейка	10–19 IX	12–22 IX	14–24 IX
Борисов	9–18 IX	11–20 IX	13–23 IX
Воложин	10–19 IX	13–22 IX	15–25 IX
Минск	11–20 IX	13–23 IX	15–25 IX
Березино	9–18 IX	11–20 IX	13–23 IX
Марьина Горка	11–21 IX	14–23 IX	16–26 IX
Столбцы	12–21 IX	14–24 IX	16–27 IX
Слуцк	13–22 IX	15–25 IX	17–28 IX
Гродненская область			
Ошмяны	9–19 IX	12–21 IX	14–24 IX
Лида	13–23 IX	16–26 IX	18–29 IX
Гродно	15–25 IX	17–27 IX	20–30 IX
Новогрудок	10–20 IX	13–22 IX	15–25 IX
Волковыск	16–26 IX	18–29 IX	21–2 X
Могилевская область			
Горки	5–14 IX	7–16 IX	9–19 IX
Мстиславль	8–16 IX	10–19 IX	12–22 IX
Могилев	7–16 IX	9–18 IX	11–21 IX
Кличев	9–18 IX	11–21 IX	13–24 IX
Славгород	9–19 IX	12–22 IX	14–24 IX
Костюковичи	8–17 IX	10–20 IX	12–22 IX
Бобруйск	9–19 IX	12–22 IX	14–24 IX

Пункт наблюдений	Оптимальные сроки сева начала и конца сева озимых культур		
	пшеница	тритикале	рожь
Брестская область			
Барановичи	14–24 IX	16–26 IX	19–29 IX
Ганцевичи	13–23 IX	16–26 IX	18–29 IX
Ивацевичи	16–26 IX	19–29 IX	21 IX–2 X
Пружаны	16–26 IX	18–29 IX	21 IX–2 X
Высокое	18–28 IX	20 IX–1 X	23 IX–4 X
Полесская	13–24 IX	16–26 IX	18–29 IX
Пинск	18–29 IX	21 IX–1 X	23 IX–4 X
Брест	21 IX–1 X	24 IX–4 X	27 IX–7 X
Гомельская область			
Чечерск	10–21 IX	13–23 IX	15–26 IX
Жлобин	13–23 IX	16–26 IX	18–29 IX
Октябрь	13–23 IX	15–26 IX	18–28 IX
Гомель	15–25 IX	18–28 IX	20 IX–1 X
Василевичи	14–24 IX	16–26 IX	19–29 IX
Житковичи	15–25 IX	18–28 IX	20 IX–1 X
Мозырь	16–26 IX	18–29 IX	21 IX–2 X
Брагин	14–23 IX	16–26 IX	18–29 IX
Лельчицы	15–26 IX	18–29 IX	21 IX–2 X

Таблица 4. Оптимальные сроки начала и конца сева озимых зерновых культур за 2000–2020 гг. по областям Беларуси

Table 4. Optimal sowing terms of winter grain crops in 2000–2020 for administrative regions of Belarus

Область	Озимые зерновые	В том числе		
		озимая пшеница	озимая тритикале	озимая рожь
Витебская	5–23 IX	5–18 IX	7–20 IX	9–23 IX
Минская	9–28 IX	9–22 IX	11–25 IX	13–28 IX
Гродненская	9 IX–2 X	9–26 IX	12–29 IX	14 IX–2 X
Могилевская	5–24 IX	5–19 IX	7–22 IX	9–24 IX
Брестская	13 IX–7 X	13 IX–1 X	16 IX–4 X	18 IX–7X
Гомельская	10 IX–2 X	10 IX–26 IX	13 IX–29 IX	15 IX–2 X

Примечание. Суммы накопленных температур для озимой пшеницы 465–350 °С, тритикале 435–320 °С, озимой ржи 405–290 °С.

Рассчитанные нами сроки сева озимых культур являются более точными по сравнению с данными, указанными в табл. 1, и хорошо согласуются с датами начала и окончания сроков сева озимых, обеспечивающих с 75-процентной вероятностью осеннее кущение растений, указанных в рабочем плане проведения осенних полевых работ в сельскохозяйственных организациях республики в 2021 году и в последних исследованиях РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» [8].

Для определения начала оптимального сева в конкретном году надо знать среднюю температуру за осенний период по близлежащему пункту наблюдений (см. табл. 2) и прогноз погоды на сентябрь, который дается в конце августа. На октябрь и ноябрь прогноза нет, поэтому средняя температура за осенний период будет складываться из прогнозируемой температуры воздуха на сентябрь и средней многолетней за октябрь и ноябрь. Температура воздуха в сентябре прогнозируется на 0,5 °C, 1 °C, 1,5 °C, 2 °C, 3 °C, 4 °C выше нормы или на 0,5 °C, 1 °C, 1,5 °C, 2 °C, 3 °C, 4 °C ниже нормы. По табл. 5 рассчитываем поправку к средней температуре за осенний период.

Таблица 5. Таблица расчета поправок температуры воздуха (°C) для уточнения сроков начала сева озимых культур по прогнозу температуры на сентябрь в конкретном году

Table 5. Table for calculation of air temperature (°C) corrections for specification of the beginning of sowing terms of winter crops according to the temperature forecast for September in a given year

Увеличение (+), уменьшение (–) температуры воздуха по прогнозу в сентябре, °C	Поправка средней температуры воздуха для озимой пшеницы и тритикале, °C	Поправка средней температуры воздуха для озимой ржи, °C
+0,5	0,16	0,13
+1,0	0,31	0,26
+1,5	0,47	0,39
+2,0	0,63	0,52
+3,0	0,94	0,77
+4,0	1,25	1,03
–0,5	–0,16	–0,13
–1,0	–0,31	–0,26
–1,5	–0,47	–0,39
–2,0	–0,63	–0,52
–3,0	–0,94	–0,77
–4,0	–1,25	–1,03

В табл. 6 приведены даты начала сева озимых культур в зависимости от температуры воздуха за период осенней вегетации (температура воздуха приводится для каждой культуры построчно в (°C) на даты с 1 по 30 сентября).

Таблица 6. Выбор сроков начала сева озимых культур в зависимости от температуры воздуха (°C) в период осенней вегетации

Table 6. Selection of the beginning of sowing terms of winter crops depending on air temperature (°C) in the period of autumn vegetation

Культура	Дата начала сева, температура воздуха, (°C)									
	1 сен	2 сен	3 сен	4 сен	5 сен	6 сен	7 сен	8 сен	9 сен	10 сен
Пшеница	6,08	6,29	6,49	6,68	6,86	7,04	7,20	7,37	7,53	7,68
Рожь	4,38	4,83	5,12	5,37	5,59	5,79	5,97	6,15	6,32	6,48
Тритикале	5,61	5,86	6,08	6,29	6,48	6,66	6,84	7,01	7,17	7,33
	11 сен	12 сен	13 сен	14 сен	15 сен	16 сен	17 сен	18 сен	19 сен	20 сен
Пшеница	7,84	7,99	8,14	8,29	8,44	8,60	8,75	8,90	9,05	9,21
Рожь	6,64	6,79	6,94	7,09	7,23	7,38	7,52	7,66	7,81	7,95
Тритикале	7,48	7,64	7,79	7,94	8,09	8,24	8,38	8,53	8,68	8,83
	21 сен	22 сен	23 сен	24 сен	25 сен	26 сен	27 сен	28 сен	29 сен	30 сен
Пшеница	9,36	9,52	9,69	9,86	10,03	10,21	10,40	10,61	10,82	11,07
Рожь	8,10	8,24	8,39	8,54	8,69	8,85	9,01	9,18	9,36	9,54
Тритикале	8,98	9,14	9,29	9,45	9,61	9,78	9,96	10,14	10,33	10,54

**Алгоритм расчета оптимальных сроков сева озимых
зерновых культур в зависимости от прогноза
температуры воздуха на сентябрь**

1. Выбираем пункт наблюдений и культуру, для которой необходимо определить дату начала сева.

2. По табл. 2 находим среднюю температуру воздуха за указанный период для данной культуры по указанному пункту наблюдений.

3. По табл. 5 в зависимости от прогнозируемой температуры на сентябрь находим поправку средней температуры воздуха. Суммируем поправку и среднюю температуру, определенную в предыдущем пункте и получаем расчетную температуру периода.

4. По табл. 6, в зависимости от расчетной температуры за период осенней вегетации, находим оптимальную дату начала сева. В случае, если значение расчетной температуры находится между градациями, приведенными в табл. 6, в качестве даты начала сева следует принимать значение, соответствующее меньшей градации температуры. Например, при расчетном значении температуры 10,2 °C, датой начала сева озимой пшеницы будет 25 сентября, а озимой тритикале – 28 сентября.

Можно прогнозируемую дату начала сева конкретной культуры по указанному пункту по полученной расчетной температуре рассчитать по уравнениям (1–3).

Табл. 3 содержит сведения о датах начала и окончания сроков сева озимых культур, рассчитанным по пунктам наблюдений, примерно 50 районов. Для остальных районов, не имеющих пунктов наблюдений, рекомендуется использовать данные по близлежащим станциям. Для удобства необходимо использовать данные распределения сумм температур осеннего периода (с 1 сентября до даты прекращения вегетации осенью) за период 2000–2020 гг., приведенные на рис. 2. Административные районы и отдельные пункты, попадающие в границы одних сумм температур, наиболее близки по теплообеспеченности и, соответственно, по срокам начала сева озимых культур. Сроки сева озимых культур в каждой области могут отличаться в пределах 1–3 дней. В хозяйствах для полей и участков с выраженным рельефом нужно вводить соответствующие поправки к срокам сева озимых с учетом экспозиции склонов, рельефа местности. На пологих северных склонах (крутизна меньше 10°), получающих меньше тепла, чем ровное место, сев следует начинать на 3–4 дня раньше, чем указано в табл. 6, а на южных склонах той же крутизны, наоборот, можно сеять на 3–4 дня позднее [7]. Чем разнообразнее почвенно-климатические условия области (района), тем продолжительнее оптимальные сроки сева озимой культуры в пределах области (района).

Заключение

1. На основании литературных источников, а также полученных результатов исследований по кустистости, мониторинговых данных пунктов наблюдений гидрометеорологической сети установлены критерии сумм положительных температур для озимых зерновых культур (пшеницы, тритикале, ржи), обеспечивающих 2–3 побега: для озимой пшеницы – 465°C (начало сева) и 350°C для периода «посев – начало кущения» (конец сева), для озимого тритикале – $435\text{--}320^\circ\text{C}$ и озимой ржи $405\text{--}290^\circ\text{C}$.

2. Определены периоды для каждой культуры и средняя температура воздуха за эти периоды, обеспечивающие наиболее тесную связь между началом и окончанием сроков сева озимых зерновых культур.

3. Получены уравнения связи для определения дат начала и окончания сева озимых культур по пунктам наблюдений в зависимости от средней температуры за периоды наиболее тесной зависимости, позволяющие определять оптимальные сроки начала и окончания сева озимых зерновых культур.

4. Определены оптимальные сроки сева озимых зерновых культур по пунктам наблюдений и административным областям на территории Беларуси.

5. Приведен алгоритм расчета оптимальных сроков сева с учетом прогноза температуры воздуха на сентябрь.

6. Выполнено распределение сумм активных температур осеннего периода (районирование) территории, что позволяет выделять административные районы и отдельные пункты, наиболее близкие по срокам начала сева озимых зерновых культур.

Настоящая работа выполнена в рамках Плана научных исследований и разработок общегосударственного, отраслевого назначения, направленных на научно-техническое обеспечение деятельности Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь на 2021 год.

Список литературы

1. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 808 с.
2. Елисеев С.Л. О сроках посева озимой ржи в Предуралье // Аграрный вестник Урала. 2011. № 1 (80). С. 5-6.
3. Елисеев С.Л., Вершинина Т.С. Необходимость уточнения срока посева озимой ржи // Пермский аграрный вестник. 2017. № 1 (17). С. 32-38.
4. Кот В.В., Сацюк И.В., Гордей С.И., Шанбанович А.Ю., Лученок А.Н., Ардашникова А.Э., Трушко В.Ю. Урожайность озимой пшеницы в зависимости от сроков сева // Земледелие и селекция в Беларуси. Сборник научных трудов. 2021. Вып. 57. С. 77-87.
5. Мельник В.И. Влияние изменения климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность сельскохозяйственных культур Беларуси: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Минск: Инст. проблем использ. природ. рес. и экологии, 2004. 21 с.
6. Оценка изменений агроклиматических ресурсов территории Республики Беларусь в период осеннего сева сельскохозяйственных культур: отчет по НИР (заключительный) / Отв. исполнитель В.И. Мельник; Минск: Институт природопользования НАН Беларуси, 2021. 64 с. № госрегистрации 20212460.
7. Пятовская Л.К. Агрометеорологическое обоснование сроков сева. Минск: Ураджай, 1977. 104 с.
8. Рабочий план проведения осенних полевых работ в сельскохозяйственных организациях республики в 2021 году. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mshp.gov.by/documents/plant/rabochiy_plan_osennego_seva_v_21_g2.pdf.
9. Саранин К.И. Озимая пшеница. М.: Московский рабочий, 1973. 151 с.
10. Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. О сроках сева озимых культур в условиях изменения климата и их прогнозирование в Приволжском федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 175-193.
11. Федосеев А.П. Агротехника и погода. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 240 с.
12. Шашко К.Г., Привалов Ф.И., Холодинский В.В., Волкова А.И., Сацюк И.В., Счастливая А.А., Акулич И.С., Кулаева А.А. Ретроспективный анализ оптимальности сроков сева озимых зерновых в Республике Беларусь за 1996-2011 годы в связи с потеплением климата // Земляробства і ахова раслін. 2012. № 3. С. 6-8.

13. Шашко К.Г., Привалов Ф.И., Холодинский В.В. Оптимизация сроков сева озимых зерновых культур в связи с потеплением климата Беларуси // Земледелие и селекция Беларуси. 2012. Вып. 50. С. 179-187.

14. Шкляр А.Х. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве Беларуси. Минск: Вышэйшая школа, 1973. 430 с.

15. Шпаар Д., Адам Л., Гинапп Х. и др. Зерновые культуры; под общ. ред. Д. Шпаара. Минск: ФУАИинформ, 2000. 442 с.

References

1. Gringof I., Kleshchenko A. Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. Tom 1. Potrebnost' sel'skohozyaystvennykh kul'tur v agrometeorologicheskikh usloviyakh i opasnye dlya sel'skohozyaystvennogo proizvodstva pogodnye usloviya [Bases of agricultural meteorology. Vol. 1. Need of crops for agrometeorological conditions and dangerous weather conditions for agriculture]. Obninsk: RIHMI-WDC Publ., 2011, 808 p. [in Russ.]

