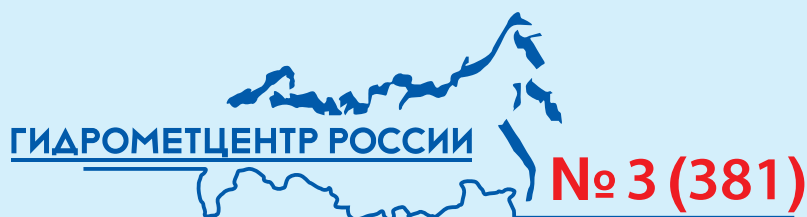


ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ



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»

№ 3 (381)

Под редакцией
д-ра геогр. наук И.Н. Кузнецовой

HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH and FORECASTING

No. 3 (381)

Москва
2021

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.

Представлены исследования, посвященные диагностике и прогнозированию опасных явлений погоды: сильных шквалов и сильных осадков. Условия образования и эволюции полярного циклона в Баренцевом и Карском морях исследуются в связи с сопутствующими опасными погодными явлениями над акваториями северных морей. Анализируются метеорологические предпосылки экстремального понижения уровня Каспийского моря на северо-востоке акватории в апреле 2019 г. Рассматривается роль Охотского тропосферного циклона в формировании экстремальной температуры воздуха на береговых станциях в середине зимы 1950–2019 гг. Излагаются результаты исследований изменения климатических условий Юго-Восточного Забайкалья за период вегетации на основе метеорологических и дендрохронологических данных. В разделе морские и гидрологические прогнозы представлено исследование изменений климатических норм в долгосрочном прогнозе ледовитости Охотского моря. Выполнена оценка возможности прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа. В разделе атмосферные процессы и загрязнение атмосферы показано применение метеорологического показателя рассеивания примеси для прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий. Обсуждается способ уточнения эмиссий, используемых в расчетах химических транспортных моделей. Впервые публикуется перевод с комментариями международных требований ВМО к компетенции метеорологов-прогнозистов.

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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, ВНИИСХМ 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 studies dealing with the diagnosis and prediction of severe weather events (severe squalls and heavy precipitation) are presented. The conditions for the formation and evolution of the polar cyclone in the Barents and Kara seas are investigated in connection with the accompanying weather hazards over the northern seas. The meteorological prerequisites for the extreme water level drop in the northeast of the Caspian Sea in April 2019 are analyzed. The role of the Okhotsk tropospheric cyclone in the formation of extreme air temperatures at coastal stations in the middle of winter during 1950–2019 is considered. The results of studying changes in climatic conditions in southeastern Transbaikalia during the growing season are presented according to meteorological and dendrochronological data. The section Marine and Hydrological Forecasts presents a study of changes in climate norms in the long-term forecasting of the Sea of Okhotsk ice cover. The possibility of forecasting the flow of Russian rivers by the hydrograph extrapolation method is estimated. The section Atmospheric Processes and Atmospheric Pollution shows an application of the meteorological indicator of pollutant dispersion for predicting adverse meteorological conditions. The method of refining emissions used in the calculations of chemical transport models is discussed. A translation with comments on the WMO international competency requirements for public weather forecasters is published for the first time.

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

Khristofov 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

Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования	6
<i>Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М.</i>	
Физико-синоптические предикторы, определяющие формирование сильных ливневых осадков	24
<i>Алексеева А.А., Песков Б.Е.</i>	
Особенности формирования и эволюции полярного циклона в Баренцевом и Карском морях в декабре 2020 года	44
<i>Нестеров Е.С., Жупанов В.Д., Федоренко А.В.</i>	
Метеорологические условия формирования экстремального понижения уровня в северо-восточной части Каспийского моря в апреле 2019 года	53
<i>Стамбеков М.Д.</i>	
Охотский тропосферный циклон и его роль в формировании экстремальной температуры воздуха в январе 1950–2019 гг.	64
<i>Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В.</i>	
Изменения климатических условий Юго-Восточного Забайкалья за период вегетации по метеорологическим и дендрохронологическим данным	80
<i>Вахнина И.Л., Носкова Е.В.</i>	

Морские и гидрологические прогнозы

Исследование изменений климатических норм в долгосрочном прогнозе ледовитости Охотского моря	99
<i>Анжина Г.И., Вражкин А.Н.</i>	
Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов	115
<i>Бориц С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.</i>	

Атмосферные процессы и загрязнение атмосферы

Прогнозирование метеорологического показателя рассеивания загрязняющих веществ в приземном воздухе	131
<i>Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И.</i>	
Уточнение данных о землепользовании для расчетов эмиссий в химической транспортной модели CHIMERE на примере нижегородского региона	150
<i>Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю.</i>	

Информационные сообщения

Международные требования к компетенции метеорологов-прогнозистов	162
<i>Васильев Е.В.</i>	

CONTENTS

General circulation and characteristics of the atmosphere

- Diagnosis of severe squalls based on the data of DMRL-C Doppler weather radars and numerical modeling 6
Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M.
- Physical and synoptic predictors and their optimal values leading to the formation of heavy rainfall 24
Alekseeva A.A., Peskov B.E.
- Features of formation and evolution of a polar cyclone in the Barents and Kara seas in December 2020 44
Nesterov E.S., Zhupanov V.D., Fedorenko A.V.
- Meteorological conditions of extreme low water level in the northeastern part of the Caspian Sea in April 2019 53
Stambekov M.D.
- The Okhotsk tropospheric cyclone and its role in the occurrence of extreme air temperature in January in 1950-2019 64
Shatilina T.A., Tsitsiashvili G.Sh., Radchenkova T.V.
- Changes in climatic conditions in southeastern Transbaikalia during the growing season according to meteorological and dendrochronological data 80
Vakhnina I.L., Noskova E.V.

Marine and hydrological forecasts

- Studying changes in climate normal in long-term forecasting of the Sea of Okhotsk ice cover 99
Anzhina G.I., Vrazhkin A.N.
- Assessment of runoff predictability for the Russian rivers depending on their catchment characteristics by the hydrograph extrapolation method 115
Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V.

Atmospheric processes and air pollution

- Forecasting a meteorological indicator of pollutant dispersion in surface air 131
Kuznetsova I.N., Tkacheva Yu.V., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I.
- Refinement of land use data for emission calculations in the CHIMERE chemistry-transport model: A case study for the Nizhny Novgorod region 150
Borisov D.V., Shalygina I.U.

Informational notes

- International Competency Requirements for Public Weather Forecasters 162
Vasil'ev E.V.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-6-23>

УДК 551.501.81

Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования

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

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

Представлен подход автоматизированного диагностирования шквалов в градации опасных явлений (≥ 25 м/с) по радиолокационной информации сети ДМРЛ-С с использованием данных численного моделирования. Дискриминантная функция для диагностирования ранее апробирована при автоматизированном прогнозе шквалов в градации опасных явлений. Предикторами являются максимальная конвективная скорость, рассчитываемая по данным ДМРЛ-С, и лапласиан приземного давления, прогнозируемый в узлах сетки радиолокационных данных $0,05 \times 0,05^\circ$ с временным разрешением 10 минут по региональной модели Гидрометцентра России. Предлагаемый подход диагностирования протестирован в период с 1 мая по 31 июля 2020 г. (более 13000 сроков наблюдений). Результаты исследований позволяют получить дополнительные данные о шквалах в градации опасных явлений погоды и могут быть использованы для уточнения краткосрочных прогнозов и штормовых предупреждений о таких явлениях.

Ключевые слова: диагностирование, шквал, градация опасных явлений, радиолокационные данные, ДМРЛ-С, результаты моделирования

Diagnosis of severe squalls based on the data of DMRL-C Doppler weather radars and numerical modeling

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

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

The approach to the automated diagnostics of severe squalls (≥ 25 m/s) based on the DMRL-C radar network information and the results of numerical modeling is presented. The discriminant function used for the diagnostics was previously tested during the automated forecast of severe squalls. The predictors are the maximum convective velocity calculated from the DMRL-C data and the Laplacian of surface pressure predicted at the $0.05 \times 0.05^\circ$ radar data grid points with a temporal resolution of 10 minutes according to the regional model of the Hydrometeorological Center of Russia. The proposed approach was tested during the period from May 1 to July 31, 2020 (more than 13000 observation moments). The presented results will provide additional data on severe squalls and can be used to refine short-term forecasts and storm warnings about such weather events.

Keywords: diagnostics, squall, severe weather events, radar data, DMRL-C, simulation results

Введение

Сильные шквалы со скоростью ветра ≥ 25 м/с, относящиеся к градации опасных явлений (ОЯ) погоды, могут приводить к разрушениям жилых и хозяйственных построек, повреждениям технических сооружений, транспортных средств и линий электропередач, человеческим жертвам. Несмотря на то, что на Европейской территории России (ЕТР) в летний период года из всех опасных конвективных явлений погоды чаще отмечаются ливни (63 %), а на шквалы градации ОЯ приходится только 14 %, именно опасные явления со шквалами значительно чаще других приводят к значительному ущербу [12]. Поэтому их изучение, диагностика и прогнозирование являются актуальными задачами метеорологии и имеют практическое значение для целей принятия превентивных мер защиты.