2. Eliseyev S. O srokah poseva ozimoy rzhi v Predural'ye [On rye sowing terms in Cis-Ural region]. *Agrarny vestnik Urala [Agrarian bulletin of the Urals]*. 2011, vol. 80, no. 1, pp. 5-6 [in Russ]

3. Eliseev S., Vershinina T. Neobhodimost' utochneniya sroke poseva ozimoy rzhi [Necessity to specify the sowing time of winter rye]. *Permiski agrarnyy vestnik [Perm agrarian journal]*, 2017, no. 1 (17), pp. 32-38 [in Russ.].

4. Kot V., Satsyuk I., Gordey S., Shanbanovich A., Luchenok A., Ardashnikova A., Trushko V. Urozhaynost' ozimoy pshenitsy v zavisimosti ot srokov seva [Winter wheat yield in relation to sowing dates]. *Zemlyedeliye i selektsiya v Belarusi [Agriculture and selection in Belarus]*, 2021, vol. 57, pp. 77-87 [in Russ.].

5. Melnik V. Vliyaniye izmeneniya klimata na agroklimaticheskie resursy i produktivnost' sel'skohozyaystvennykh kul'tur v Belarusi [Effect of climate change on agroclimatic resources and productivity of crops in Belarus]: candidate of geographical sciences dissertation abstract. Minsk: Institute of, Institut problem ispol'zovaniya prirodnkh resursov i ekologii. Minsk, 2004, 21 p. [in Russ.]

6. Otsenka izmeneniy agroklimaticheskikh resursov territorii Respubliki Belarus' v period osennego seva sel'skohozyaystvennykh kul'tur: otchyot po NIR (zaklyuchitel'nyy) [Estimation of agroclimatic resource changes on the territory of Republic of Belarus during autumn sowing period of crops: final research report], No. of state registration: 20212460. Minsk: Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi Publ. [Institute for Environmental Management of NAS of Belarus Publ.], 2021, 64 p. [in Russ.]

7. Pyatovskaya L. Agrometeorologicheskoye obosnovaniye srokov seva [Agrometeorological basis of sowing terms]. Minsk: Uradszhay Publ. [Harvest Publ.], 1977, 104 p. [in Russ.]

8. Rabochiy plan provedeniya osennih polevykh rabot v sel'skohozyaystvennykh organizatsiyakh respubliki v 2021 godu [Work plan of autumn field works in agricultural organizations of the republic in 2021]. Available at: https://mshp.gov.by/documents/plant/rabochiy_plan_osennego_seva_v_21_g2.pdf. [in Russ.]

9. Saranin K. Ozimaya pshenista [Winter wheat]. Moscow, Moskovskiy rabochiy publ. [Moscow Worker Publ.], 1973, 151 p. [in Russ.]

10. *Strashnaya A., Maksimenkova T., Chub O.* O srokah seva ozimyh kul'tur v usloviyah izmeneniya klimata i ih prognozirovanie v Privolzhskom federal'nom okruge [On sowing terms of winter crops under the conditions of climate change and their forecast in Volga Federal District]. *Trydy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of Russia]*. 2011, vol. 345, pp. 175-193 [in Russ.]
11. *Fedoseev. A.* Agrotehnika i pogoda [Agricultural technology and weather]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. [Hydrometeorological Publication], 1979, 240 p. [in Russ.]
12. *Shashko K., Privalov F., Holodinskiy V., Volkova A., Satsyuk I., Schastnaya A., Akulich I., Kulayeva A.* Retrospektivnyy analiz optimal'nosti srokov seva ozumykh zernovykh v Respublike Belarus' za 1996–2011 gody v svyazi s potepleniem klimata [Retrospective analysis of winter grain crops optimum sowing periods in the Republic of Belarus for 1996–2011 period in connection with climate warming]. *Ziemliarobstva i achova raslin [Agriculture and plant protection]*, 2012, no. 3, pp. 6-8 [in Russ.]
13. *Shashko K., Privalov F., Holodinskiy V.* Optimizatsiya srokov seva ozimyh zernovykh kul'tur v svyazi s potepleniem klimata Belarusi [Optimization of sowing terms of winter cereal crops due to climate warming in Belarus]. *Zemlyedeliye i selektsiya v Belarusi [Agriculture and selection in Belarus]*, 2012, vol. 50, pp. 179-187 [in Russ.]
14. *Shklyar A.* Klimaticheskie resursy Byelorussii i ih ispil'zovanie v sel'skom hozyaystve [climatic resources of Belarus and their application in agriculture]. Minsk: Vysheyshaya shkola publ. [Higher school Publ.], 1973, 430 p. [in Russ.]
15. *Shpaar D., Adam L., Ginapp C. et al.* Zernovye kul'tury [Grain crops]; edited by D. Shpaar. Minsk: FUAInform, 2000, 442 p. [in Russ.]

Поступила 25.02.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 25.02.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-128-164>

УДК 551.5

Анализ опыта метеорологического обеспечения спортивных и культурно-массовых мероприятий

Т.Г. Дмитриева, Е.В. Васильев, В.И. Лукьянов

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

Проведен анализ опыта метеорологического обеспечения международных спортивных и культурно-массовых мероприятий на базе созданной концепции Росгидромета, включающей комплексную систему разработки высокодетализированных прогнозов погоды, основанных на применении результатов численных расчетов моделей с высоким пространственно-временным разрешением. Показано, что разработанная концепция применима к метеорологическому обеспечению Москвы как мегаполиса. Концепция находится в стадии развития и адаптации к любому мероприятию, проводимому на открытом воздухе. Особое внимание уделено диагностике опасных явлений погоды с использованием дистанционного зондирования атмосферы и данных наблюдательных станций. Актуальность полученных результатов подтверждается использованием представленных наработок при подготовке проведения метеорологического обеспечения XXXII Всемирной летней Универсиады 2023 года в г. Екатеринбург.

Ключевые слова: спортивные и культурно-массовые мероприятия, специализированный и высокодетализированный прогноз погоды, определяющие факторы метеорологического обеспечения, локальные метеоофисы, концепция метеорологического обеспечения мероприятий, комплексная система прогноза погоды, специализированный веб-интерфейс, модели высокого пространственно-временного разрешения

Analyzing experience of weather services for sports and cultural events

T.G. Dmitrieva, E.V. Vasil'ev, V.I. Luk'yanov

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

The experience of weather services for international sports and cultural events is analyzed on the basis of the developed Roshydromet concept, which includes a comprehensive system for the development of high-detail weather forecasts based on the application of the results of numerical weather prediction with high spatial and temporal resolution. It is shown that the developed concept is applicable to weather services for Moscow as a megalopolis. The concept is under development and adaptability of use to any outdoor event. Special attention is paid to the diagnosis of severe weather events using remote sensing of the atmosphere and observations at weather stations. The relevance of the

results is confirmed by the application of the presented approaches during the preparation of weather services for the 2023 FISU Summer World University Games in Yekaterinburg.

Keywords: sports and cultural events, specialized high-detail weather forecast, key factors of weather services, local weather offices, the concept of weather services, integrated weather forecasting system, specialized web interface, high-resolution models.

Введение

Большое внимание в мире уделяется гидрометеорологическому обеспечению массовых спортивных и специальных мероприятий, проводимых на открытом воздухе, таких как Олимпийские игры, Универсиады, международные военные Игры, Чемпионаты мира и Европы по футболу, различные фестивали и т. п., а в некоторых странах (например, в Китае) и проведению военных парадов. Такие мероприятия являются сильно метеозависимыми и уязвимыми от погодных условий и требуют очень точного прогноза конкретных параметров предстоящей погоды, и особенно времени и силы возможных опасных явлений. Современные требования, предъявляемые к метеорологическому обеспечению различных отраслей экономики, транспорта, общественно-политических и спортивных мероприятий, требуют новых подходов к решению задач их метеорологического обеспечения.

Для российских специалистов задачи по гидрометеорологическому обеспечению массовых спортивных мероприятий стали актуальными в первую очередь в связи с обеспечением XXII Олимпийских и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи, а затем ЧМ-2018 в России, XXIX Всемирной зимней Универсиады 2019 года в г. Красноярске.

В настоящее время накоплен значительный опыт проведения гидрометеорологического обеспечения в России крупных спортивных соревнований и культурно-массовых мероприятий в мегаполисе на примере Москвы, который позволяет систематизировать современные требования к метеобеспечению подобных мероприятий и предложить общие принципы решения этих задач для дальнейшего их использования.

Особые требования к специализированным прогнозам

К такому виду специализированных прогнозов предъявляются особые требования: прогноз конкретных элементов в определенных условиях рельефа местности, высокая точность и детализация прогнозов по месту и времени, частое обновление, возможность заблаговременно прогнозировать опасные явления для принятия решений судейской коллегией, быстрота реагирования на условия и виды погоды для возможного предотвращения и смягчения последствий опасных явлений.

Разработка специализированных прогнозов, и особенно штормовых предупреждений опасных явлений, в том числе конвективных, имеет ряд определенных сложностей:

- возрастающая с каждым годом метеозависимость и метеоуязвимость современного общества и его социальных сфер (быстрые темпы развития экономики и общества, большое скопление населения в городах, большое количество разнообразного транспорта, проведение массовых крупномасштабных мероприятий в городах);

- повышение общественного спроса на прогнозы погоды и их точность, а значит и наличие обратной связи с потребителями;

- для условий конвективной, взрывной погоды сложность самого прогноза опасных конвективных явлений и их мониторинга;

- ограниченное время для изучения локальных особенностей региона проведения мероприятия и адаптации к ней моделей.

Все эти особенности ставят перед прогностической службой страны задачи повышения точности, заблаговременности и конкретности прогнозов, особенно опасных конвективных явлений, способных локально наносить ощутимый ущерб народному хозяйству и населению, срывать проведение запланированных массовых специализированных мероприятий, а также отработки взаимодействия с пользователями метеоинформации, в выпуске необходимой и востребованной специализированной метеорологической продукции, в большей популяризации метеоуслуг для населения и вниманию к уточнению прогнозов, в конкретной специальной подготовке метеорологов, способных в ограниченные сроки адаптироваться к прогнозированию в различных географических регионах.

Перед Росгидрометом со времен подготовки к проведению Олимпийских и Паралимпийских игр в Сочи в 2014 г. были поставлены задачи обеспечения гидрометеорологической безопасности массовых международных соревнований и внутренних общественных и спортивных мероприятий, проводимых на территории России, таких как Чемпионаты мира по горнолыжному спорту, Чемпионат мира по футболу в 2018 г., XXIX Всемирная зимняя Универсиада-2019 в Красноярске. Подготовка и проведение Олимпийских и Паралимпийских игр в Сочи в 2014 г. дали Росгидромету колоссальный опыт по организации массовых мероприятий на открытом воздухе, какого не было до сих пор. Правда, в 1980 г. в Москве проводились летние Олимпийские игры, но за прошедшие 30 лет уровень науки, техники и требований, предъявляемых к организации таких мероприятий, значительно вырос, что сказалось на качестве и детализации требуемой заказчиком прогностической и фактической информации. В связи с этим на основе проводимых мероприятий по подготовке к Олимпиаде Сочи-2014 Росгидрометом впервые в России была разработана концепция гидрометеорологического обеспечения Игр, которая развивалась и совершенствовалась по мере дальнейшего участия в обеспечении XXIX Всемирной зимней Универсиады 2019 года в г. Красноярске. Все большее участие Росгидромета в обеспечении спортивных и культурно-массовых мероприятий различного уровня требует развития этого направления и создания общей методологии обеспечения

метеорологической безопасности подобных мероприятий, включающей в себя детальное описание системы прогнозирования и возможности предупреждения опасных метеорологических явлений круглогодично: среднесрочный прогноз на 4–10 дней; краткосрочный прогноз на 1–3 дня; раннее предупреждение до нескольких часов; непрерывный мониторинг.

Авторы рассматривают полученные на основе предыдущего опыта практически действующие общие принципы и рекомендации по метеорологическому обеспечению спортивных и культурно-массовых мероприятий, разработке сверхкраткосрочного прогноза и прогноза текущей погоды в различных географических и сезонных условиях, в том числе в условиях горной местности, возможные подходы к уменьшению рисков от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений путем их успешного прогнозирования.

Актуальные проблемы и ключевые позиции метеорологического обеспечения спортивных и культурно-массовых мероприятий

Метеорологическое обеспечение массовых мероприятий различного характера (спортивных, городских культурно-массовых и т. п.) имеет в своей основе общую методологию и общие требования высокого уровня к прогнозам погоды:

- прогноз специальных элементов (например, высоты нижней границы облачности для спортивных соревнований в горной местности, прирост свежевыпавшего снега для соревнований по зимним видам спорта);
- высокую фиксированную точность прогноза (для определенного места и времени);
- своевременность (быстрое и частое обновление прогноза, чтобы выдать раннюю информацию для заблаговременного принятия решения);
- быстрое реагирование на изменение погодных условий для смягчения последствий возможных опасных явлений.

Эти требования можно наглядно представить в виде схемы (рис. 1).

Такие высокие требования к прогнозированию погодных условий порождают некоторые сложности решений этих вопросов:

- сложность мониторинга и прогнозирования взрывной конвективной погоды;
- сильное влияние погоды на современное общество, которое имеет тенденцию к увеличению численности населения, количества автомобилей, более масштабным мероприятиям в городах, что повышает его уязвимость перед погодными явлениями;
- увеличение ожиданий общественности относительно точности прогноза погоды и реагирования; употребление в общих прогнозах погоды терминов “местами” требует уточнения этих “мест”;
- увеличение ответственности за потери, связанные с неточными прогнозами;

– противоречие между ожиданиями общественности в отношении точности прогнозов погоды и существующими возможностями прогнозирования;

– потенциал мониторинга и предупреждения о метеорологических опасных явлениях погоды нуждается в дальнейшем совершенствовании;

– учет сезонности проведения метеорологического обеспечения, который сказывается на различии характеристик прогнозируемых метеоэлементов, видах опасных и неблагоприятных метеорологических явлений, способных повлиять на проведение соревнований и массовых мероприятий или затруднить деятельность различных служб: для зимнего сезона – прогноз высоты свежевыпавшего снега и фазы осадков, гололедно-изморозевые явления, переход температуры воздуха через ноль в сторону отрицательных значений, а в горных кластерах, окруженных высокими (выше 1500 м) горами, возможное резкое повышение температуры воздуха из-за влияния фенового эффекта [11, 14]; для летнего сезона – опасные конвективные явления (ливни, грозы, шквалы, град).



Рис. 1. Требования, предъявляемые к высокодетализированным прогнозам погоды для метеорологического обеспечения различных мероприятий.

Fig. 1. Requirements for high-detail weather forecasts to provide weather services for various events.

В последние годы в связи с изменением климата и быстрым развитием экономики и общества возрастает метеорологическое влияние на сферу общественной безопасности. Соответственно, метеослужба должна предоставлять постоянно развивающийся и обновляющийся метеосервис с необходимой потребителю информацией в конкретное время, что можно наглядно представить в виде схемы (рис. 2).

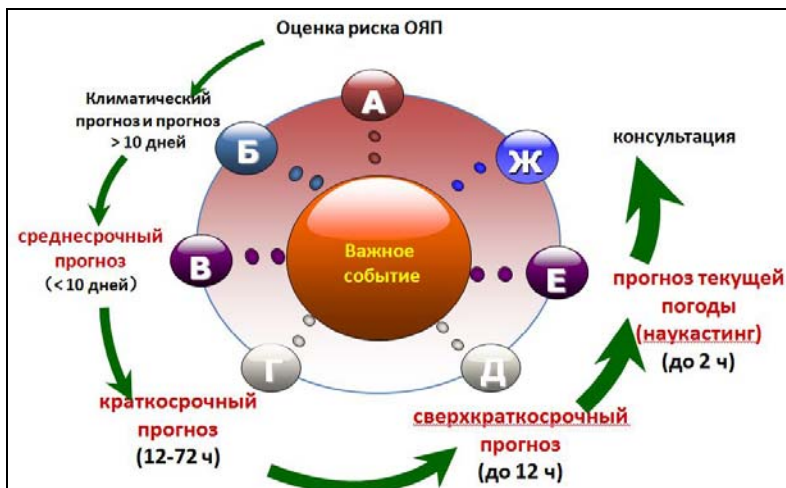


Рис. 2. Схема возможностей современного метеосервиса в представлении метеоинформации потребителю.

Fig. 2. The diagram of modern weather service capabilities in presenting weather information to consumers.

Для снижения и минимизации метеорологических рисков необходимо постоянное обновление и совершенствование трех жизненно важных взаимосвязанных компонентов, которые можно представить схематично (рис. 3). Эта схема применима для любого вида высокодетализированного метеосервиса, в том числе для метеорологического обеспечения спортивных и культурно-массовых мероприятий.



Рис. 3. Схема взаимосвязи трех компонентов, необходимых для уменьшения рисков от опасных явлений погоды.

Fig. 3. The diagram of the relationship of three components needed to reduce risks from severe weather events.

Цель метеорологического обеспечения спортивных и культурно-массовых мероприятий заключается в предоставлении точных и своевременных прогнозов для мест проведения на открытых площадках, для безопасного и справедливого проведения соревнований для спортсменов, а также для их безопасного просмотра зрителями и официальными лицами. Погода может стать единственным неконтролируемым элементом в успешном в целом проведении спортивных мероприятий на открытом воздухе, поэтому своевременное предоставление метеорологической информации является первоочередной по значимости задачей для организаторов и участников. Соответственно, вся работа организаторов по подготовке к обеспечению таких мероприятий должна быть направлена на минимизацию возможного неблагоприятного влияния метеорологических условий на спортивные и культурно-массовые мероприятия. Для этой цели и организуется метеорологическое обеспечение этих мероприятий, включающее в себя проведение комплекса задач и организацию оперативной группы метеорологов по прогнозированию погоды в зависимости от уровня проводимых соревнований или культурно-массовых мероприятий, самыми значимыми и масштабными из которых являются Олимпийские игры. Вся работа этого метеорологического подразделения должна быть направлена на обеспечение специальных наблюдений и детализированного прогнозирования по району проведения мероприятия, предупреждения организаторов, спортсменов, публики о возможных метеорологических опасностях.

В зависимости от масштабов планируемого мероприятия, времени года и территории проведения технология метеорологического обеспечения может включать все пункты подготовки или только основные принципы, но обязательно учитывать определяющие факторы (рис. 4).



Рис. 4. Определяющие факторы метеорологического обеспечения спортивных и культурно-массовых мероприятий.

Fig. 4. The key factors of weather services for sports and cultural events.

Имеющийся опыт организации гидрометеорологического обеспечения зимних Олимпийских и Паралимпийских игр (Солт-Лейк Сити, США, 2002 г.; Турин, Италия, 2006 г.; Ванкувер, Канада, 2010 г.; Сочи, Россия, 2014 г.) показывает, что погода является особым фактором, влияющим на успешное проведение спортивных соревнований такого масштаба. Поэтому своевременное и качественное предоставление метеорологической информации играло и играет ключевую роль для организаторов, участников и зрителей.

Последние несколько лет существует тенденция проведения Игр в районах субтропического пояса и в районах, характеризующихся соседством контрастных климатических режимов (горы рядом с теплой морской поверхностью), с крайне неустойчивыми погодными условиями холодного периода, что базируется на кажущейся слабой зависимости от погоды из-за широкого распространения технологий искусственного снега. Эта тенденция сделала проведение Олимпийских соревнований крайне зависимыми от погодных условий. Неблагоприятные метеорологические условия в районах проведения (плохая видимость, усиление ветра, резкая изменчивость погодных условий, осадки в виде дождя и мокрого снега, подтаивание санных и горнолыжных трасс и т. д.) усложняют проведение соревнований, влияют на репрезентативность показанных результатов, создают реальную угрозу безопасности и имеют высокую вероятность возникновения. Горный рельеф создает дополнительные трудности при интерпретации выходной продукции численных прогнозов, поскольку метеорологический режим и развивающиеся в горных долинах мезопроцессы, как правило, могут существенно отличаться от расчетных модельных характеристик. Соответственно, возрастает роль субъективного анализа и интерпретации результатов моделирования на основе опыта синоптиков-прогнозистов. Горный рельеф также создает сложности при интерпретации данных радарной сети из-за искажений и непрохождения ее сигналов. Строительство объектов происходит за счет существенного расширения ранее существовавших и освоения новых горных долин с малоизученными метеорологическими свойствами. Поэтому возрастает роль предшествующих Олимпийским играм микро- и мезоклиматических исследований форм рельефа каждого из объектов, обучения персонала и проведения тестовых соревнований.

Прогнозы погоды и их ежечасное обновление во время Игр играют ключевую роль в обеспечении безопасности участников, управлении процессом подготовки и организации мероприятий. Поэтому, основываясь на опыте предыдущих Игр, можно отметить, что метеорологическое обслуживание начинается задолго до их начала и выполняется поэтапно несколько лет в соответствии с “Техническим проектом” [12, 13], согласованным с владельцами спортивных объектов, на которых предполагается проводить соревнования, с федерациями по соответствующим видам спорта, Минспорттуризмом России и разработанными совместно планами

гидрометеорологического и противолавинного обеспечения соревнований, если это касается зимних видов спорта. Должны быть проведены масштабные работы, затрагивающие разнообразные направления, цель которых – обеспечить возможность постоянного мониторинга погодных условий и разработки высокодетализированных прогнозов погоды. Основные направления работ схематично показаны на рис. 5.



Рис. 5. Схема системы подготовки детализированных прогнозов.

Fig. 5. The scheme of the system for preparing high-detail weather forecasts.

Говоря о структуре службы прогнозирования, следует отметить, что каждая площадка для проведения мероприятий (соревнований) на открытом воздухе должна иметь независимый офис, специалисты-прогнозисты которого будут разрабатывать детализированный локальный прогноз для каждого спортивного объекта и поддерживаться Центром обеспечения прогнозами, объединенным с центральным офисом гидрометслужбы, задача которого – координирование синоптической обстановки, даваемой прогнозистами в местах проведения Игр, подготовка прогнозов и метеорологической информации для федеральной и других служб, отвечающих за проведение мероприятий и предоставление справок официальным лицам служб по запросам. Основная задача главного метеоролога Игр – отвечать на запросы Организационного олимпийского комитета, Международного олимпийского комитета (МОК) и ряда других спортивных организаций, спортивных официальных лиц, снабжать их метеорологической информацией, а также координировать прогнозистическую работу всех локальных офисов. В Сочи-2014 было организовано пять, а в Красноярске-2019 – четыре локальных метеоофиса

на соревновательных объектах, но принцип работы метеорологов и выполняемые функции в целом были похожи. Эти обобщенные функции локальных метеоофисов и Координационного центра можно представить в виде схем (рис. 6). Схема метеорологического обеспечения Игр может быть различна в деталях, в зависимости от размещения спортивных объектов и базового центра, местности проведения соревнований и т. п., но в целом смысл ее построения сводится к расположению локальных метеоцентров по видам спорта в непосредственной близости к местам проведения соревнований для осуществления тесного взаимодействия со спортивными менеджерами, судьями и капитанами спортивных команд [5].

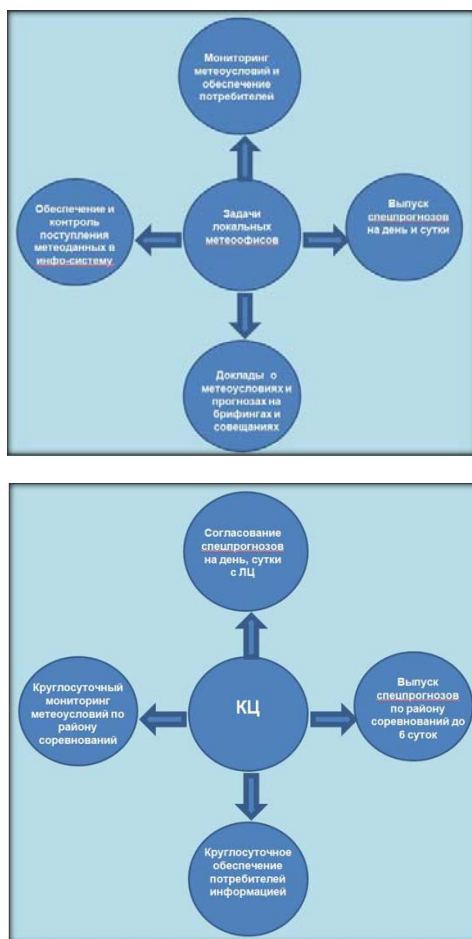


Рис. 6. Выполняемые функции локальных метеоофисов на объектах и Координационного центра для международных спортивных соревнований (Олимпиады, Универсиады).

Fig. 6. The functions of Local Weather Offices at the sports facilities and the Coordination Center for international competitions (Olympic Games, Universiades).

Вся прогностическая деятельность по метеорологическому обеспечению международных спортивных соревнований и культурно-массовых мероприятий должна опираться на систему численных прогнозов погоды различной заблаговременности (рис. 7).

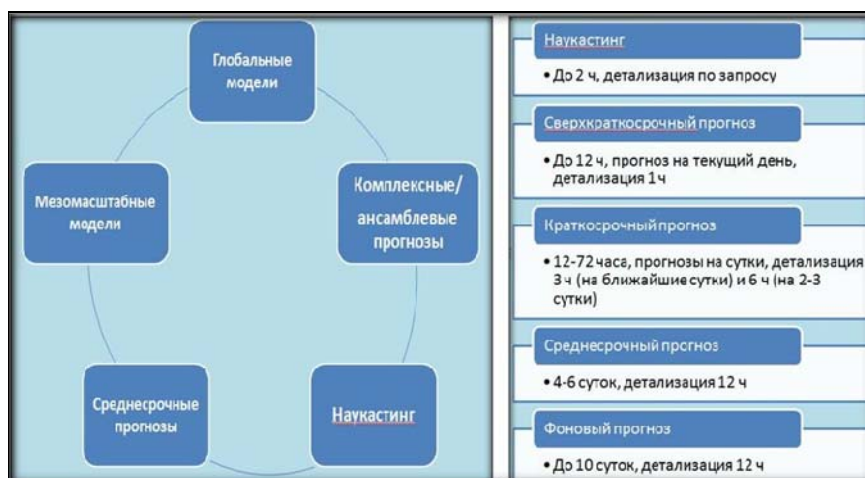


Рис. 7. Система численных прогнозов погоды и виды прогностической продукции различной заблаговременности для метеорологического обеспечения Игр.

Fig. 7. The system of numerical weather prediction and types of forecast products with various lead times for Olympic weather services.

Типовой перечень продукции, выдаваемый метеоофисами, разработанный авторами к тестовым соревнованиям Олимпиады-2014 и прошедший апробацию на Олимпийских/Паралимпийских Играх в Сочи в 2014 г., на Универсиаде-2019 в г. Красноярске и частично на III Всемирных зимних играх военнослужащих в г. Сочи в 2017 г., обычно включает виды информации, представленные на рис. 8. Виды предоставляемой информации могут различаться в зависимости от географических условий местности проведения игр, требований организаторов и т. п.

Требования к метеорологическому обеспечению соревнований мирового уровня, таких как Олимпийские игры (особенно в условиях сложного рельефа в зимний период), выходят за рамки ежедневно выпускаемых Росгидрометом прогнозов общего назначения в части пространственно-временной детализации, точности, форм доведения и степени интеграции информации в системы принятия решений. В связи с этим требуется создание системы специализированных прогнозов на основе моделей высокого пространственно-временного разрешения. Международный опыт показывает, что оптимальным подходом в данном случае является сочетание опыта специалистов-прогнозистов, владеющих концептуальными

моделями локальных погодообразующих процессов, с возможностями базовых автоматизированных технологий, формирующих детализированную прогностическую продукцию.

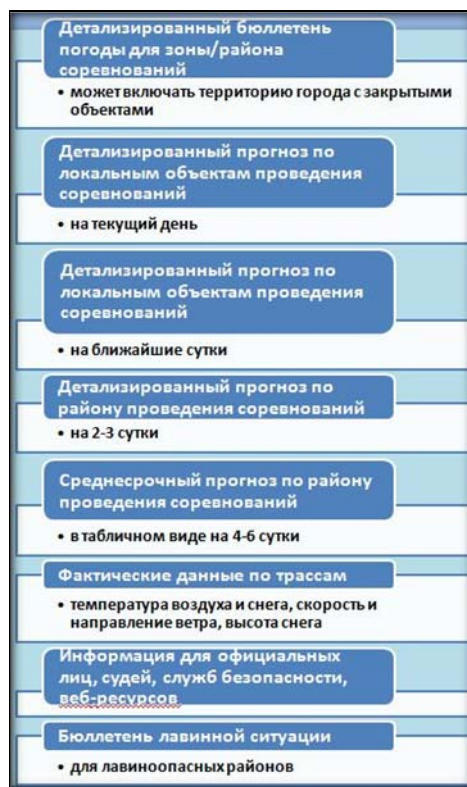


Рис. 8. Типовая информация для метеорологического обеспечения Игр.