При диагностике шквалов с помощью доплеровских локаторов ДМРЛ-С, сеть которых расширяется на территории России, на карте метеоявлений среди всех выявляемых метеорологических явлений именно шквалам отводятся цифры кода от 16 до 18 в зависимости от силы ветра [9]. Цифры кода увеличиваются с повышением опасности от возникшего явления. Большую цифру кода (код 19) имеют только смерчи.

В настоящее время диагностика шквалов на основе радиолокационной информации ДМРЛ-С проводится с использованием алгоритмов, реализованных в рамках программного обеспечения вторичной обработки данных ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» [11]. В процессе верификации продукции ДМРЛ-С с диагностируемыми явлениями выявляются недочеты, в настоящее время готовится новая версия программного обеспечения [9].

На карте метеоявлений ДМРЛ-С шквалы сопутствуют грозам различной интенсивности. В [9] отмечается, что алгоритм расчета шквалов таков, что шквалы у поверхности Земли, образующиеся при прохождении кучево-дождевой облачности, сопровождающейся ливнями, на карте метеоявлений зачастую не отображаются. Кроме того, значительную часть шквалистых усиления ветра (до 30–40 %) ДМРЛ-С объективно не может идентифицировать, так как они приходятся на область отсутствия радиоэха. Одновременно указывается, что шквалистые усиления ветра у поверхности Земли могут быть зафиксированы на карте доплеровской скорости самого нижнего уровня наблюдений (на высоте определения осадков).

Известно, что в условиях, когда диагностируется шквал со скоростью ≥ 25 м/с, возможно появление смерча. Именно поэтому особенно важно как можно точнее диагностировать шквалы со скоростью 25 м/с и более. Представленные исследования посвящены решению данной проблемы на основе авторских разработок, отличных от внедренного в оперативную работу ДМРЛ-С варианта диагностирования шквалов. Дополнительные данные о диагностированных шквалах в градации ОЯ могут помочь более точно и с большей заблаговременностью составлять штормовые предупреждения об их возникновении.

Материалы и методы исследования

Результаты представленного исследования получены на основе информации сети ДМРЛ-С на ЕТР в летний период 2020 г., а также данных моделирования региональной модели Гидрометцентра России, на основе которых рассчитывается лапласиан приземного давления с временным и пространственным разрешением радиолокационных данных – один из определяющих возникновение шквалов градации ОЯ предикторов.

Для исследований использованы: а) радиолокационные данные из созданной в Гидрометцентре России специализированной базы данных (БД) 9 локаторов ДМРЛ-С (Валдай, Внуково, Шереметьево, Брянск, Кострома, Смоленск, Нижний Новгород, Воейково, Вологда); б) модельные расчеты метеопараметров по расчетам региональной модели в 00 и 12 ч ВСВ.

При тестировании диагностированных шквалов в градации ОЯ использовались данные наблюдений метеорологических станций, передаваемые по кодам SYNOP и WAREP, а также данные сообщений о возникновении опасных явлений погоды из журнала ОЯ отдела краткосрочных прогнозов погоды и опасных явлений погоды по территории России Гидрометцентра России. Кроме того, использованы видео с сильными шквалами из сети Интернет.

Использованы методы экспериментально-теоретического уровня, позволяющие собрать факты, систематизировать и выявить неслучайные физические связи между возникновением сильных шквалов и параметрами атмосферы. К использованным теоретическим методам относится метод моделирования для расчета предиктора в экспериментально полученной зависимости для диагностирования шквалов в градации ОЯ в комплексе с радиолокационными данными. В основе использованных данных лежит основной метод исследования в метеорологии – метод наблюдений, а именно измерений ДМРЛ-С, позволяющий диагностировать такое атмосферное явление, как шквал.

Теоретические основы диагностики сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С

Применяемый в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» [11] алгоритм диагноза шквалов разработан на основе Методических указаний [10] для локаторов предыдущего поколения, а также приведенной в [6] зависимости.

График для диагностирования шквалов представлен на рис. 1 [6]. Для интерпретации грозы со шквалом используются значения радиолокационной отражаемости $\lg Z_3$ на уровне высоты изотермы -15°C (это приблизительно уровень на 2–2,5 км выше высоты нулевой изотермы) и превышения верхней границей облачности уровня тропопаузы.

Анализ связи скорости ветра у земли с отражаемостью и с разностью высот тропопаузы и верхней границы радиоэха S_b ($H_{\text{тр}} - H_b = \Delta H_{\text{тр}}$) показал (рис. 1), что можно выделить три зоны: I – шквал со скоростью

больше 20 м/с, II – шквал со скоростью 15...20 м/с, III – шквал со скоростью меньше 15 м/с. В I зоне величина $\Delta H_{\text{тр}}$ составляет от 1 до -3 км, а $\lg Z_3$ превышает 2,4 (согласно пересчета отражаемости в dBz: $\lg Z_3 \text{ (dBz)} = 10 \lg Z_3 + 18$; это 42 dBz). Отмечается, что наименьшее значение $\lg Z_3$ наблюдается в тех случаях, когда разность высоты радиоэха Сб и $H_{\text{тр}}$ достигает 3 км. С уменьшением разности до 1 км значение $\lg Z_3$ увеличивается до 4 (58 dBz). Во II зоне величина $\Delta H_{\text{тр}}$ составляет от 1,2 до -1,4 км, а $\lg Z_3$ изменяется от 2,9 (47 dBz) до 3,9 (57 dBz). В III зоне наибольшее значение $\Delta H_{\text{тр}}$ равно -0,5 км, а $\lg Z_3$ может изменяться в пределах 2,7–3,9 (45–57 dBz), причем наибольшее значение $\lg Z_3$ отмечается при $\Delta H_{\text{тр}} = 2$ км.

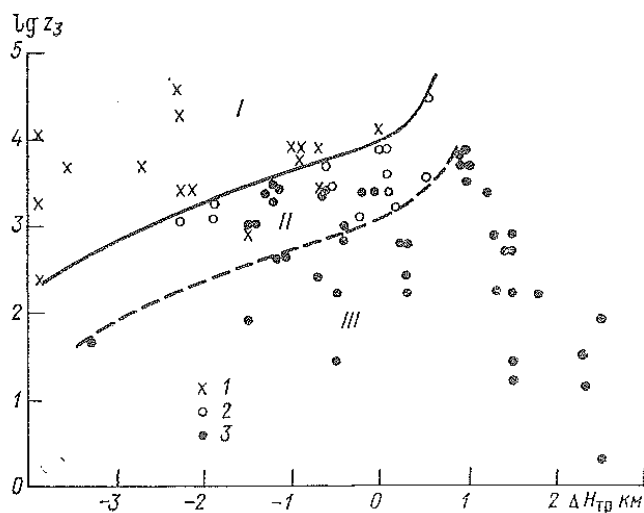


Рис. 1. График зависимости между $\lg Z_3$ и превышением верхней границы облачности уровня тропопаузы $\Delta H_{\text{тр}}$; зоны для оценки шквалов: I – шквал со скоростью больше 20 м/с, II – шквал со скоростью 15...20 м/с, III – шквал со скоростью меньше 15 м/с.

Fig. 1. The graph for the dependence between $\lg Z_3$ and the exceeding of the tropopause level by the cloud top $\Delta H_{\text{тр}}$; the zones to estimate squalls: I – squalls with a speed of 20 m/s, II – squalls with a speed of 15...20 m/s, III – squalls with a speed below 15 m/s.

Следует заметить, что график на рис. 1 позволяет диагностировать шквалы со скоростью больше 20 м/с, не выделяя градацию ≥ 25 м/с.

Результаты исследований

В [1] показано, что наиболее информативными предикторами для прогноза шквалов любой силы являются максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления.

Очевидна физичность первого предиктора. Только при наличии мощной восходящей струи может накопиться достаточно влаги, которая, обрушиваясь вниз, создает мощный нисходящий поток и, как следствие, шквал. Второй информативный предиктор отражает конвергенцию горизонтальных приземных потоков воздуха, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Лапласиан приземного давления важен и потому, что позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Поэтому использование сочетания этих предикторов в большей степени уменьшает недостатки использования их по отдельности.

На основе решения Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 04.04.2006 г. в Гидрометцентре России был внедрен в оперативную практику метод автоматизированного альтернативного прогноза дневных шквалов в градации ОЯ с заблаговременностью 12 и 24 ч с использованием выходной продукции региональной гидродинамической модели атмосферы [2–4]. Прогноз шквалов в градации ОЯ осуществляется по дискриминантной функции, предикторами которой являются именно два вышеуказанные наиболее информативные параметра атмосферы.

В представляемых исследованиях по диагностике шквалов градации ОЯ по данным ДМРЛ-С использована применяемая в рекомендованном к внедрению методе прогноза зависимость [2–4]:

$$L_{шк} = W_m + 2,16 \nabla P_3 - 35, \quad (1)$$

где W_m – максимальная конвективная скорость, м/с; ∇P_3 – лапласиан приземного давления, гПа/(300 км)². Причем расчеты проводятся только при условии, когда $W_m \geq 27$ м/с и $7,5 \geq \nabla P_3 \geq 3,5$ гПа/(300 км)².

При диагностике используется прогностический лапласиан приземного давления, рассчитанный на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России [8] с временным (10 мин) и пространственным (0,05 град.) разрешением, сопряженным с радиолокационными данными.

Максимальная конвективная скорость при диагностировании шквалов рассчитывается по данным ДМРЛ-С.