Fig. 8. Typical information for Olympic weather services.

Основные требования МОК к метеорологическому обеспечению Игр

К проведению спортивных мероприятий международного масштаба, самыми грандиозными из которых являются Олимпийские игры, предъявляются особые требования ко всем аспектам обеспечения, в том числе и к метеорологическому. Основным документом МОК, в котором сформулированы эти требования, является «Техническое руководство по спорту (Technical Manual on Sport, June 2009)», разделы 2.11 и 3.5. Эти требования должны выполняться в полном объеме и представляться в определенных формах и объемах, что требует создания и отладки многофункциональной оперативной информационно-технологической системы в процессе подготовки к Играм.

Вклад погоды может быть особенно значительным в период зимних Олимпийских игр. Погодная информация является основой для решений, на основании которых спортивные мероприятия могут быть задержаны, перенесены или отменены, поэтому организаторам мероприятий необходима уверенность в получаемой от метеорологических агентств прогностической информации. Все спортивные мероприятия, проходящие на открытом воздухе, нуждаются в качественной, надежной и точной погодной информации, при этом на различные спортивные дисциплины влияют разнообразные погодные элементы. Возможные изменения в расписании (задержка, перенос и отмена соревнований), вызванные погодой, и порядок действий должны быть определены в соответствующих Регламентах. Соответственно, требования, относящиеся к метеорологическому обслуживанию Игр, состоят в следующем:

- прогнозы погоды, штормовые предупреждения, метеорологические наблюдения, климатическая информация и рекомендации по текущей погоде необходимы всем участникам, организаторам и наблюдателям Игр для обеспечения справедливых и безопасных соревнований, сохранения жизни и собственности, содействия эффективному управлению операциями и потоками в период Игр;

- предоставление в систему INFO и на сайт Оргкомитета Игр фактической и прогностической информации по всем спортивным объектам на открытом воздухе и территории принимающего города/городов;

- обеспечение фактической погодной информацией системы результатов соревнований и тренировок;

- обеспечение проведения брифингов для Главного операционного центра и МОК на ежедневной основе, а также проведение дополнительных брифингов по необходимости;

- предоставление в печатном виде информации о погоде напрямую потребителям на регулярной основе;

- оказание консультативной поддержки других функций и персоналу Оргкомитета, деятельность которых связана с воздействием погоды;

- заблаговременное сообщение о потенциальной возможности ухудшения погодных условий на заседаниях руководства Оргкомитета.

Ставятся также и специфические задачи, которые должны решаться Службой погоды при обслуживании зимних Олимпийских игр:

- обеспечение привлечения профессиональных прогнозистов и вспомогательного персонала на каждом открытом спортивном объекте для оперативного сопровождения соревнований и команды управления спортивным объектом;

- обеспечение прогнозами погоды по территории, спортивным объектам и транспортным коридорам Главного операционного центра, включая функции по обеспечению искусственным снегом, церемониям награждения, медицинскому обеспечению и, по запросам, другие функции.

Ключевое значение для зимних Олимпийских игр имеют прогнозы ветра, осадков и туманов (т. е. метеорологической дальности видимости), а для горных районов – низкой облачности, а также температуры воздуха для регионов, где возможно ее значительное отклонение в положительную (как район Большого Сочи) или отрицательную (район г. Красноярска) стороны. Поэтому на каждом открытом спортивном объекте необходима организация метеоофиса с дежурным персоналом и системы метеорологических наблюдений.

Помимо требований МОК к метеорологическому обеспечению соревнований существуют требования Международных спортивных федераций (МСФ) к погодным параметрам, зависящие от конкретных видов спорта и места их проведения (на открытом воздухе или в помещении). Эти требования основываются на климатических характеристиках (показателях) и представляют собой обобщенные метеорологические величины за многолетний период [10]. Таким образом, критические значения метеорологических характеристик, ограничивающие проведение спортивных мероприятий, подразделяются на три группы в зависимости от их влияния на проведение соревнований, т. е. от их силы или интенсивности:

- **критический фактор** для принятия решения, т. е. показатели, которые могут повлечь за собой отмену или перенос соревнования;

- **важный фактор** для принятия решения, т. е. показатели, которые при определенных условиях могут повлечь за собой отмену или перенос соревнования;

- **учесть при принятии решения**, т. е. показатели, которые необходимо учитывать при проведении соревнований.

На основе опыта проведения тестовых соревнований по конкретным видам спорта и тесного взаимодействия с МСФ, возможно вносить изменения в “Метеорологические показатели для проведения спортивных мероприятий”, связанные именно с местными особенностями соревновательных трасс, т. е. выявить местные пороговые значения. Были разработаны градации метеовеличин для прогнозов погоды каждого вида соревновательных дисциплин для горного и прибрежного районов Большого Сочи и для Универсиады-2019 в г. Красноярске. Организация метеорологического обеспечения должна гарантировать предоставление метеорологической информации в соответствии с требованиями МОК и МСФ по каждому спортивному объекту на открытом воздухе во время тестовых соревнований и Игр.

Ранжирование спортивных и культурно-массовых мероприятий в соответствии с требованиями метеорологического обеспечения

В мире, в том числе в России, проводятся различные виды спортивных и культурно-массовых мероприятий, для которых требуется метеорологическое обеспечение разного вида, представляемое как в полном объеме с установкой автоматических метеостанций и дополнительных

пунктов радиозондирования, высоко детализированных пространственно-временных прогнозов (например, для зимних Олимпийских игр), так и в более простых вариантах с привлечением имеющегося комплекса метеорологических данных и менее детализированных прогнозов (например, обеспечение фестивалей, городских праздников и т. п.). Исходя из опыта уже проведенных в России подобных мероприятий, авторы предлагают условно подразделить мероприятия по мере их важности в международном масштабе и размеру выделяемых государством на их обеспечение средств (рис. 9).

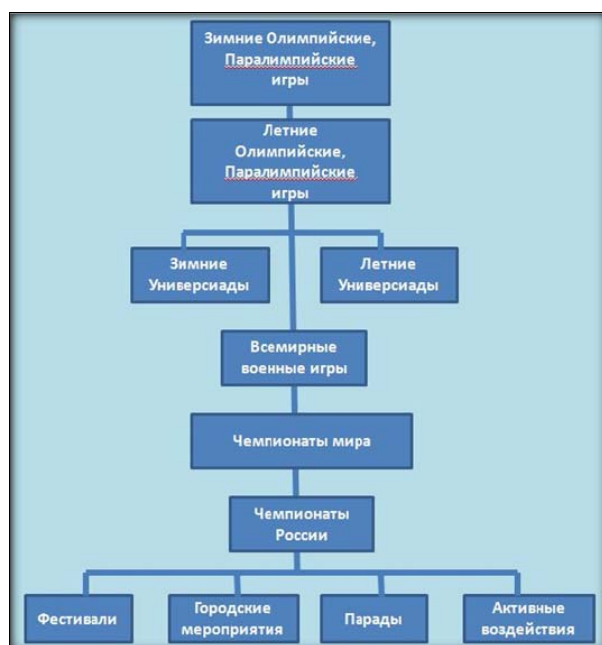


Рис. 9. Виды мероприятий, требующих высокодетализированного метеорологического обеспечения.

Fig. 9. The types of activities that require high-detail weather services.

Такого рода мероприятия в настоящее время в России проводятся с обязательным метеорологическим обеспечением, так как собирают большое количество зрителей и участников, масс-медиа и требуют надежной защищенности от возможных погодных катаклизмов и обеспечения нормальной жизнедеятельности. Самые крупномасштабные международные спортивные мероприятия – зимние Олимпийские игры, требующие длительного периода подготовки (по возможности 3–4 года), разработки специальной Концепции по метеорологическому обеспечению, создания в горном кластере учащенно работающей сети метеорологических станций, набора и обучения команды специалистов-метеорологов, проведения

тестовых соревнований по видам спорта для проверки взаимодействия всех обеспечивающих систем.

Менее крупномасштабными, но также требующими подготовительного периода, разработки Концепции по метеорологическому обеспечению, создания сети метеорологических станций на спортивных объектах и подготовки команды метеорологов соревнованиями, являются Универсиады. В России проводились Летняя Универсиада-2013 в г. Казани и Зимняя Универсиада-2019 в г. Красноярске, на подготовку к которой Росгидромету потребовалось 2 года.

Далее по значимости идут Чемпионаты мира, один из которых, по футболу, был проведен в июне-июле 2018 г. в 11 городах России. Сложность такого метеорологического обеспечения заключается в территориальной масштабности проводимого мероприятия, охватывающего десяток городов проведения матчей. Соответственно, для организации метеорологического обеспечения таких мероприятий необходимо:

- проводить онлайн-совещания в режиме видеоконференций для координации действий организаций Росгидромета по специализированному метеорологическому обеспечению;

- разработать регламент взаимодействия, предусматривающий задачи Гидрометцентра России как ведущего и координирующего центра и задачи УГМС как разработчиков детализированных прогнозов по городам своей ответственности;

- разработать график выполнения работ, порядок формирования прогностических бюллетеней и публикацию в сети Интернет прогностической информации.

Пример схемы распределения Росгидрометом задач метеорологического обеспечения для Чемпионата мира по футболу в России в 2018 г. приведен на рис. 10. Участвующие в обеспечении УГМС осуществляли подготовку прогнозов по пунктам своей территории ответственности с заполнением соответствующих веб-форм. Гидрометцентр России обеспечивал контроль, редактирование введенной с мест информации, при необходимости – оперативное согласование.

Мероприятия локального масштаба, проводимые в конкретных населенных пунктах (например, фестиваль воздухоплавания в Московской области, рок-фестиваль в Тверской области и т. п.), требуют наименьшего времени на подготовку метеорологического обеспечения, но также должны разрабатываться по общей схеме, которую можно предложить для метеорологического обеспечения различного вида массовых мероприятий на открытых площадках (рис. 11).

Далее рассмотрены общие принципы концепции Росгидромета по метеорологическому обеспечению крупных международных спортивных мероприятий, в первую очередь Олимпиад и Универсиад, основные положения которой применимы для массовых мероприятий любого масштаба.

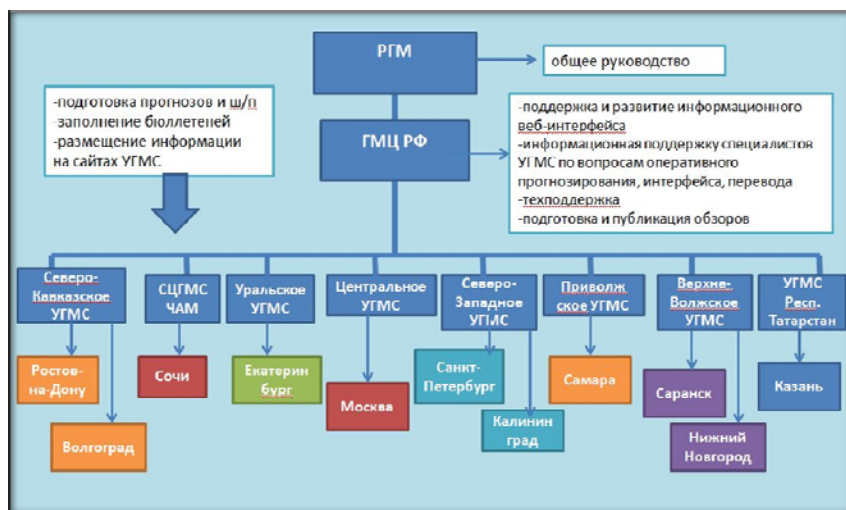


Рис. 10. Схема распределения задач метеорологического обеспечения РГМ на примере ЧМ-2018 по футболу.

Fig. 10. The scheme of distribution of the Roshydromet weather service tasks on the example of the 2018 FIFA World Cup.

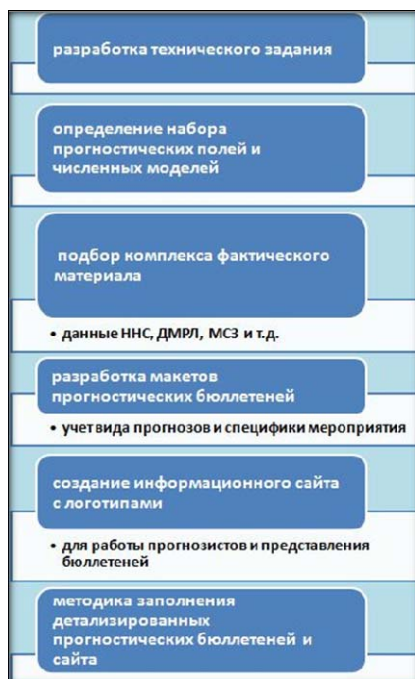


Рис. 11. Общая схема метеорологического обеспечения массовых мероприятий на открытых площадках.

Fig. 11. The general scheme of weather services for open-air mass events.

Развитие концепции Росгидромета по метеорологическому обеспечению международных спортивных соревнований

Анализ организации метеорологического обеспечения зимних Олимпийских и Паралимпийских игр (Солт-Лейк Сити, США, 2002 г.; Турин, Италия, 2006 г.; Ванкувер, Канада, 2010 г.) показал, что погода является особым фактором, влияющим на успешное проведение спортивных соревнований такого масштаба. В России до начала подготовки к предстоящим Олимпийским зимним играм в г. Сочи отсутствовал опыт метеорологического обеспечения крупных зимних международных соревнований. Как правило, внутренние соревнования по зимним видам спорта на открытом воздухе проводились по фактической погоде без привлечения специалистов-прогнозистов Росгидромета. В связи с этим на основании международного опыта Росгидрометом была разработана система специализированного обеспечения соревнований на открытом воздухе в условиях горной местности. Основой концепции данной системы является положение о том, что своевременное представление детализированной по времени и пространству информации о фактических и ожидаемых условиях погоды играет ключевую роль для организаторов и участников соревнований, контингента средств массовой информации и зрителей для успешного проведения мероприятий.

Опыт проведения тестовых соревнований сезонов 2010–2013 гг., а затем и проведения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 г. в Сочи показал, что Российская система специализированного метеорологического обеспечения спортивных мероприятий в сложных климатических и орографических условиях прошла успешную проверку и показала гарантированную надежность предоставления метеорологической информации в соответствии с требованиями МОК и МСФ по каждому спортивному объекту на открытом воздухе и в закрытых помещениях.

Тестовые соревнования позволили систематизировать накопленный опыт, провести мероприятия по устранению выявленных недостатков и более четко регламентировать работу специалистов Росгидромета для качественного решения стоящих перед ними задач. На основе международного опыта совместно подразделениями Росгидромета (АНО "Метео-агентство Росгидромета", ФГБУ "Гидрометцентр России" в лице Главного Метеоролога Олимпиады-2014 В.И. Лукьянова и специально созданным отделом «Сочи-2014») был разработан Технический проект [12] по метеорологическому обеспечению Олимпиады-2014, который впоследствии был развит и продолжен в Концепции для Зимней Универсиады-2019 в г. Красноярске [6]. С учетом мирового опыта проведения метеорологического обеспечения международных соревнований и отечественной Концепции можно выделить основные положения, применимые для проведения любого вида международных спортивных Игр.

1. Физико-географическая и климатическая характеристики района проведения Игр.
2. Анализ метеорологической инфраструктуры района проведения Игр.
3. Организация современной системы противолавинной безопасности объекта (для зимних соревнований в горных лавиноопасных районах).
4. Организация современной системы метеорологических наблюдений.
5. Организация системы сбора и передачи метеорологических данных.
6. Организация системы метеорологического обеспечения.
7. Создание системы специализированных метеорологических прогнозов.
8. Подбор и подготовка кадрового состава по метеорологическому обеспечению Игр.
9. Организация метеообеспечения полетов авиации в районе проведения Игр.

Последний пункт также входит в область деятельности Росгидромета по метеорологическому обеспечению международных спортивных мероприятий, но предполагает участие организаций авиационной направленности, обеспечивающих фактической и прогностической информацией о погоде летно-диспетчерские службы.

Пути непосредственной реализации Концепции [6] прописываются в Технических проектах [12, 13], согласованных с владельцами спортивных объектов и федерациями по соответствующим видам спорта, и включают:

- техническое перевооружение УГМС, на территории которого планируется проведение крупных соревнований;
- развитие системы метеорологических наблюдений, с использованием новейших автоматизированных метеорологических комплексов и приборов, средств дистанционного зондирования в соответствии с требованиями МОК, FISU и федераций по видам спорта;
- совершенствование системы сбора гидрометеорологической информации, в том числе, разработку и внедрение современных технологий усвоения различных видов метеорологической информации в численных моделях прогнозов погоды различной заблаговременности с временной и пространственной детализацией метеорологических параметров;
- тестирование системы разработки прогнозов погоды с использованием данных численных моделей с высоким пространственно-временным разрешением COSMO и WRF;
- специальную подготовку команды метеорологов и IT-специалистов, организации четкого взаимодействия между ними.

Большое значение, в том числе и для подразделений Росгидромета, на территории которых проходили Игры, имеет вопрос о наследии

остающихся после их завершения спортивных комплексов, оборудования, в том числе метеорологического. Вся инфраструктура, разработанная для зимних игр в Сочи-2014 и Красноярске-2019, а также весь накопленный опыт оперативно-методического сопровождения метеорологического обеспечения мероприятий такого масштаба имеет долгосрочное продолжение, прежде всего для развития метеорологической службы Северо-Кавказского региона, ФГБУ «СЦГМС ЧАМ», Средне-Сибирского УГМС и Гидрометцентра г. Красноярска в частности, а также национальной метеорологической службы России в лице Гидрометцентра России.

В частности, в наследие входит:

- во-первых, доставшаяся в «наследство» расширенная 10-минутная сеть наблюдений автоматических метеостанций (АМС), необходимая в данных районах со сложным горным рельефом, а также близостью моря (ФГБУ «СЦГМС ЧАМ») для мониторинга и прогнозирования сложных погодных условий, связанных с сильными осадками и ветром на побережье и в горах как в теплый, так и в холодный сезоны;

- во-вторых, опыт по методологии детализированных прогнозов, по работе с моделями высокого разрешения, накопленный авторами при непосредственном контакте с потребителями прогнозов, полезен для продвижения идей современного уровня прогнозирования. Этот опыт оперативно-прогностической и организационной работы имел конкретное приложение и был успешно применен в 2017 г. синоптиками ФГБУ «СЦГМС ЧАМ» при метеорологическом обеспечении III Всемирных военных игр в г. Сочи;

- в-третьих, неоценимый опыт для разработчиков моделей, испытавших свои модели на оперативном полигоне, что помогло их дальнейшему совершенствованию как в оперативных, так и в исследовательских целях;

- в-четвертых, проводимый анализ и верификация прогнозов и результатов моделирования, а также продолжающиеся исследования, в которых принимали участие и авторы, помогли улучшить понимание трудностей прогнозирования зимней погоды в условиях сложной местности как оперативным синоптикам, так и разработчикам моделей, что имеет продолжение в дальнейших исследованиях;

- в-пятых, оперативное метеорологическое обеспечение Олимпийских Игр-2014 и Универсиады-2019 в целом привело к пониманию выгод не только олимпийских прогнозов, но и метеорологического обеспечения любых спортивных и культурно-массовых мероприятий и их экономической результативности;

- в-шестых, плотная сеть метеорологических наблюдений в учащенном режиме началась создаваться Росгидрометом при содействии московского правительства в Московском регионе для обеспечения городской инфраструктуры и населения столицы постоянным мониторингом и специализированными детализированными прогнозами, что послужит усилению метеорологической безопасности города и предотвращению катастрофических последствий от влияния погодных условий.

Таким образом, все приведенные пункты Концепции необходимо выполнять в полном объеме для крупномасштабных спортивных проектов нашей страны, в первую очередь Олимпийских игр и Универсиад. Для мероприятий более локального масштаба могут выполняться отдельные пункты, без которых невозможно современное метеорологическое обеспечение, основанное на сети учащенных метеорологических наблюдений и детализированных, в первую очередь по времени, прогнозов.

Необходимые составляющие для разработки детализированных прогнозов погоды

Современные требования, предъявляемые к метеорологическому обеспечению различных культурно-массовых и спортивных мероприятий, диктуют новые подходы к решению задач их метеорологического обеспечения. Анализ случаев прогнозирования неблагоприятных явлений погоды при таком обеспечении помог оценить роль синоптика (или “человеческого фактора”) в сложном взаимодействии всего многообразия представленных моделей и систем при различных синоптических процессах в регионах со сложной орографией, большой изменчивостью погоды, дефицитом исторических данных наблюдений и отсутствием длительного опыта прогнозирования и доказал, что только специалист-прогнозист мог принимать решения в сложных ситуациях, интегрировать и контролировать разнородную и нередко противоречивую информацию, доступную на сегодняшний день от многочисленных прогностических технологий. Реализация на практике при обеспечении Игр такого подхода показала возможность успешной работы по прогнозированию с высокой пространственно-временной детализацией даже в горных условиях при углубленном изучении местных особенностей рельефа и синоптических процессов и адаптации результатов модельных расчетов.

Основные проблемы, возникающие при разработке высокодетализированных прогнозов погоды и штормовых предупреждений, обусловлены недостаточной точностью выходных данных современных численных моделей даже с высоким пространственно-временным разрешением для определения времени, места возникновения и силы опасных явлений погоды, а также недостаточной разработанностью системы их использования и частотой поступления данных наземной сети, позволяющих уточнять место возникновения опасных явлений погоды по синоптическим и географическим признакам.

В связи с этим современный синоптик-прогнозист должен знать и уметь использовать не только традиционные синоптические методы и подходы к прогнозу погоды, но и понимать и интерпретировать концептуальные модели опасных явлений погоды, что подразумевает знание и понимание синоптиком физических условий, структуры и жизненного цикла опасных явлений, местных особенностей, влияющих на их эволюцию [1]. Эти знания могут существенно улучшить конечный результат

численных расчетов модели по прогнозу возникновения и развития опасного явления. Именно знание концептуальной модели прогнозируемых явлений должно подсказывать прогнозисту необходимость внесения тех или иных изменений в прогностическую продукцию мезомасштабной модели [8], что с успехом было продемонстрировано нашими синоптиками при обеспечении XXII Зимних Олимпийских и XI Паралимпийских Игр Сочи-2014 [4, 7, 8]. В ходе нескольких лет тестовых соревнований в горном кластере Большого Сочи проводился непрерывный мониторинг фактических данных наземных метеостанций, их сопоставление с данными моделей различного разрешения, в том числе мезомасштабных, с учетом местных особенностей региона и каждого локального спортивного объекта.

Основой современной технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды является оперативный численный прогноз погоды на базе гидродинамических моделей атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением и автоматизированных технологий сбора и обработки метеорологической информации [3]. В настоящее время для разработки современного детализированного прогноза погоды, применяемого для метеорологического обеспечения масштабных спортивных и культурно-массовых мероприятий, используется весь комплекс имеющихся средств наблюдений:

- метеорологических наблюдений по наземным данным имеющихся МС и АМС (в радиусе 100 км от пункта прогноза с 10-минутной дискретностью);

- аэрологических наблюдений;
- дистанционных средств наблюдений;
- радиолокационных наблюдений сети ДМРЛ-С;
- метеорологических спутников;
- датчиков грозопеленгационной сети в радиусе 100 км;
- данных метеорологических оповещений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды (в коде WAREP);

- выходной продукции прогностических моделей с высоким пространственно-временным разрешением, в том числе по модели COSMO-Ru с разрешением 2,2 и 1 км.

Имеющийся опыт прогностической практики Росгидромета по обеспечению детализированными прогнозами спортивных и культурно-массовых мероприятий (Олимпиады-2014, Универсиад в 2013 и 2019 гг., ЧМ-2018) свидетельствует о том, что обеспечение высокого качества и регулярности выпуска прогнозов высокой детализации требуют сбалансированного сочетания результатов ЧПП и их экспертной оценки специалистом-прогнозистом с целью контроля, уточнения и восполнения имеющейся объективной фактической и прогностической информации [3].

Подготовка и разработка высокодетальных прогнозов с использованием данных численных моделей высокого пространственно-временного

разрешения требует создания методологии детализированного прогноза, включающей развитие и совершенствование современной системы сбора метеорологических наблюдений и прогнозирования с учетом конкретных географических условий и рельефа местности, отражающей быстро меняющиеся условия погоды. Составляющие такой системы схематично показаны на рис. 12, пояснения приведены ниже.

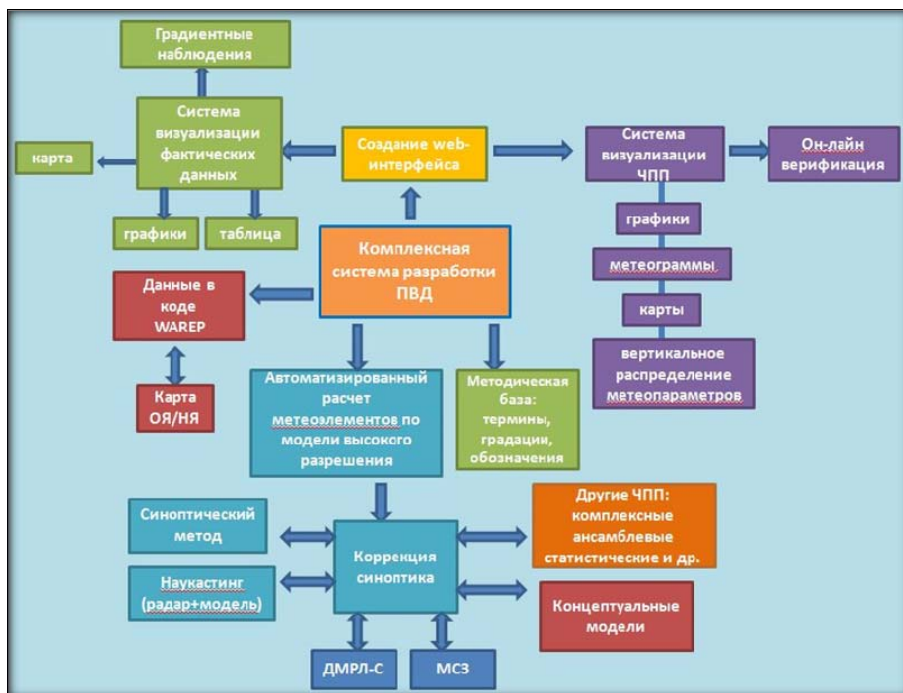


Рис. 12. Схема составляющих комплексной системы разработки высокодетализированных прогнозов погоды.

Fig. 12. The diagram of the components of an integrated system for the development of high-detail weather forecasts.

Для регулярной работы комплексной системы высокодетального прогнозирования в первую очередь необходимо *создание специального пользовательского веб-интерфейса*, доступного специалистам под паролем и позволяющего оперативно получать различные виды фактических и прогностических данных, в том числе моделей с высоким пространственно-временным разрешением, представленные в виде системы визуализации и верификации метеорологических численных прогнозов метеоэлементов. Примеры таких веб-интерфейсов: сайт, созданный для синоптиков, обслуживавших Универсиаду-2019 в Красноярске (рис. 13), и сайт, созданный по его образу, но уже более усовершенствованный и модернизированный, для синоптиков, разрабатывающих детализированные прогнозы для московского мегаполиса (рис. 14).

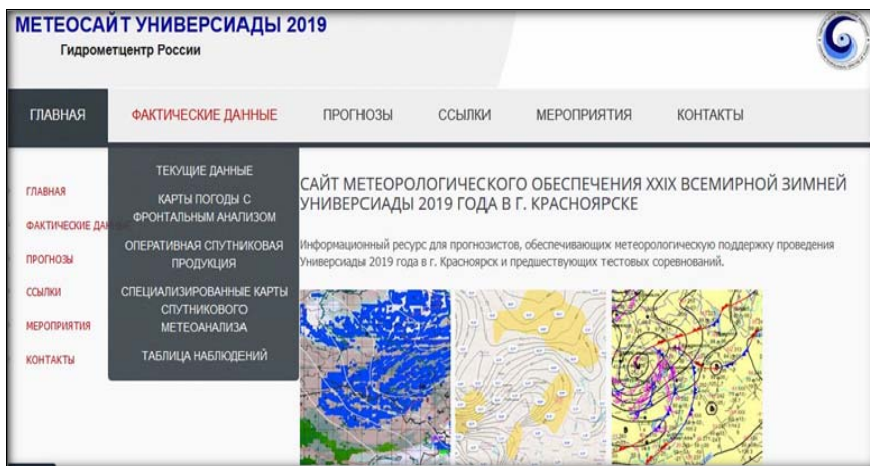


Рис. 13. Общий вид пользовательского сайта для синоптиков-прогнозистов, разработавших детализированные прогнозы для Универсиады-2019 в г. Красноярске.