Таким образом, диагностика шквалов градации ОЯ проводится на основе данных ДМРЛ-С по зависимости, используемой в течение более десяти лет при автоматизированном прогнозировании шквалов градации ОЯ.

Диагностика максимальных конвективных скоростей

Сегодня при получении вторичных продуктов ДМРЛ-С максимальные конвективные скорости не диагностируются. Доплеровский локатор измеряет суммарный вертикальный поток воздуха, включая

относительную скорость выпадения осадков. Основные движения, обнаруженные локатором, скорее вызваны скоростями падения осадков, чем вертикальными потоками воздуха. По этой причине вертикальные движения, обнаруженные доплеровским локатором, являются не очень эффективным количественным показателем активной конвекции [7]. Поэтому максимальные конвективные скорости, оцененные предлагаемым подходом по данным ДМРЛ-С, уже сами по себе позволяют дополнить имеющиеся радиолокационные данные эффективным количественным показателем развития зон активной конвекции.

Максимальная конвективная скорость W_m (м/с) рассчитывается [5]:

$$W_m = 1,33[0,038H_m(\text{dBZ}_m - 18) + 3,52] + 4,0, \quad (2)$$

где H_m – высота верхней границы облачности (км); dBZ_m – максимальная радиолокационная отражаемость (dBz) в столбе.

На рис. 2 для примера приведены фрагменты карт диагноза максимальной конвективной скорости за 17.09.2020 г. по данным ДМРЛ-С. 17 сентября метеорологические условия на большей части ЕТР определялись влиянием атмосферных фронтов атлантического циклона, центр которого переместился со Скандинавии на центральные регионы. Температура была около и на 2–4 °С выше климатической нормы. Преобладающая дневная температура воздуха составляла 16...23 °С. В Центральном и Приволжском федеральных округах прошли сильные дожди, местами с грозами и порывистым ветром.

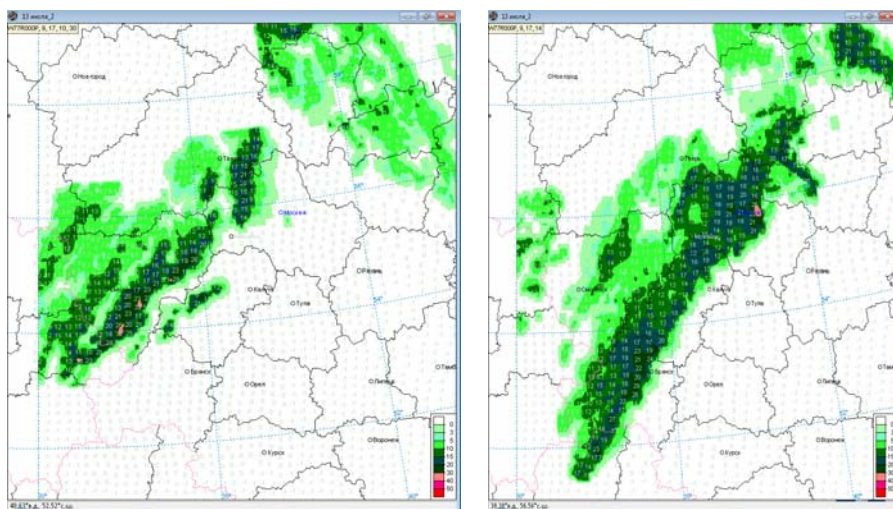


Рис. 2. Фрагменты карт диагностированной максимальной конвективной скорости (м/с) за 10.30 и 14.00 ч ВСВ 17.09. 2020 г. по данным сети ДМРЛ-С.

Fig. 2. The fragments of maps of the diagnosed maximum convective velocity (m/s) for 10.30 and 14.00 UTC on September 17, 2020 according to the DMRL-C network.

В Московской области отмечалось усиление ветра до 22 м/с. В районе Восточное Бирюлево Москвы ветер поднял в воздух металлический контейнер, повреждены автомобили. В Солнечногорске повалены деревья, повреждены автомобили, пострадали два человека. По данным объединенной грозопеленгационной системы ФГБУ «НИЦ «Планета» и ФГБУ «ВГИ», 17 сентября интенсивная грозовая активность была зарегистрирована в зоне холодного атмосферного фронта, который смещался с северо-запада через север и центр ЕТР. Наибольшее число вспышек молний 17 сентября было зарегистрировано в Московском регионе: 6095 (за период с 9.00 до 17.30 ч ВСВ), в том числе 561 в Москве (за период с 11.15 до 16.30 ч ВСВ). На 18.00 ч ВСВ в отдельных районах Москвы выпало до 36 мм осадков, что составило более половины месячной нормы сентября: в CAO – 35, СВАО – 35,8, ВАО – 30,2 и ЮВАО – 28 мм. Местами выпал град.

Как видно, диагностированные предлагаемым подходом максимальные конвективные скорости по данным ДМРЛ-С (рис. 2) характерны для развития зон активной конвекции с ливнями и шквалами [1, 5, 12].

Обсуждение результатов

В период 2016–2019 гг. диагностика шквалов в градации ОЯ по данным ДМРЛ-С предлагаемым подходом проводилась для отдельных случаев активных конвективных процессов. В данный период диагностики использовались данные 9 локаторов, с 2020 г. дополнительно создана база данных 26 локаторов.

Радиолокационные данные привязаны к сетке $0,05 \times 0,05^\circ$ и временному интервалу 10 минут. С технической точки зрения БД 9 локаторов заполняется без потери данных, для 26 локаторов имелись пропуски данных. Поэтому для рассматриваемых исследований использовалась БД 9 локаторов.

Шквалы градации ОЯ диагностировались ежедневно, включая дневное и ночное время, с 10-минутным разрешением в период с 1.05 по 31.07.2020 г., а также анализировались отдельные случаи за сентябрь при развитии активных конвективных процессов в Центральном федеральном округе России. Длительность периода тестирования алгоритма диагностирования шквалов в градации ОЯ составила более 90 дней (более 13000 сроков наблюдений).

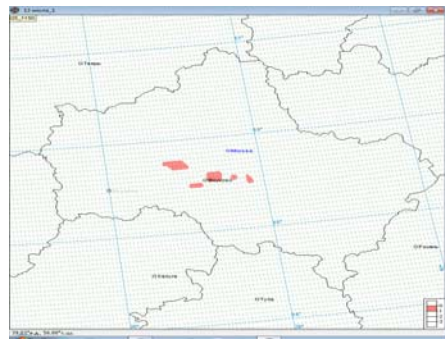
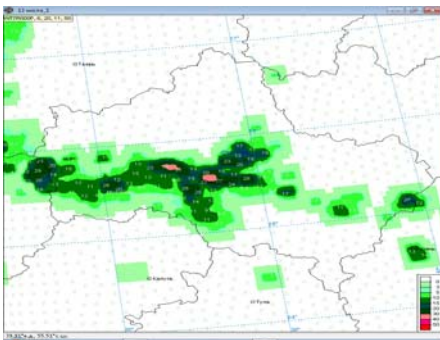
Верификация диагностированных и спрогнозированных опасных конвективных явлений в силу их локальности в условиях достаточно редкой сети наблюдений – сложная задача. Конвективным ячейкам свойственно объединяться друг с другом, а отдельным – затухать или резко активизироваться в своем развитии. Надо учитывать и взрывной характер возникновения опасных конвективных явлений. Поэтому, если даже на метеостанции отмечается шквал меньшей градации, чем опасное явление, уже на удалении нескольких километров или десятков километров может

возникнуть шквал большей интенсивности, где наблюдений нет. Особенно это сложно сделать относительно явлений в градации ОЯ, так как дополнительным фактом является и их меньшая повторяемость, чем аналогичных явлений меньшей интенсивности.

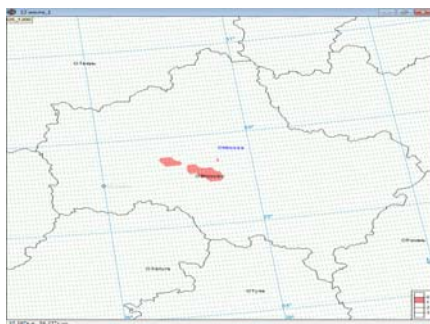
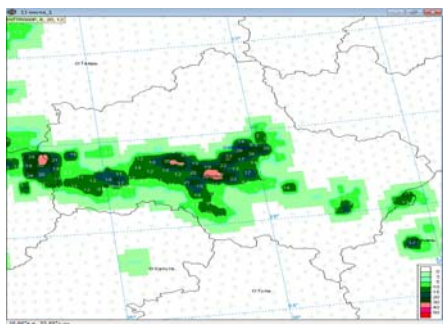
В нашем исследовании при тестировании диагностирования шквалов в градации ОЯ использованы данные наблюдений, передаваемые в кодах SINOP и WAREP, из журналов фиксирования опасных явлений погоды. Следует заметить, что для верификации радиолокационных данных о грозах и осадках на станциях наблюдений, а также шквалах скоростью до 20 м/с, более пригодны данные по коду WAREP. Данные о явлениях, передаваемые по коду SINOP, практически дублируют данные о них по коду WAREP, но с меньшей детализацией по времени (в срок наблюдения, между сроками). Верификация таких явлений, как шквал в градации ОЯ, проблематичен ввиду редкой их повторяемости на метеорологических станциях. Как правило такие явления проходят между станциями. Вызвала трудности и верификация их при тестировании диагностирования на исследуемой территории в рассматриваемый период.