Fig. 13. The general view of the website for forecasters who prepared detailed forecasts for the 2019 Universiade in Krasnoyarsk.

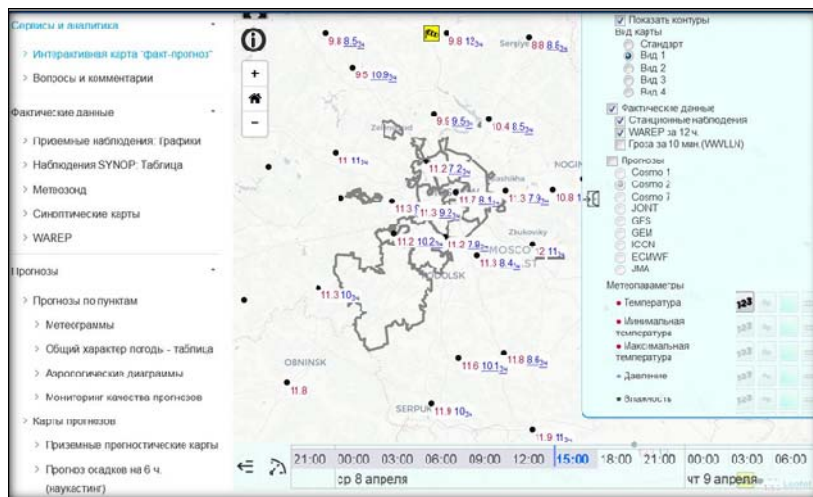


Рис. 14. Общий вид пользовательского сайта с интерактивной картой для синоптиков-прогнозистов, разрабатывающих детализированные прогнозы по московскому мегаполису.

Fig. 14. The general view of the website with an interactive map for forecasters preparing detailed forecasts for the Moscow megalopolis.

Этот веб-интерфейс дает возможность оперативного контроля за согласованностью системы различных видов метеорологических данных, синоптических полей, визуализации выходной продукции моделей

и использования специализированной информации по территории прогноза. Здесь можно размещать фактические данные, получаемые с наземных метеостанций в виде интерактивной карты (рис. 14), в графическом и табличном видах (рис. 15), где в режиме онлайн наносятся фактические данные основных метеопараметров, поступающих с наземных метеостанций, в том числе автоматических в 10-минутном режиме.

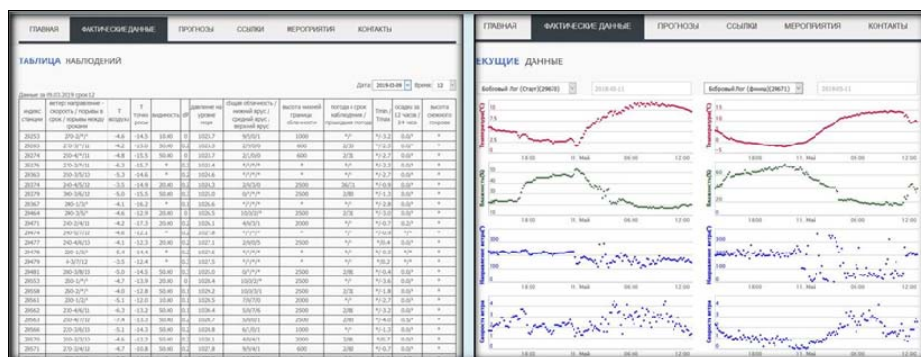


Рис. 15. Визуализация текущих данных МС и АМС по Красноярскому региону с архивом в табличном и графическом видах на специализированном веб-интерфейсе.

Fig. 15. The visualization of current weather station and automatic weather station data for the Krasnoyarsk region with an archive in tabular and graphical forms on a specialized web interface.

Разработка высокодетализированных прогнозов погоды опирается на данные расчетов численных моделей с высоким пространственно-временным разрешением (шаг расчетной сетки не более 7 км). Система численных прогнозов погоды должна включать обязательный набор основных моделей, используемых в оперативной практике Гидрометцентра России: глобальные среднесрочные модели (рис. 16): Экзетер (EGRR), Оффенбах (EDZW), Вашингтон (NCEP), Рединг (ECMWF), ПЛАВ; прогнозы по методу статистической интерпретации гидродинамических расчетов П.П. Васильева и комплексный прогноз А.Н. Багрова (рис. 17); ансамблевый прогноз Гидрометцентра России Joint; региональные краткосрочные прогнозы с большим пространственно-временным разрешением (имеющиеся на сегодня в Гидрометцентре России модели: COSMO-Ru с разрешением 6; 2,2 и 1 км; ICON-Eur с разрешением 7 км; WRF-ARW с разрешением 3 и 1 км).

Рекомендуется в качестве дополнительной информации привлекать модельные прогнозы, представленные на некоторых официальных веб-ресурсах:

<https://www.windy.com/?55.752,37.616,5,i:pressure>,
<https://www.yr.no/place/Russia/>.

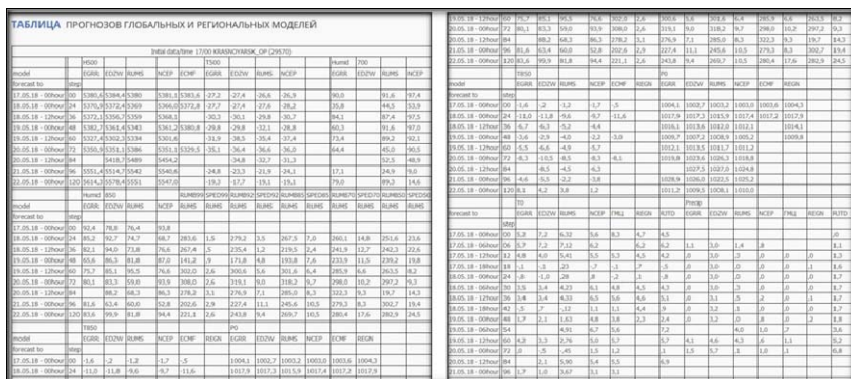


Рис. 16. Таблица прогнозов глобальных и региональных моделей по г. Красноярску на специализированном веб-интерфейсе.

Fig. 16. The table of global and regional model forecasts for Krasnoyarsk on a specialized web interface.

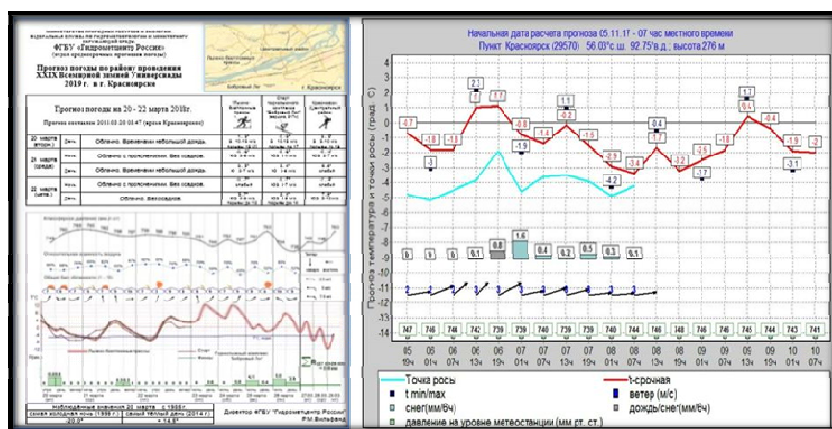


Рис. 17. Представление расчетных данных о температуре, ветре, облачности и осадках на период до 10 суток (таблица и графики) по методу статистической интерпретации гидродинамических расчетов (П.П. Васильев) и комплексному методу (А.Н. Багров) по району проведения соревнований и г. Красноярску.

Fig. 17. The presentation of calculated data on temperature, wind, clouds, and precipitation for a period up to 10 days (the table and graphs) by the method of statistical interpretation of hydrodynamic calculations (P.P. Vasil'ev) and the complex method (A.N. Bagrov) for the competition area and the city of Krasnovarsk.

Результаты расчетов моделей представляются в виде графиков (рис. 18), метеограмм, диаграмм вертикального распределения температуры воздуха, скорости и направления ветра (рис. 19) и карт явлений погоды (рис. 20), приведенных на примере Универсиады-2019 в г. Красноярске.

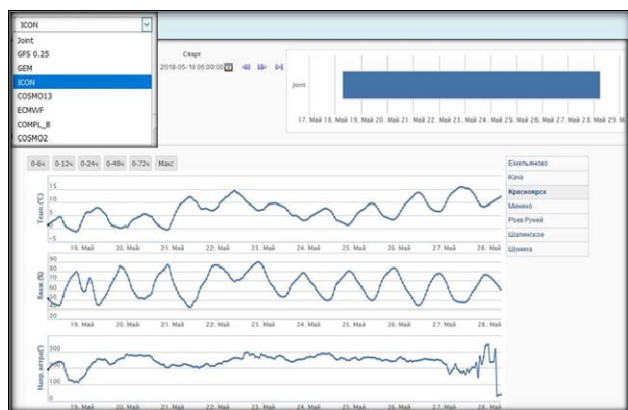


Рис. 18. Пример графического отображения мультимодельных прогнозов по Красноярскому региону на специализированном веб-интерфейсе.

Fig. 18. The example of graphical presentation of multi-model forecasts for the Krasnoyarsk region on a specialized web interface.

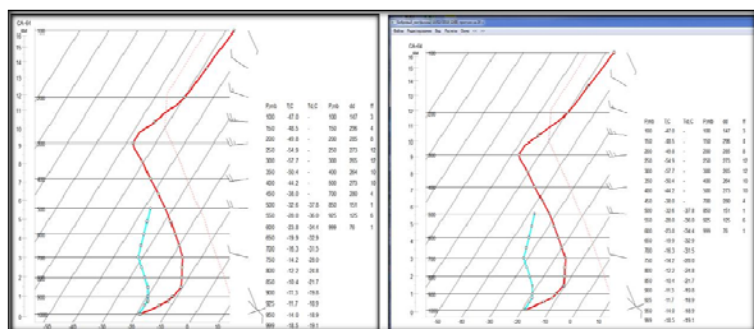


Рис. 19. Прогноз вертикального распределения температуры воздуха, скорости и направления ветра до 48 ч по модели COSMO-Ru с разрешением 1 км (п. ВДНХ) и на 24 ч по модели EGRR (п. Бобровый Лог).

Fig. 19. The forecast of vertical distribution of air temperature, wind speed, and wind direction for a period up to 48 hours according to the COSMO-Ru model with a resolution of 1 km (VDNKh) and to 24 hours according to the EGRR model (Bobrov Log).

Для оперативной оценки успешности прогноза выходных данных численных расчетов моделей, особенно высокого разрешения, и последующего их использования для разработки высокодетализированных прогнозов погоды по заданной территории рекомендуется проводить их онлайн-верификацию (рис. 21) по основным метеорологическим параметрам (температуре воздуха, относительной влажности воздуха, направлению и скорости ветра, давлению) по общепринятым показателям оценок: средней арифметической (или систематической) ошибке и средней абсолютной ошибке.

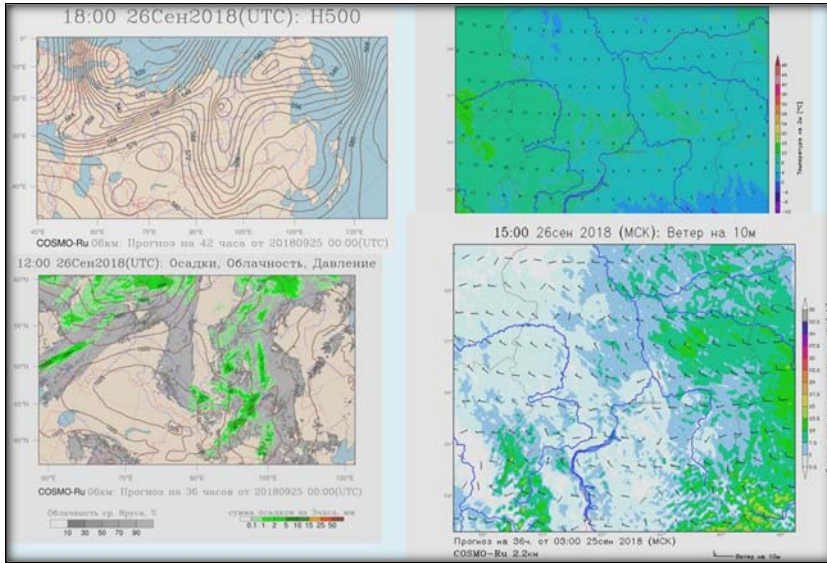


Рис. 20. Представление расчетных данных в картографическом виде по модели COSMO-Ru с разрешением 6,6 и 2,2 км по Красноярскому региону.
Fig. 20. The presentation of calculated data in cartographic form according to the COSMO-Ru model with a resolution of 6.6 and 2.2 km for the Krasnoyarsk region.

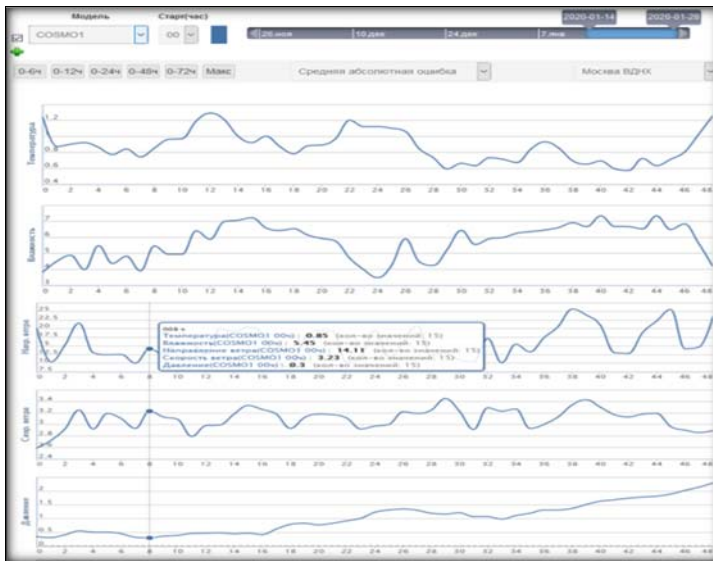


Рис. 21. Пример системы онлайн-верификации модели COSMO-Ru-Mp с разрешением 1 км для московского мегаполиса.
Fig. 21. The example of an online verification system for the COSMO-Ru-Mp model with a resolution of 1 km for the Moscow megalopolis.

Для подготовки прогноза с высокой детализацией по времени и территории базовый расчет должен производиться по модели с высоким пространственно-временным разрешением (например, по модели COSMO-Ru с разрешением 2,2 или 1 км) в виде автоматизированных форм прогнозистических бюллетеней на различные прогностические сроки и с разным набором параметров (рис. 22а) и далее корректироваться синоптиком по всему имеющемуся комплексу различной метеорологической информации (рис. 22б) для выдачи потребителю посредством любого приемлемого вида передачи данных (по почте, ftp-протоколу на ftp-сервер, через пользовательский веб-интерфейс). Для более точного воспроизведения модельных расчетов следует выдавать метеорологические параметры без разбивки на градации, но по критическим значениям элементов (максимальная/минимальная температура воздуха, максимальные значения порывов ветра и количества осадков).

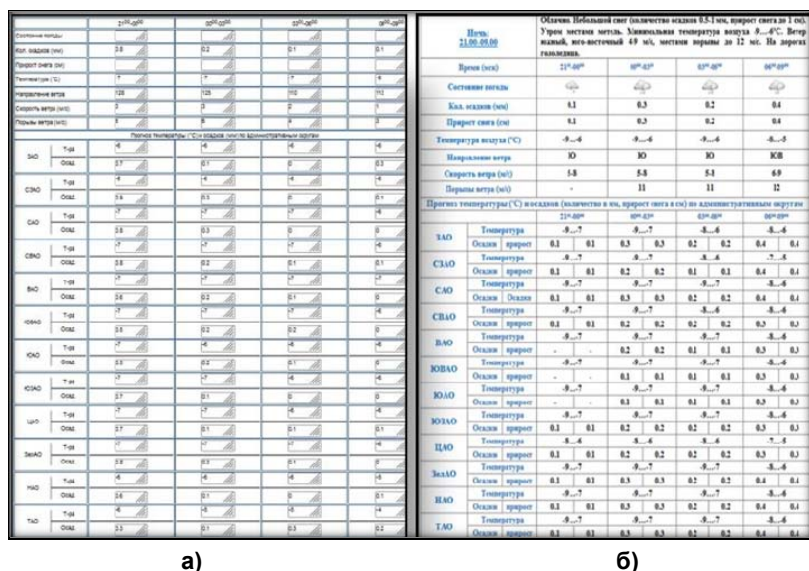


Рис. 22. Вид бюллетеней, детализированных по 12 округам московского мегаполиса с 3-часовой дискретностью на 12 ч: по модельным расчетам COSMO-Ru с разрешением 1 км, поступающего в автоматическом режиме без коррекции синоптика (а); с коррекцией синоптика (б).

Fig. 22. The bulletins detailed for 12 districts of the Moscow megalopolis with a 3-hour discreteness for a period of 12 hours: according to COSMO-Ru model calculations with a resolution of 1 km arriving in automatic mode without forecaster's correction (a); with forecaster's correction (b).

В период проведения Игр различного масштаба возможен выпуск дополнительных автоматизированных бюллетеней прогноза погоды по различным моделям. Пример оперативного автоматизированного бюллетеня, детализированного по 3-часовым интервалам с прогнозами

приземной температуры воздуха, сумм осадков, влажности, направления и скорости ветра по г. Красноярску, выпускавшегося по технологии оперативного детализированного (по времени и по территории) среднесрочного прогноза погоды на сутки (метод статистической интерпретации РЭП [2]), в помощь оперативным синоптикам, разрабатывавшим прогноз по территории проведения соревнований Универсиады-2019 в г. Красноярске (рис. 23).

В настоящее время расчеты численных моделей являются основой прогнозов погоды благодаря их большой физичности, частичной внедренности и широкой применяемости во всем мире. Однако имеются ошибки применительно к прогнозам опасных явлений погоды, особенно конвективного характера, из-за редкости и часто уникальности этих явлений. В связи с этим корректировка таких прогнозов и разработка консультаций об опасных явлениях погоды в настоящее время возможна только специалистом-синоптиком по многосторонней фактической информации с коррекцией расчетных данных моделей и учетом оперативной информации ближайших ДМРЛ-С (не более 100 км от района прогноза, а для уточнения прогноза на текущий день/ночь – производя расчет перемещения осадкообразующей облачности и используя "Объединенную карту сетей ДМРЛ и BALTRAD" на сайте ФГБУ "ЦАО" (<http://map/meteorad/ru/>, рис. 24) в режимах "Метеоявления" и "Интенсивность осадков", данные геостационарных МСЗ в различных спектральных диапазонах.

Прогноз погоды по г. Красноярск с 22:00 5 марта до 22:00 6 марта 2019 г. (время Красноярское) (XXIX Всемирная зимняя Универсиада 2019 г.)								
29570	22:00-01:00	01:00-04:00	04:00-07:00	07:00-10:00	10:00-13:00	13:00-16:00	16:00-19:00	19:00-22:00
Облачность								
Количество осадков (мм)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Температура воздуха (°C)	0..2	-2..0	-4...-2	-5...-3	-2..0	0..2	-1..1	-3...-1
Влажность (%)	82	81	82	79	70	65	75	88
Направление ветра	З	ЮЗ	ЮЗ	Ю	ЮЗ	З	З	З
Скорость ветра (м/с)	3	2	2	1	1	2	2	1

Рис. 23. Пример дополнительного автоматизированного бюллетеня прогноза погоды по методу статистической интерпретации для синоптиков Универсиады-2019 в г. Красноярске.

Fig. 23. The example of the additional automated bulletin with the weather forecast produced by the method of statistical interpretation for the Krasnoyarsk 2019 Universiade forecasters.

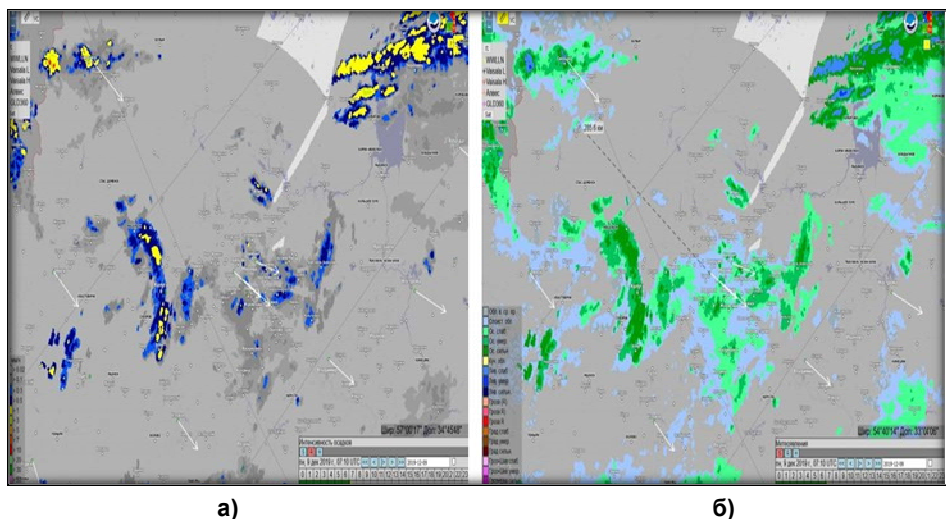


Рис. 24. Расчет подходов зоны осадкообразующей облачности к московскому мегаполису по объединенным картам meteorad.ru: интенсивность осадков (а); метеоявления (б).

Fig. 24. The calculation of the precipitation-forming cloud zone approaches to the Moscow megalopolis according to the meteorad.ru composite radar maps: precipitation intensity (a); weather phenomena (б).

В помощь оперативному синоптику создан наукастинг полей осадков по последовательным радарным наблюдениям (модель STEPS), который воспроизводит эволюцию радарных полей на интервале до 2 ч с шагом 10 мин (рис. 25, слева). На базе мультимодельного прогноза модели COSMO-Ru с разрешением 2,2 км разработан наукастинг интенсивности осадков для обслуживаемой территории (в настоящее время на примере частично территории ЦФО и московского региона), что позволило увеличить срок прогноза интенсивности осадков до 6 ч (рис. 25, справа). Режим анимации дает возможность отслеживать процесс в движении с видимой трансформацией зон интенсивности осадков, что позволяет оперативному синоптику корректировать и уточнять сверхкраткосрочные прогнозы и консультации о неблагоприятных и опасных явлениях погоды по территории ответственности.

Для мониторинга неблагоприятных и опасных явлений погоды по территории прогноза и дальнейшей разработки консультаций или штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды необходимо использовать информацию, поступающую в оперативном режиме от наземных метеостанций в коде WAREP, которая может быть визуализирована: в виде обозначений на интерактивной карте и раскодированных телеграмм, поступающих с дискретностью 1 или 3 ч (рис. 26), в виде карты территории прогноза (рис. 27), таблицы (рис. 28).

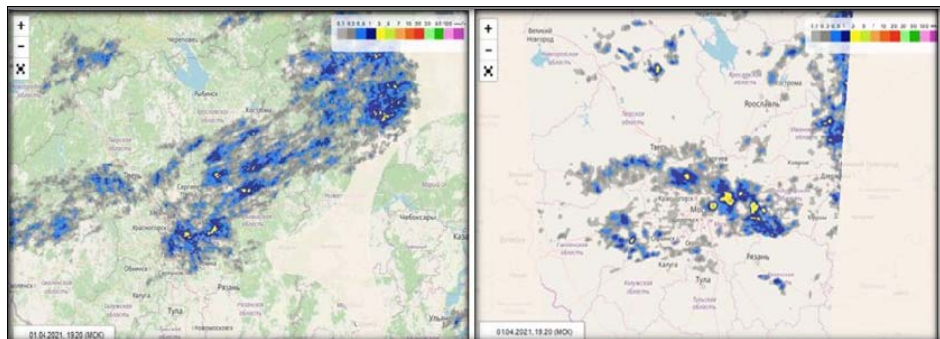


Рис. 25. Пример прогноза интенсивности осадков по технологии STEPS по московскому региону: до 2 ч 9 (слева); до 6 ч (справа).

Fig. 25. The example of the precipitation intensity forecast by the STEPS technology for the Moscow region: up to 2 hours (left); up to 6 hours (right).

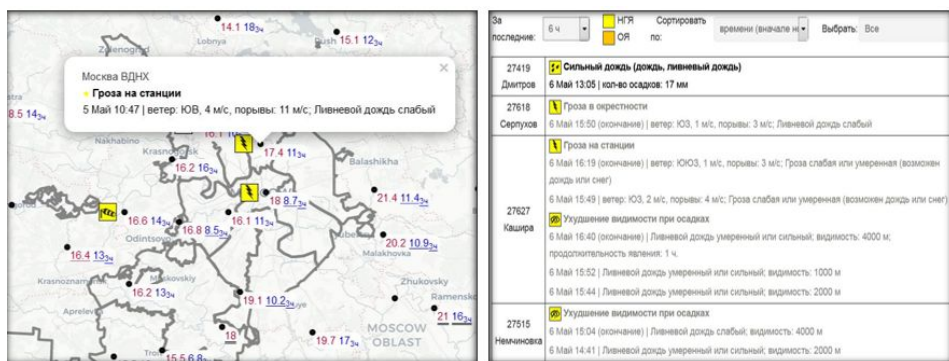


Рис. 26. Данные наземных метеостанций в коде WAREP в виде: интерактивной карты (слева); телеграмм (справа).

Fig. 26. Data from ground-based weather stations in WAREP code presented as: an interactive map (left); telegrams (right).

В специализированных детализированных прогнозах погоды применяются основные градации, термины и графические изображения метеорологических элементов погоды, принятые в системе Росгидромета (РД 52.27.724-2019 [9]), с учетом требований МОК и спортивных федераций. Величины самих градаций в рамках, принятых в Наставлении [9], могут изменяться в зависимости от требований, предъявляемых к специализированному детализированному прогнозу погоды заказчиком, что особенно существенно для прогнозов по спортивным локальным объектам в зимний период, когда даже от небольшого (до 0,5 см) количества свежевыпавшего снега зависит подготовка лыжных/горнолыжных трасс и спортсменов к соревнованиям, а также само проведение или перенос соревнований.

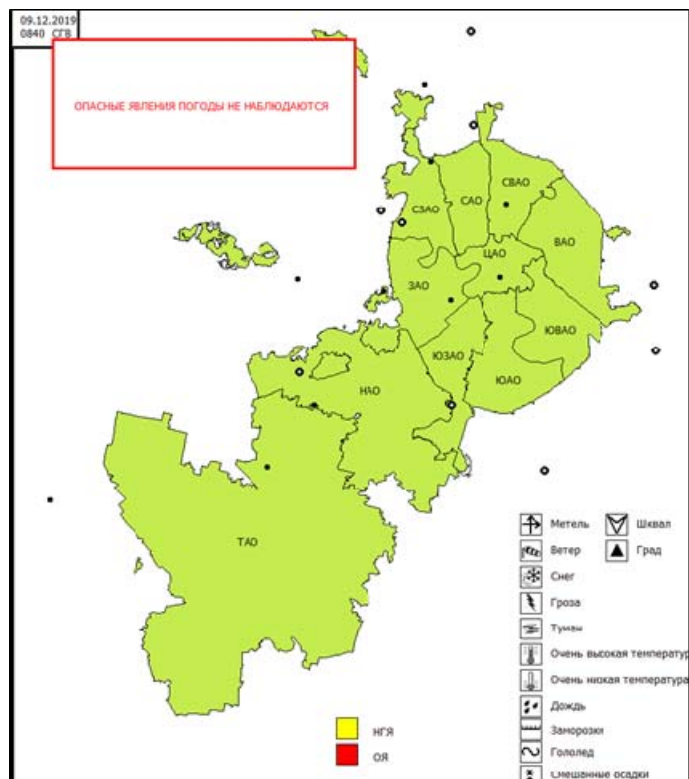


Рис. 27. Карта г. Москвы и 12 административных округов с нанесенными обозначениями ОЯ и НГЯ, поступающих от наземных МС в коде WAREP.

Fig. 27. The map of Moscow and 12 administrative districts with the drawn symbols of severe and adverse weather events received from the ground-based weather stations in WAREP code.