Шквалы градации ОЯ диагностированы данным подходом на рассматриваемой территории в 11,77 % случаев от общего количества сроков наблюдений в исследуемый период: 0,86 % – в мае, 6,76 % – в июне, 4,15 % – в июле, что не противоречит их природной повторяемости по месяцам. Выявляемые данным подходом шквалы градации ОЯ имеют вид компактных округлых или вогнутых при наблюдении их в нескольких узлах сетки зон, часто в виде отдельных локальных точек.

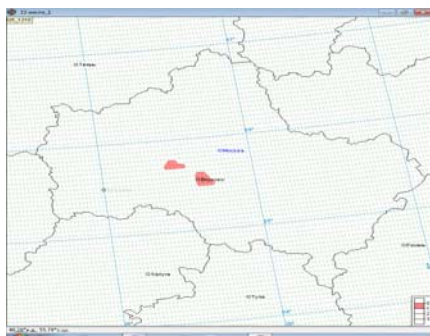
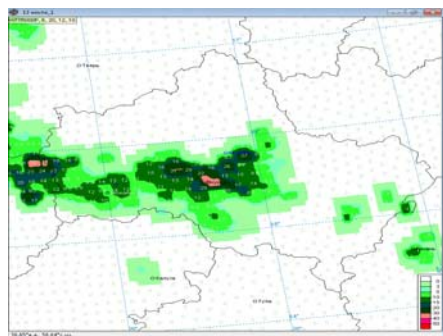
За весь исследуемый период практически в одном случае – 20 июня 2020 г. – зоны шквалов градации ОЯ были зафиксированы и диагностированы на станции (Внуково), где согласно данным по коду SINOP в 18 ч ВСВ зафиксирована скорость ветра между 6-часовыми сроками 26 м/с и по коду WAREP в 12.08 ч ВСВ скорости ветра 17 м/с с порывами 26 м/с. На рис. 3 приведены фрагменты карт диагностирования шквалов градации ОЯ 20 июня 2020 г. рассматриваемым подходом.



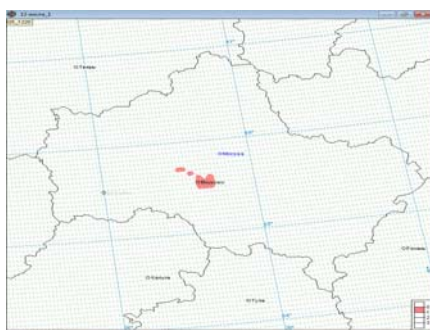
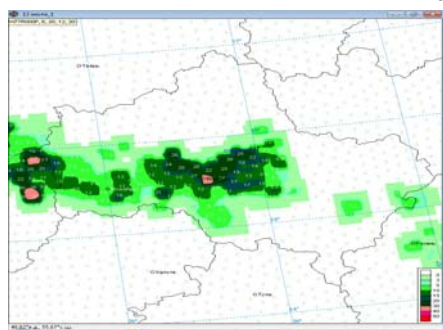
11.50 ч ВСВ



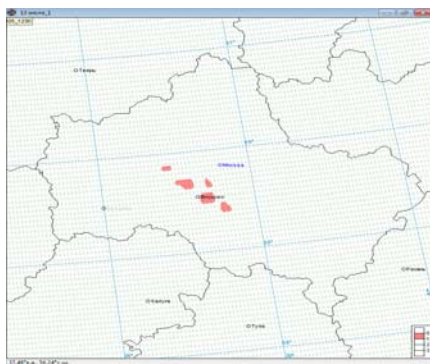
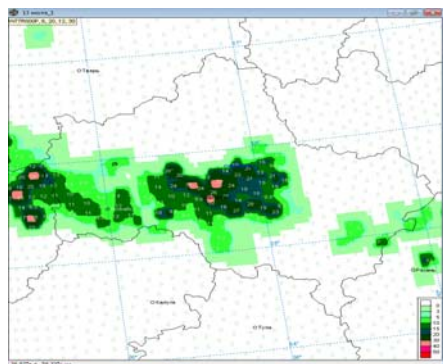
12.00 ч ВСВ



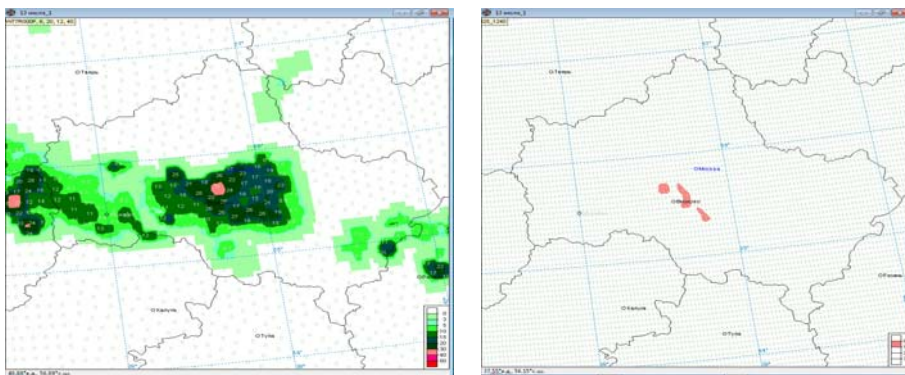
12.10 ч ВСВ



12.20 ч ВСВ



12.30 ч ВСВ

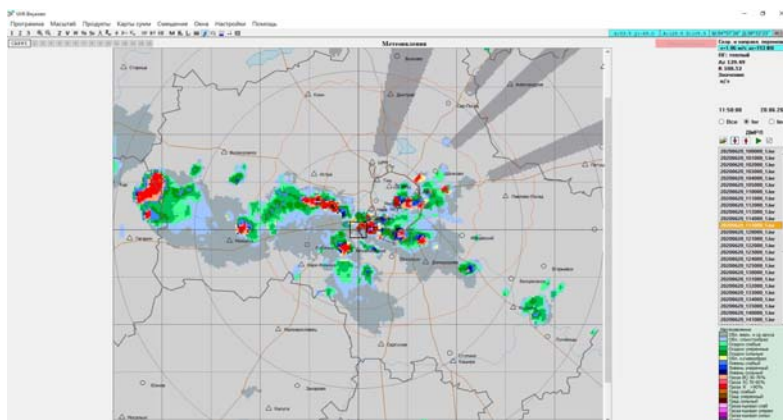


12.40 ч ВСВ

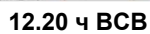
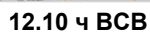
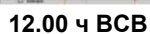
Рис. 3. Фрагменты карт с диагностированными максимальной конвективной скоростью (слева, м/с) и шквалами градации ОЯ (справа, цифра 1 (красный цвет) соответствует при визуализации возникновению явления) по данным сети ДМРЛ-С предлагаемым подходом в период 11.50–12.40 ч ВСВ 20.06.2020 г.

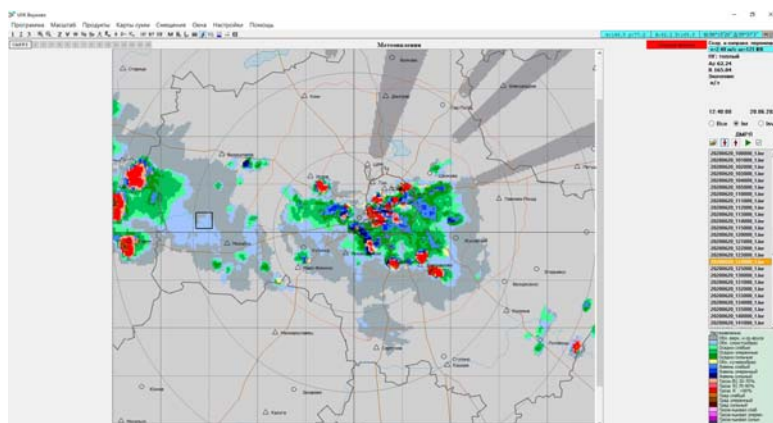
Fig. 3. The fragments of maps with the diagnosed maximum convective velocity (on the left, m/s) and severe squalls (on the right, the number 1 (red) corresponds to the occurrence of the phenomenon) according to the DMRL-C network data obtained using the proposed approach for the period of 11.50–12.40 UTC on June 20, 2020.

На территории Московского мегаполиса в период с 11.00 до 00.00 ч ВСВ следующего дня с прохождением активного холодного атмосферного фронта с северо-запада, согласно сообщения Росгидромета, прогнозировался комплекс неблагоприятных и опасных погодных явлений: гроза, сильный дождь (количество осадков 10–15 мм), местами очень сильный дождь (количество осадков 20–30 мм), в отдельных районах град, при грозе порывы ветра 15–20 м/с. На рис. 4 представлены карты метеоявлений ДМРЛ-С Внуково за те же сроки, что и на рис. 3.

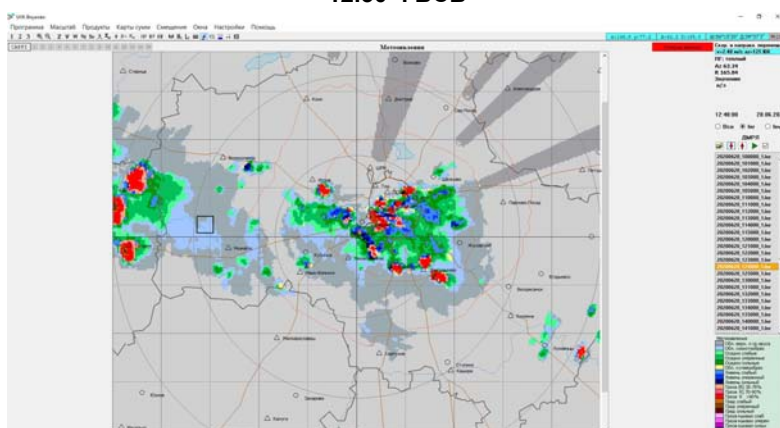


11.50 ч ВСВ





12.30 ч ВСВ



12.40 ч ВСВ

Рис. 4. Карты метеоявлений ДМРЛ-С Внуково, генерируемые в оперативном режиме, в период 11.50–12.40 ч ВСВ 20.06.2020 г.

Fig. 4. The maps of DMRL-C Vnukovo weather events generated online for the period of 11.50–12.40 UTC on June 20, 2020.

В таблице представлены данные, выбранные из Таблиц опасных явлений, генерированных ДМРЛ-С Внуково в оперативном режиме за тот же период наблюдений, позволяющие более наглядно провести анализ и сравнение с диагностированными шквалами градации ОЯ предлагаемым подходом.

Согласно Таблицам опасных явлений можно констатировать, что 20.06.2020 г. ДМРЛ-С Внуково начал диагностировать шквалы в дневное время с 10.10 ч ВСВ как в режиме отражаемости $\ln r$ (с получением информации в радиусе 250 км от локатора), так и в режиме скорости $\ln v$ (с получением информации в радиусе 125 км от локатора). В это время диагностировался умеренный шквал в обоих режимах в юго-западном

направлении на удалении 26–36 км от локатора. В 10.20 ч ВСВ в обоих режимах в том же направлении от локатора продолжал диагностироваться шквал умеренной интенсивности, а также в северо-западном направлении на удалении 26–37 км сильные шквалы в режиме Inr. Следует заметить, что в режиме Inv в этом районе в данный срок диагностировался шквал, но уже умеренный. В последующие 10-минутные сроки вплоть до сопоставимых сроков с данными, приведенными на рис. 3 и 4, диагностировались шквалы разной силы от слабых до сильных.

Таблица. Данные о диагностируемых в оперативном режиме ДМРЛ-С Внуково шквалах в период 11.50–12.40 ч ВСВ 20.06.2020 г. из Таблиц опасных явлений

Table. The data on the squalls diagnosed in the operational mode of DMRL-C Vnukovo during the period of 11.50–12.40 UTC on June 20, 2020 from the Tables of Severe Weather Events

Срок наблюдений	Режим работы ДМРЛ-С	Диагностированная сила шквала	Азимут, град	Расстояние от ДМРЛ-С Внуково, км
11.50	Inr	умеренный	293–329	14–40
		сильный	вокруг центра	0–17
	Inv	слабый	293–328	14–39
		сильный	вокруг центра	0–17
12.00	Inr	слабый	49–70	19–38
		сильный	вокруг центра	0–28
	Inv	сильный	вокруг центра	0–29
12.10	Inr	слабый	280–288	117–144
	Inv	не диагностированы	-	-
12.20	Inr	сильный	265–270	136–145
	Inv	не диагностированы	–	–
12.30	Inr	умеренный	26–93	10–33
		умеренный	264–270	134–148
	Inv	умеренный	27–93	10–34
12.40	Inr	слабый	25–82	11–48
	Inv	слабый	25–82	12–48

Сильные шквалы диагностировались в 10.40 ч ВСВ на удалении 99–114 км на востоке от локатора и в 11.00 ч ВСВ на востоке-северо-востоке на удалении 18–35 км в режиме Inr; в этом же районе в режиме Inv шквалы диагностировались уже меньшей интенсивности, умеренные. В 11.10 ч ВСВ диагностированный в режиме Inr как умеренный шквал, в том же направлении, что в предыдущий срок наблюдений, в режиме Inv диагностируется как сильный. В 11.20 ч ВСВ диагностировался сильный шквал

в этом же направлении от локатора в обоих режимах наблюдений, но уже на удалении 8–42 км. В 11.30 и 11.40 ч ВСВ диагностировались умеренные и слабые шквалы, совпадающие по силе в обоих режимах наблюдений. Следует отметить, что в эти сроки зоны со шквалами практически приблизились к локатору, удаление составило 2–36 км. Противоречий в диагностировании силы шквала в разных режимах наблюдений в эти сроки не наблюдается.

В 11.50 и 12.00 ч ВСВ вокруг центра (локатора) (рис. 4 и таблица) диагностировались сильные шквалы на удалении до 29 км, т. е. и во Внуково. В 12.10 ч ВСВ диагностировались только слабые шквалы на западе от локатора на удалении 117–144 км. В 12.20 – уже сильные в том же районе в режиме Inr; в 12.30 – умеренные шквалы как на удалении 10–34 км в северо-восточном направлении, так и на западе на удалении 134–148 км; в 12.40 ч ВСВ в северо-восточном направлении на удалении 11–48 км – слабые шквалы, в 12.50 – сильные на востоке на удалении 141–157 км, а также умеренные в том же направлении и на северо-востоке на удалении от 11 до 63 км. Позже три срока наблюдений диагностировались умеренные и слабые шквалы, но уже в основном на востоке и северо-востоке на удалении от 34 до 75 км. Далее сильные шквалы стали диагностироваться локатором в период с 13.30 до 15.40 ч ВСВ на удалении от 55 до 100 км. Начиная с 15.50 ч ВСВ диагностировались практически во все сроки наблюдений умеренные и слабые шквалы.

Анализ Таблиц опасных явлений за 20.06.2020 г. показал, что иногда в разных режимах наблюдений локатора диагностированные шквалы не совпадают по силе ветра. Отметим, что в одном и том же месте в режиме Inr диагностируются большие градации шквалов, чем в режиме Inv.

Сравнение диагностированных шквалов предлагаемым в исследованиях подходом с диагностированными в оперативном режиме ДМРЛ-С показывает, что в 11.50 и 12.00 ч ВСВ сильные шквалы диагностируются в обоих случаях. В 12.10 и 12.20 ч ВСВ наблюдается отличие: в оперативном режиме во Внуково и вокруг центра наблюдений (локатора) шквалы не диагностируются, а предлагаемым подходом диагностируются. И как отмечено выше, именно в 12.08 ч ВСВ такие шквалы отмечены по коду WAREP. Далее в 12.30 и 12.40 ч ВСВ диагностированные шквалы вблизи Внуково отличаются по силе: предлагаемым подходом в 12.30 ч ВСВ сильные, в оперативном режиме – умеренные; в 12.40 ч ВСВ – сильные и слабые соответственно.

Таким образом, анализ диагностированных зон со шквалами в оперативном режиме работы ДМРЛ-С в двух режимах, а также их диагностирования предлагаемым подходом показывает, что имеются как совпадения, так и различия в диагностировании как самого явления, так и его интенсивности. Это говорит о том, что требуется дальнейший анализ конкретных случаев с фактически возникшими шквалами градации ОЯ всеми подходами с целью выработки более точного алгоритма их

диагностирования. Кроме того, в случаях возникновения шквалов в градации ОЯ синоптику будет полезным иметь результаты диагностирования всеми подходами как дополняющие друг друга, чтобы дать более точные прогноз на ближайшее время и штормовое предупреждение.

Относительно предлагаемого подхода диагностирования шквалов градации ОЯ из сравнения можно сделать вывод, что в двух сроках, когда практически во Внуково наблюдался шквал порывами 26 м/с и ДМРЛ-С Внуково в оперативном режиме диагностировал вокруг локатора сильные шквалы, и предлагаемым подходом диагностировались шквалы градации ОЯ. Если сравнить карты метеоявлений ДМРЛ-С (рис. 4), на которых цветом предусмотрена визуализация явлений по 19 цифрам кода, с картами диагностированных шквалов градации ОЯ (рис. 3), то последние являются более наглядными. Следует заметить, что только Таблицы опасных явлений, генерированные в оперативном режиме работы локатора, позволили проанализировать диагностируемые шквалы в сравнении.

Остальные диагностированные случаи шквалов ОЯ за рассматриваемый период характеризовались большим количеством сообщений по коду WAREP для данной территории о грозах на станциях наблюдений, а чаще – грозах в окрестности станции, о порывах ветра в градации 15–20 м/с, реже до 23 м/с, сильных осадках, изредка о граде.

Анализируя данные о конвективных явлениях по коду WAREP за исследуемый период, можно сделать осторожный вывод, что ветры градации ОЯ практически не фиксируются станциями наблюдений. Исключением являются аэродромы, где уделяется повышенное внимание к наблюдениям за шквалами. Подтверждением является рассматриваемый на рис. 3 и рис. 4 случай во Внуково, а также случай фиксирования по коду WAREP шквала градации ОЯ в Сасове Рязанской области (не на территории исследований), где находится летное училище.