Дата	Время	Явление	Статус	Область	Название станции	Индекс станции	Характеристика явления
12.09	07:48	Сильный ветер	НГЯ окончание	Ярославская	БРЕЙТОВО	27213	Ветер юго-Западный, 4 м/с, порывы до 9 м/с
12.09	07:52	Сильный ветер	НГЯ возникновение	Тверская	КРАСНЫЙ ХОЛМ	27215	Ветер южный, 2 м/с, порывы до 12 м/с
12.09	07:57	Сильный ветер	НГЯ окончание	Тверская	БОЛОГОО	26298	Ветер юго-Западный, 4 м/с, порывы до 8 м/с, продолжительность МПЯ 1 ч
12.09	08:05	Низкая облачность (при 5 баллах и более)	НГЯ окончание	Тульская	ВОПОВО	27824	кол-во облаков 10 балл, форма облаков 7, высота нсо 1500 м
12.09	08:05	Ухудшение видимости из-за дымки	НГЯ окончание	Тульская	ВОПОВО	27824	МДВ 3000 м, продолжительность МДВ 2 ч
12.09	08:06	Ухудшение видимости из-за тумана	НГЯ окончание	Кировская обл.	РЫЛЬСКО	33166	МДВ 2000 м, продолжительность МДВ 10 ч, кол-во облаков 10 балл, форма облаков 7, высота нсо 1500 м

Рис. 28. Табличная форма представления информации о неблагоприятных и опасных явлениях погоды в коде WAREP.

Fig. 28. The tabular form for presenting information about adverse and severe weather events in WAREP code.

- комплексе современных средств наблюдений, в первую очередь,

метеорологических наблюдений с наземных метеостанций, работающих в учащенном режиме передачи данных (не более 10 мин);

- использовании современных дистанционных методов;
- выходной продукции моделей с высоким пространственно-временным разрешением и высокой частотой обновления;
- ключевой роли специалиста-синоптика в принятии решений по контролю и объединению разнородной и часто противоречивой информации;
- высоком профессиональном уровне синоптиков-прогнозистов, способных обобщать и анализировать разнородную информацию, знающих локальные особенности района прогноза и умеющих интерпретировать данные численных прогнозов применительно к нему;
- детальном изучении возможностей прогностических методик применительно к данным условиям;
- создании пользовательского веб-интерфейса для оперативного доведения и визуализации различной информации;
- возможности онлайн-верификации численных расчетов метеопараметров для улучшения качества информации и коррекции прогнозов;
- базовых терминах и градациях согласно Наставлению [9], но с учетом требований заказчика метеоинформации;
- прогностическая продукция может иметь разнообразный вид и детализацию, но должна максимально отражать цели и требования потребителя/заказчика метеорологической информации.

Невозможность в настоящее время выпуска автоматизированных детализированных численных прогнозов погоды и особенно штормовых предупреждений/консультаций о неблагоприятных и опасных явлениях погоды без коррекции оперативного синоптика-прогнозиста делает актуальным весь разработанный комплекс мер по специализированному метеорологическому обеспечению.

Список литературы

1. 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. № 359. С. 48-57.
2. 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.
3. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды. РД 52.27.723-2009. 22 с.
4. Дмитриева Т.Г., Васильев Е.В. Опыт прогнозирования экстремальных явлений погоды в ходе подготовки и проведения зимних Олимпийских игр "Сочи-2014" // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 31-44.

5. Итоговый отчет о результатах работы Росгидромета по метеорологическому обеспечению XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи. Москва, 2014. 84 с.

6. Концепция подготовки и проведения метеорологического обеспечения Всемирной зимней Универсиады 2019 года в г. Красноярске. Москва, 2017. 127 с.

7. Лукьянов В.И., Дмитриева Т.Г., Васильев Е.В. Об опыте метеорологического обеспечения в период подготовки и проведения зимних XXII Олимпийских и XI Паралимпийских игр 2014 г. в Сочи // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 5-18.

8. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В. Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпийских игр "Сочи-2014" // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 31-48.

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

10. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 2. СПб., 2009. 312 с.

11. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 3. СПб., 2009. 216 с.

12. Технический проект. Гидрометеорологическое обеспечение подготовки и проведения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр в г. Сочи в 2014 году, в том числе противолавинное. М., 2010. 117 с.

13. Технический проект. Метеорологическое обеспечение подготовки и проведения XXIX Всемирной зимней Универсиады 2019 года в г. Красноярске. М., 2017. 88 с.

14. Фёдорова В.В., Лысак Д.П. Физико-географические, погодно-климатические и сезонные особенности района проведения Игр. Местные особенности основных синоптических процессов. СЦГМС ЧАМ, Сочи. <http://sochi.meteomfo.ru/climate>.

References

1. Vasil'ev A.A., Vil'fand R.M., Golubev A.D. Joint use of mesoscale numerical and conceptual models in operational forecasting of severe weather events. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 48-57 [in Russ.].

2. Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L. A System for statistical interpretation of numerical weather prediction model outputs for medium-range weather forecasting. 70 let Gidromettsentru Rossii. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1999, pp. 118-133. [in Russ.].

3. Bazovye trebovaniya k tekhnologii podgotovki kratkosrochnykh prognozov pogody. [Base requirements for the technology of short-range weather forecast preparation. RD 52.27.723-2009]. Obninsk, 2009, 22 p. [in Russ.].

4. Dmitrieva T.G., Vasil'ev E.V. Forecasting extreme weather phenomena and processes during the test events and Sochi-2014 Olympic and Paralympic Games. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 8, pp. 513-522. DOI: 10.3103/S1068373915080038

5. Itogovyy otchet o rezul'tatah raboty Rosgidrometa po meteorologicheskomu obespecheniyu XXII Olimpiyskih zimnih igr i XI Paralimpiyskih zimnih igr 2014 goda

v g. Sochi [Final report on the results of Roshydromet activities on weather services for the Sochi-2014 XXII Olympic Winter Games and XI Paralympic Winter Games]. Moscow, 2014, 84 p. [in Russ.].

6. Koncepciya podgotovki i provedeniya meteorologicheskogo obespecheniya Vsemirnoy zimney Universiady 2019 goda v g. Krasnoyarske [Concept of Preparation and Holding of Weather Services for the 2019 FISU Winter World University Games in Krasnoyarsk]. Moscow, 2017, 127 p. [in Russ.].

7. Luk'yanov V.I., Dmitrieva T.G., Vasil'ev E.V. Weather services for the test events and Sochi-2014 Olympic and Paralympic Games. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 8, pp. 495-503. DOI: 10.3103/S1068373915080014.

8. Murav'ev A.V., Kiktev D.B., Bundel' A.Yu., Dmitrieva T.G., Smirnov A.V. Verification of high-impact weather event forecasts for the region of the Sochi-2014 Olympic Games. Part I: Deterministic forecasts during the test period. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 584-597. DOI: 10.3103/S1068373915090034.

9. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. RD 52.27.724-2019 [Guidelines on General-purpose Short-range Weather Forecasting. RD 52.27.724-2019]. Moscow, 2019, 65 p. [in Russ.].

10. Rossiyskiy gidrometeorologicheskii enciklopedicheskiy slovar'. Tom 2 [Russian hydrometeorological encyclopedic dictionary, vol. 2]. Saint Petersburg, 2009, 312 p. [in Russ.].

11. Rossiyskiy gidrometeorologicheskii enciklopedicheskiy slovar'. Tom 3. [Russian hydrometeorological encyclopedic dictionary, vol. 3]. Saint Petersburg, 2009, 216 p. [in Russ.].

12. Tekhnicheskii proekt. Gidrometeorologicheskoe obespechenie podgotovki i provedeniya XXII Olimpiyskikh zimnih igr i XI Paralimpiyskikh zimnih igr v g. Sochi v 2014 godu. [Technical project. Weather Services for Preparing and Holding Sochi-2014 XXII Olympic and XI Paralympic Games]. Moscow, 2010, 117 p. [in Russ.].

13. Tekhnicheskii proekt. Meteorologicheskoe obespechenie podgotovki i provedeniya XXIX Vsemirnoy zimney Universiady 2019 goda v g. Krasnoyarske [Technical project. Weather Services for Preparing and Holding the 2019 FISU Winter World University Games in Krasnoyarsk]. Moscow, 2017, 88 p. [in Russ.].

14. Fedorova V.V., Lysak D.P. Fiziko-geograficheskie, pogodno-klimaticheskie i sezonnye osobennosti rayona provedeniya Igr. Mestnye osobennosti osnovnykh sinopticheskikh processov [Physiographic, weather, climatic, and seasonal features of the area of the 2014 Winter Olympic Games. Local features of the main synoptic processes]. STsGMS ChAM: Sochi. Available at: <http://sochi.meteomfo.ru/climate> [in Russ.].

Поступила 27.01.2022; одобрена после рецензирования 17.03.2022;
принята в печать 30.03.2022.

Submitted 27.01.2022; approved after reviewing 17.03.2022;
accepted for publication 30.03.2022.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ журнала «Гидрометеорологические исследования и прогнозы»

1. В журнале публикуются статьи по проблемам современных исследований в области теории и практики гидрометеорологического прогнозирования. Статья должна быть оригинальным законченным научным исследованием, в ней рекомендуется особо подчеркнуть научный вклад автора.

Согласно этике научных публикаций, авторы не должны допускать дублирования публикаций, предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

2. В целях обеспечения качества публикуемых материалов и соблюдения авторских прав, все поступающие в редакцию журнала статьи проходят проверку на плагиат (наличие заимствований) через систему «*Antiplagiat*» и только после этого отправляются на рецензирование.

3 Статьи, поступающие в редакцию журнала, подлежат обязательному одностороннему слепому *рецензированию*. Порядок рецензирования рукописей представлен на сайте: <http://www.meteoinfo.ru/review-order>.

4. Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии с изложенными ниже требованиями. Не соответствующие требованиям рукописи будут возвращены авторам.

5. В комплект статьи должны входить:

- основной текст статьи с заглавием статьи на русском и английском языках;
- индекс УДК, соответствующий теме статьи;
- фамилии и инициалы всех авторов (полностью). Для группы авторов необходимо указать, с кем вести переговоры и переписку;
- аффилиация (организация и ее местонахождение) для всех авторов. Автор может указать в аффилиации более одной (2–3) организации с условием, что такая множественная аффилиация при приведении описываемых результатов научных исследований полностью оправдана и достоверна;
- текст авторского резюме (далее – аннотация) на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- иллюстративный материал в виде отдельных файлов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
- названия таблиц и подрисуночные подписи на русском и английском языках;
- акт(ы) экспертизы (1 экз.).

6. *Структура статьи* обычно включает введение с постановкой проблемы и указанием актуальности, цели и задачи, методы, результаты, заключение. В конце статьи могут быть приведены благодарности лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, дана ссылка на номера грантов на выполнение работы. *Благодарности даются на русском, а затем на английском языках.*

Объем статьи – до 20 стр. текста (через 1,5 интервала), включая таблицы, рисунки и список литературы. Объем заказных статей определяется редколлегией.

Текст набирается в формате Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем на листе форматом А4 с полями: нижнее, верхнее и левое – 25 мм, правое – 15 мм. Выравнивание по ширине. Абзацный отступ 1 см. Не допускается формирование абзацного отступа с помощью пробелов и табуляции. Все слова внутри абзаца разделяются одним пробелом.

Подзаголовки набираются отдельной строкой жирным шрифтом; могут быть пронумерованы или без нумерации (на усмотрение авторов).

7. Для всех журналов без исключения существуют требования, предъявляемые зарубежными базами данных к *заглавиям* статей:

- заглавия научных статей должны быть информативными (Web of Science это требование рассматривает в экспертной системе как одно из основных);
- в заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения;
- в переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов;
- в названиях не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам (это также касается аннотаций и ключевых слов).

При формулировке названия публикации, составлении аннотации, выборе ключевых слов необходимо помнить, что именно эта часть направляется в базы данных и должна представлять интерес и быть понятной как российским читателям, так и зарубежному научному сообществу.

8. Аффiliation в статьях должна быть представлена так, чтобы правильно идентифицировать автора и исключить вероятность потери публикаций авторов, имеющих распространенную фамилию. Поэтому важно придерживаться унифицированного названия организации, как правило, зафиксированного в уставе организации и представленного на сайте организации.

9. Обязательные требования к *аннотации*:

- аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов),
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- в аннотации автор должен кратко представить результаты своей работы. Поэтому одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение;
- аннотация должна содержать значимые слова из текста статьи и использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Должна быть написана в форме активного залога: «исследование показало».

В требованиях зарубежных издательств к статьям на английском языке указывается на объем аннотации в размере 100-200 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк). В тексте английской аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

11. Ключевые слова должны

- расширять возможности нахождения статьи средствами поисковой системы;
- отражать основное содержание статьи, предметную область исследования;
- выстраиваться от общего к частному;
- включать 5–10 понятий.

12. В «традиционном» списке источников на языке оригинала описание всех источников (и русскоязычных, и иностранных) дается в соответствии с правилами российских ГОСТов. Список *литературы* должен быть пронумерован и упорядочен по алфавиту. Фамилии выделяются курсивом, пробел между именем и отчеством не ставится. В списке литературы приводятся все авторы, участвовавшие в написании той или иной работы.

Для списка литературы на латинице (*References*) не применимы правила русского ГОСТа, поскольку используемые в нем знаки не воспринимаются

зарубежными системами и ведут к ошибкам и потере данных. Подробное описание оформления списка литературы на латинице представлено на сайте журнала (<http://journal.meteoinfo.ru>; <https://meteoinfo.ru/proceedings>).

12. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ. Обозначения единиц физических величин набирают прямым шрифтом (Па, Вт/м², Дж/(кг·К) и т. д.). Между цифрой и единицей измерения вставляется один пробел, например 5 м/с, 3 %.

Пределы величин приводятся следующим образом: 17–20 мм, от 17 до 20 мм. Кавычки («...»). Не допускается использовать дефис (-) вместо знака тире (–); цифры 0 и буквы О в надстрочном написании в качестве символа градуса.

13. *Таблицы* с заголовками размещаются на отдельных страницах после основного текста статьи. Ссылка на таблицу в тексте: в табл. 1. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Таблицы следует создавать в режиме «Таблица» (Вставка – Таблица). Ширина таблицы не должна быть больше полосы набора текста (книжной или альбомной ориентации). Кегль 11.

Оформление заголовка таблицы:

Таблица 1. Название таблицы

14. *Рисунки* должны быть представлены на отдельных страницах после основного текста статьи. В текст рисунки не вставлять. Ссылка на рисунок в тексте: на рис. 1.

Рисунки также должны быть подготовлены в отдельных файлах в графических форматах .jpg, .tif (для возможного их редактирования), должны быть четкими, с учетом последующего уменьшения. Все надписи на картах, рисунках, схемах, диаграммах должны быть на русском языке.

Оформление подписи рисунка (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

№ 1 (383)

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

Издатель: ФГБУ «Гидрометцентр России»
Адрес: 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1
Телефон: (499) 252-34-48
e-mail: hmc@metcom.ru
www.meteoinfo.ru

Подписано в печать 30.03.2022. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 300 экз. Заказ № 1947
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3