На остальных станциях наблюдений за рассматриваемый период шквалов градации ОЯ не зафиксировано, хотя в сети Интернет довольно много видео случаев о непогоде (выкорчеванные деревья, упавшая или летающая реклама, повреждения линий электропередач). Поскольку количество наблюдаемых на станциях случаев шквалов градации ОЯ мало (практически отсутствует) и статистически не обеспечивает объективность их верификации, получить объективные оценки даже за несколько лет при существующей сети наблюдений не представляется возможным.

Применение данного подхода диагностирования только к конкретным фактическим случаям может дать ответ, насколько он будет полезен для синоптиков. По повторяемости смерчей в России, представленной в [13], подтвержденной спутниковыми данными о ветровалах, можно утверждать, что и повторяемость шквалов градации ОЯ на основе данных метеорологических станций наблюдений намного занижена.

Заключение

Предложен подход диагностирования шквалов в градации ОЯ, отличный от применяемого в настоящее время в оперативной работе ДМРЛ-С. В комплексе используется информация сети ДМРЛ-С и численного моделирования. Алгоритм диагностирования шквалов реализован в рамках созданной в Гидрометцентре России автоматизированной технологии диагностирования опасных конвективных явлений погоды на основе сети ДМРЛ-С, функционирующей с июня 2021 г. в оперативном режиме работы с записью результатов диагностирования в БД через ~25 минут после срока наблюдений локаторами. Дополнительная продукция сети доплеровских радиолокаторов позволит повысить эффективность штормовых предупреждений и штормовых оповещений о возникновении шквалов в градации ОЯ.

Авторы выражают благодарность сотруднику Гидрометцентра России Е.В. Васильеву за предоставленные карты метеоявлений ДМРЛ-С Внуково за 20 июня 2020 года.

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.5.

Список литературы

1. Алексеева А.А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2019. № 2 (372). С. 41-58.
2. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 229 с.
7. Дональдсон Р.Дж., Чмела А.К. Распределение средней вертикальной скорости в грозе и ее вариации // Проблемы радиолокационной метеорологии: Сборник статей из трудов двенадцатой и тринадцатой конференций по радиолокационной метеорологии: Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 46-54.
8. Лосев В.М. Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 36-58.

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

10. Методические указания по использованию радиолокационных данных в синоптическом анализе и краткосрочном прогнозе погоды. М.: Гидрометеиздат, 1979. 23 с.

11. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (шифр «ГИМЕТ-2010») версия 02: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: ФГБУ «ЦАО», номер регистрации (свидетельства): 2018665447, дата регистрации: 05.12.2018.

12. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. 181 с.

13. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажиглов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Кюне Т. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17-34.

References

1. Alekseeva A.A. Specific features of the conditions of occurrence of active convection accompanied by severe squalls. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 372, no. 2, pp. 41-58 [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., 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.].

4. Alekseeva A.A., Losev V.M., Peskov B.E., Vasil'ev E.V., Nikiforova A.E. Prognost razvitiya zon aktivnoi konvekcii s osobo opasnymi yavleniyami na osnove regional'noi modeli Gidrometcentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 147-159 [in Russ.].

5. 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.].

6. Brylev G.B., Gashina S.B., Nizdoymnoga G.L. Radiolokatsionnye kharakteristiki oblakov i osadkov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 229 p. [in Russ.].

7. Donal'dson R.Dzh., Chmela A.K. Raspredelenie sredney vertikal'noy skorosti v groze i ee variatsii // Problemy radiolokatsionnoy meteorologii: Sbornik statey iz trudov dvenadtsatoy i trinadtsatoy konferentsiy po radiolokatsionnoy meteorologii: Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1971, pp. 46-54 [in Russ.].

8. Losev V.M. Regional'naya gidrodinamicheskaya model' prognoza Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 36-58 [in Russ.].

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

10. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu radiolokatsionnykh dannyykh v si-nopticheskom analize i kratkosrochnom prognoze pogody. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1979, 23 p. [in Russ.].

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

12. RD 52.27.339-93. Rukovodstvo po diagnozu i prognozu opasnykh i osobo opasnykh osadkov, grada i shkvalov po dannym meteorologicheskikh radiolokatorov i iskusstvennykh sputnikov Zemli. Moscow, ROSGIDROMET, 181 p.

13. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Shikhov A. N., Azhigov I. O., Selezneva E. V., Zakharchenko D. I., Antonescu B., Kuhne T. Tornadoes in the Rus-sian Regions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, no. 2, pp. 69-82. DOI: 10.3103/S1068373921020023.

*Поступила 21.07.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 21.07.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-24-43>

УДК 551.509.324.2

Физико-синоптические предикторы, определяющие формирование сильных ливневых осадков

А.А. Алексеева, Б.Е. Песков

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

Дано физическое обоснование и определены оптимальные значения физико-синоптических предикторов, позволяющих уточнять внедренные в Гидрометцентре России по рекомендации ЦМКП Росгидромета прогнозы сильных осадков. Диагностированные на основе радиолокационных данных параметры конвекции и интенсивность конвективного явления расширяют возможности уточнения прогноза сильных и очень сильных осадков и позволяют дать штормовое предупреждение с увеличенной заблаговременностью или уточнить штормовое оповещение.

Ключевые слова: сильные осадки, физико-синоптические предикторы, диагностированные параметры конвекции, данные ДМРЛ-С

Physical and synoptic predictors and their optimal values leading to the formation of heavy rainfall

A.A. Alekseeva, B.E. Peskov

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

The physical and synoptic predictors are presented, which allow refining the automated forecasts of heavy precipitation implemented in the Hydrometeorological Center of Russia on the recommendation of the Roshydromet Central Methodological Forecasting Commission, as well as hydrodynamic forecasts of precipitation and forecasts of weather forecasters. The physical substantiation of the considered predictors is given. Their optimal values for the formation of heavy precipitation are determined. The parameters of convection and the intensity of the convective phenomenon diagnosed on the basis of radar data further expand the possibilities of refining forecasts of heavy and very heavy precipitation and, if necessary, allow issuing a storm warning with a sufficient lead time or refining a storm warning.

Keywords: heavy precipitation, physical and synoptic predictors, diagnosed convection parameters, DMRL-C data

Введение

Сильные осадки нередко наносят существенный ущерб жизнедеятельности, вызывая подтопления отдельных зданий, а иногда приводят к наводнениям на обширной территории, к провалам грунта

на автомобильных трассах, его вымыванию на железнодорожном полотне, вымоканию сельскохозяйственных культур, а также осложняют посадку самолетов. К таким последствиям, как правило, приводят ливневые осадки в летнее время года, достигающие критерия «опасное явление» (ОЯ) (дожди с количеством ≥ 50 мм/12ч и сильные ливни количеством ≥ 30 мм/ч), формирующиеся чаще всего в зоне активной конвекции при прохождении через регион медленно перемещающегося фронта с волнами. До сих пор не только в России, но и в мировой практике не решена проблема точного прогноза не только очень сильных осадков, но и осадков градации ≥ 15 мм/12ч. Поэтому прогноз таких осадков является важным как с научной точки зрения, так и практической.

В России на данный момент времени решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета в 2006 и 2011 гг. [method.meteorf.ru] относительно прогноза дождей с количеством ≥ 50 мм/12ч и сильных ливней количеством ≥ 30 мм/ч рекомендованы к внедрению три автоматизированных метода, прогнозирующие осадки данных градаций: альтернативного прогноза ливней градации ОЯ [3, 5], максимального количества осадков в зонах конвекции [3, 5] и альтернативного прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34 мм/12ч, от 35 до 49 мм/12ч и 50 мм/12ч и более) [4] на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России с заблаговременностью 12 и 24 ч. Первый из этих методов рекомендован к внедрению в градации ОЯ. Относительно второго ЦМКП рекомендовала оперативно-прогностическим организациям Северо-Кавказского УГМС и Центрально-Черноземного УГМС, где проходили оперативные испытания метода, провести дополнительный анализ прогнозов максимального количества осадков в объединенной градации сильных и очень сильных осадков совместно с прогнозами осадков в градации ОЯ с целью выработки региональных практических рекомендаций по их комплексному использованию. Третий метод был принят к внедрению с максимальной пороговой градацией ≥ 35 мм/12ч, так как число случаев с осадками количеством ≥ 50 мм/12ч в период оперативных испытаний составило 11–17 в разные годы, что менее 5 % общей выборки, поэтому результаты испытаний прогнозов в градации ОЯ оказались статистически не обеспечены. В период принятия данных решений региональная модель Гидрометцентра России являлась базовой региональной гидродинамической моделью (решение ЦМКП от 11.05.2004 г.) [method.meteorf.ru].

Прогнозы сильных осадков рекомендованы к внедрению на данных модели с пространственным разрешением 75 км. Они рассчитываются в оперативном режиме, записываются в базу данных Гидрометцентра России. В настоящее время совершенствование методов прогноза сильных осадков на основе региональной модели не проводится. Основное внимание сегодня уделяется мезомасштабному моделированию. В Гидрометцентре России базовой моделью является COSMO-Ru:

13.04.2011 г. рекомендована версия COSMO-Ru 7 км, 15.12.2016 г. – COSMO-Ru2, 11.03.2021 г. – COSMO-Ru6ENA (шаг сетки 6,6 км), реализованная на базе конфигурации модели ICON-COSMO [method.meteorf.ru]. Согласно решению ЦМКП от 11.03.2021 г., оценки прогноза осадков представлены для градации ≥ 5 мм/12ч, однако при рассмотрении данного вопроса ЦМКП было отмечено, что оправдываемость осадков в градации ≥ 30 мм/12ч модели COSMO-Ru6ENA составляет 14 % и 20 % с заблаговременностью 18 ч и 30 ч соответственно.

Следует заметить, как показали сравнения в рамках проведенных оперативных испытаний осадков модели COSMO-Ru6ENA, и лучшие зарубежные модели на территории России имеют тот же порядок оправдываемости осадков в градации ≥ 30 мм/12ч. Так, у одной из самых успешных моделей прогноза осадков UKMO оправдываемость 17 % и 26 % с заблаговременностью 18 ч и 30 ч соответственно. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, конвективные облака, характерные для выпадения таких осадков, являются «подсеточными» процессами и часто моделями не описываются. Во-вторых, начальные данные, усваиваемые моделями, не улавливают местных особенностей для развития конвекции, что зависит от густоты и качества наблюдательной сети. Кроме того, источниками ошибок могут быть несовершенство описания физики и энергетики атмосферных процессов, а также потеря точности в процессе приближенного решения системы уравнений модели.

Более значимы при прогнозе конвективных явлений погоды ошибки в прогнозе температуры T и температуры точки росы T_d у поверхности Земли, так как каждый градус меняет ситуацию около уровня конденсации иногда на противоположную: T и T_d на 1–2 °C выше – и задерживающий слой у уровня конденсации будет преодолен термиком, Сб возникнет, выпадет до 10–50 мм осадков; T и T_d на 1–2 °C ниже – и задерживающий слой погасит подъем термика, Сб не возникнет, больших осадков не будет.

Стоит отметить, что точность прогнозов температуры T и температуры точки росы T_d у земли гидродинамическими моделями вблизи фронтов часто еще ниже, ошибки 1–2 °C в прогнозе T характерны, T_d прогнозируется еще менее точно. Такие же ошибки на высоте, например, на 2–3 км выше уровня конденсации, особенно при температуре конвективного элемента $T' \ll T$ на этом уровне, не изменяют прогноза «без осадков». Даже значительный задерживающий слой на высоте 4 км, например, также ничего принципиально не изменит: $(T'-T)$ составит 4–6 °C вместо 6–8 °C, вертикальная скорость – 8–12 м/с вместо 10–15 м/с, количество осадков при ливне уменьшится на 2–3 мм (например, 23–27 мм вместо 25–30 мм).

Задача данного исследования – найти способы уточнить прогнозы сильных осадков с помощью дополнительных предикторов для характеристики и учета неустойчивости и влажности. Кроме того, при использовании выходных модельных данных для расчета этих дополнительных,

как правило, более простых предикторов ошибки прогнозов могут оказаться меньше, чем при прогнозе самих сильных осадков в рамках модели.

Представляемые исследования направлены на решение важной проблемы повышения качества прогнозирования сильных и очень сильных осадков в летний период. Полученные результаты могут использоваться практикующим синоптиком в целях уточнения модельных прогнозов.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы данные измерений количества осадков на метеостанциях из материалов оперативных испытаний метода прогноза максимального количества осадков в зонах конвекции [3] за период июнь–август 2004 года: ежедневные 12-часовые суммы осадков в 10 областях Центрального федерального округа России (Калужская, Смоленская, Тверская, Тульская, Московская, Ярославская, Костромская, Рязанская, Владимирская и Ивановская). Общее число рассмотренных дней 859, из них 397 дней с осадками $\geq 0,6$ мм; 114 – ≥ 11 мм; 79 – ≥ 15 мм; 25 – ≥ 24 мм; 11 – ≥ 30 мм; 7 – ≥ 35 мм; 4 – ≥ 50 мм. Исследования проведены на выборке данного периода как на материалах, полученных непосредственно на местах испытаний и утвержденных ЦМКП.

Для исследований использованы другие доступные материалы, дополнительно характеризующие осадки: кольцевые и микрокольцевые синоптические карты дискретностью 3–6 часов, чаще всего за 12 ч ВСВ; более подробно – карты барической топографии АТ850 и др.

Синоптические карты Гидрометцентра России дают макромасштабную картину синоптической ситуации в целом. Хорошо проявляются зоны антициклонов, циклонов, седловин, ложбин, гребней (масштаба 1000–2000 км). Фронтальный анализ представляет вероятностную схему расположения больших (до 1000 км) фронтальных зон в целом во всей нижней половине тропосферы (1000–500 гПа).

В данном исследовании дополнительно проведен анализ приземного барического поля в окрестностях (до 1000–1500 км) исследуемых случаев сильных осадков через 1 гПа, а также полей влажности, температуры, скорости и направления ветра. Проведенный анализ позволил уточнить положение атмосферных фронтов и волн на них, выявить небольшие по площади барические образования с перепадом давления всего 1–3 гПа, не отраженные в макромасштабных полях. На поверхности 850 гПа также проведен дополнительный анализ поля геопотенциала через 1 дам; температуры (показателя абсолютной влажности) и дефицита температуры точки росы (показателя относительной влажности) через 1 °С. При анализе густота и направление изобар и изогипс согласовывались с направлением и скоростью ветра по известному квазигеострофическому закону и отклонению от него у поверхности Земли. Все это и учет тенденции давления у поверхности Земли позволили уточнить положение фронтов и волн, их

перемещение и эволюцию при формировании осадков, в том числе сильных. Таким образом, уточнены характеристики атмосферы, обуславливающие возникновение таких осадков.

Кроме того, в анализе конкретных случаев использовались прогностические осадки $Q_{\text{метод}}$, рассчитанные в оперативном режиме по вышеуказанному альтернативному методу прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градах [4] и методу максимального количества осадков в зонах конвекции [3]. Следует отметить, что методы прогноза разрабатывались РР-подходом (Perfect Prognosis). Метод прогноза, разработанный РР-подходом, позволяет использовать любую прогностическую модель физико-синоптических условий, каждая из которых вносит свои ошибки в конечный прогноз.

Примененный в рамках исследований подход можно использовать для уточнения количества сильных осадков, прогнозируемых другими методами в оперативном режиме.

Нами также использованы данные ДМРЛ-С в летние периоды 2016–2021 гг. с целью диагностики параметров конвекции и характеристик ливневых осадков по радиолокационной информации, особенно для процессов с сильными ливневыми осадками.

Результаты исследований

Вертикальная неустойчивость в автоматизированном альтернативном методе прогноза сильных осадков в зонах конвекции и в методе прогноза их максимального количества оценивается с помощью максимальной конвективной (в кучево-дождевом облаке) скорости восходящего потока (W_m), используя метод Н.И. Глушковой [9], один из наиболее надежных, многократно подтвержденных.

Смысл расчета заключается в оценке температуры T' сначала в термике, затем в облаке, поднимающемся с уровня максимальной температуры T (обычно у земли). Расчет ведется по слоям оценкой энергии неустойчивости по $(T'-T)$ каждого слоя. Температура T у земли прогнозируется на основании упомянутой выше региональной модели, а температура точки росы T_d – с использованием дополнительных соотношений T_d у земли и на поверхности 925 гПа, полученных эмпирически [1]. Градации осадков согласно методу [4] и максимальное количество осадков [3] определяются в первую очередь вертикальной неустойчивостью и влажностью в нижней половине тропосферы. Кроме того, учитываются вертикальные упорядоченные крупномасштабные движения. Метод прогноза осадков в трех градах комплексировал два подхода к прогнозу осадков, рекомендованных к внедрению: количественного прогноза для всех градаций и альтернативного для прогноза осадков в градации ОЯ.

Ниже описаны предлагаемые нами дополнительные предикторы для уточнения прогноза сильных ливней.

Дополнительные предикторы первой очереди

Влажность воздуха. Известно, что дефицит точки росы характеризует относительную влажность, влияющую на испарение влаги в кучево-дождевом облаке и под ним, а также и на солнечный прогрев через облачность, связанную с дефицитами. Можно утверждать, что на каждом уровне имеется оптимальный дефицит точки росы, отклонение от которого в любую сторону приводит к уменьшению осадков.

В связи с этим, предикторы, связанные с дефицитами точки росы, имеют следующий вид:

$$d'_i = (A - |d_i - B|), \quad (1)$$

где d'_i – предиктор с дефицитом точки росы на конкретной изобарической поверхности; d_i – дефицит на той же изобарической поверхности; A и B – эмпирически подобранные коэффициенты.

Предиктор d'_i по мере роста d_i сначала растет, достигает максимума, равного A , при $d_i = B$, а затем уменьшается, как это и следует из вышеупомянутых физических закономерностей.

Примерные значения эмпирических коэффициентов A и B уже известны в синоптической метеорологии. Так, оптимальный $d_{850} = B_{850} = 3$ °С. С учетом ошибок концепции MOS (расчеты на основе конкретной гидродинамической модели), B_{850} может быть 3,5–4 °С. A подбирается из следующих соображений: при $d_{850} \sim 0-0,5^\circ$, $d'_i \sim 0$ (прогрева нет, ливень невозможен), т. е. $A \sim 2-3$ °С. При $A = 3$, $d_{850} = 6 - d'_{850} = 0$, т. е. ливень невозможен, что соответствует известным немногочисленным фактам. Потому требуется проверить это на большем материале конкретной применяемой модели, при осадках разной величины вплоть до сильных и очень сильных до 30–50 мм/12ч.

При $d_{850} \gg 6^\circ$ слишком сухой воздух тем более делает невозможным ливень и $d'_{850} \ll 0$ характеризует степень недостатка условий для ливня: чем больше d_{850} , тем меньше d'_{850} , тем меньше вероятность ливня при прочих благоприятных для ливня условиях. Таким образом, d'_i может быть одним из:

$$\begin{aligned} d'_{850} &= (3 - |d_{850} - 3|), \text{ для дождя } d_{850} \text{ от } 1 \text{ до } 5^\circ\text{С}; \\ d'_{700} &= (3 - |d_{700} - 4|), \text{ для дождя } d_{700} \text{ от } 2 \text{ до } 6^\circ\text{С}; \\ d'_{500} &= (3 - |d_{500} - 5|), \text{ для дождя } d_{500} \text{ от } 3 \text{ до } 7^\circ\text{С}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рост d'_i и пределов d_i при ливнях обусловлен ростом с высотой нижнего предела насыщающего d_i надо льдом и ростом верхнего предела d_i по мере понижения абсолютной влажности. Наряду с физически

оптимальными значениями $A = 3$ и B от 3 до 5, при статистическом испытании на конкретной модели полезно проверить значения A от 2 до 4 и B от 2 до 7.

Горизонтальная неустойчивость влияет на ливни, как показано в [9], через фронты, волны на них, ложбины на линиях неустойчивости, т. е. через первоначальный упорядоченный импульс подъема у земли, который затем усиливается вертикальной неустойчивостью. Наиболее универсальным предиктором горизонтальной неустойчивости является лапласиан приземного давления:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \approx \frac{\Delta p}{\Delta x^2} + \frac{\Delta p}{\Delta y^2} = \nabla^2 p = L. \quad (3)$$

$L > 0$ определяет сходимость горизонтальных потоков и, как следствие, необходимый первоначальный динамический (вынужденный) подъем, усиливающийся затем упорядоченной термической конвекцией.

Если $L < 0$, то преобладает расходимость и нисходящее движение. Если $L \ll 0$, тем больше нисходящее движение в пограничном слое, тем больше препятствий для ливня: исходная (даже большая) влажность падает и может образоваться задерживающий слой – инверсия или замедленное падение с высотой температуры T , т. е. вертикальная устойчивость в тонком слое. Часто она в рамках моделей не прогнозируется из-за сглаживаний и недостаточной точности, но эмпирически по $L \ll 0$ проявляется.

При $L \gg 0$, большие восходящие движения повышают влажность до насыщения, появления слоистой облачности, уменьшения солнечного прогрева, прекращения термической конвекции, что также обычно препятствует ливням. Таким образом, существует оптимальная величина $L > 0$, отклонение от которой препятствует ливням. При $\Delta x = \Delta y \sim 300$ км оптимален $L \sim$ от 2 до 4 гПа/300 км², или примерно от 0 до 6 гПа/300 км², учитывая ошибки конкретной модели. Тогда соответствующий предиктор будет, аналогично (1):

$$L' = 4 - \left| \nabla_{300}^2 - 3 \right|. \quad (4)$$

Выбранный для расчета масштаб 300 км не лучший для конвекции. Можно попробовать 225, 150 и 75 км. Но ошибки прогноза L по горизонтали на 75–100 км, как показал опыт использования таких масштабов, не редкое событие, поэтому масштаб 225–300 км является с нашей точки зрения оптимальным. Полезным оказалось проверить вариации значений коэффициентов и для лапласиана приземного давления: A от 3 до 5 вместо 4 и B от 2 до 6 вместо 3.

Ветер в тропосфере, определяющий перенос облаков и зон ливней, фронтов и волн в прогнозах учитывается, очевидно, недостаточно. А чем сильнее ветер, тем быстрее облако проходит пункт измерения осадков,

тем меньше продолжительность ливня и меньше выпавших в данном пункте осадков. С другой стороны, при слабом ветре, штиле, облако малоподвижно, дождь продолжительный. В Сб образуется обширная накопальная, препятствующая солнечному прогреву, внизу далеко от Сб растекается охлажденный дождем воздух, отсекая приток в него теплого воздуха; интенсивность дождя уменьшается; соответственно, количество осадков тоже может уменьшиться.

Таким образом, можно предположить, что имеется оптимальная скорость ветра v . Поскольку перенос определяется средним ветром в слое 850–500 гПа, предиктор (5) тестировался на разные значения:

$$|v'_8|^5 = A - |v_8^5 - B|. \quad (5)$$

Примерно $|v'_8|^5$ от 5 до 7 м/с (от 4 до 10 м/с, учитывая допуск на ошибки модели), т. е. оптимально:

$$|v'_8|^5 = 9 - |v_8^5 - 6|. \quad (6)$$

Чем больше v' (v ближе к оптимуму), тем больше условий для ливня. Чем меньше v' (ветер или очень слабый, или слишком сильный), тем меньше условий для ливня. На атмосферных фронтах следовало бы брать не v , а только нормальную его составляющую, которая более точно определяет продолжительность дождя. Полезно испытать вариации значений коэффициентов: A от 7 до 12 и B от 5 до 8.

Выбранные как основные дополнительные предикторы первой очереди очень сильных дождей и ливней можно комплексовать с помощью дискриминантного и/или корреляционного анализа.

Наряду с этими или, возможно, взамен предлагается другое физико-статистическое объяснение – произведениями этих предикторов. Связи с ливнями получаются далеко не линейными, что в природе чаще и бывает.

Комплексный предиктор типа:

$$Q = a \cdot \sqrt[n']{Q_{\text{метод}}} \cdot \sqrt[n'']{d'_{850}} \cdot \sqrt[n''']{L'} \cdot \sqrt[n''']{v'}. \quad (7)$$

Расчет дает $Q = 0$ при равенстве нулю одного из сомножителей, даже несмотря на большую величину другого (остальных). Это действительно должно быть так. Например, если $d'_{850} \ll 0$ (воздух очень сухой, в котором ливней не бывает). $\sqrt[n'']{d'_{850}} = 0$, и $Q = 0$ несмотря на благоприятные прочие условия. С другой стороны, если ни один из сомножителей не равен 0, но очень маленький, требуется очень благоприятное одно или все условия, чтобы $Q >> 0$.

В частности, опыт использования результатов прогноза указанного метода [3] показывает, что иногда рассчитанные осадки $Q_{\text{метод}}$ при большой вертикальной неустойчивости составляют 50–100 мм, а фактически

выпадает осадков Q от 0 до 10 мм не только когда $d'_{850} \ll 0$, но и $L' \ll 0$. В этом случае тонкий задерживающий слой, сглаженный и недоучтенный при расчете $Q_{\text{метод}}$, прерывает конвективную струю вблизи уровня конденсации, и вместо потенциально возможного мощного Сб образуется Си.

Иногда и рассчитанные $Q_{\text{метод}} > 50$ мм, и воздух оптимально влажный, есть и атмосферный фронт, но $v' \ll 0$ (перенос слишком сильный), $n'''\sqrt{v'} = 0$, $Q \sim 0$, фактически выпадает от 0 до 10 мм. С другой стороны, иногда все условия благоприятны для ливня, хотя рассчитанные $Q_{\text{метод}} \sim 20$ мм, произведение же дает Q от 40 до 60 мм, что и отмечается фактически.

Корни 2–4 степеней, как и коэффициент a , подбираются на опытных данных, в частности чтобы влияние каждого сомножителя было соизмеримо между собой, а результирующие рассчитанные Q и фактические Q были в пределах $\pm 20\text{--}30\%$ друг от друга, поскольку достижение большей точности пока не предполагается.

Тот же вид комплексного предиктора можно взять при прогнозе не Q , а $P\%$ – вероятности ливня той или иной величины. Коэффициент a можно найти из простейшего уравнения регрессии или графически, в частности когда на одной оси графика Q' , а на другой Q'' , где:

$$\begin{aligned} Q' &= a' \cdot n'\sqrt{Q_{\text{метод}}} \cdot n''\sqrt{d'_{850}}, \\ Q'' &= a'' \cdot n'''\sqrt{L'} \cdot n'''\sqrt{v'}. \end{aligned} \quad (8)$$

Дополнительные критерии второй очереди

Хотя в выбранных для анализа методах вертикальная неустойчивость учитывается физически достаточно полно, тем не менее в выбранной модели (MOS) могут точнее прогнозироваться более простые ее показатели, а через них и осадки.

К ним относятся:

– вертикальная неустойчивость γ в слоях 850–700 и 850–500 гПа; чем $\gamma \geq 0$ больше, тем вертикальный градиент температуры T больше влажноадиабатического, особенно в слое 850–700 гПа, что важно для ливня:

$$\gamma = 2T_{850} - T_{700} - T_{500} - 33 = (T_{850} - T_{700}) + (T_{850} - T_{500}) - 33; \quad (9)$$

– вертикальная неустойчивость T'_{3-850} в слое земля – поверхность 850 гПа; чем значение T'_{3-850} больше 1, тем T'_{850} в термике выше T_{850} в окружающем воздухе, что важно для роста Сб и последующего ливня:

$$T'_{3-850} = 0,5 \cdot (T + T_d)_3 - T_{850} - 6; \quad (10)$$

– то же, что и (10), но в слое 925–850 гПа, где, как правило, начинается рост термика, Сб ночью и утром:

$$T'_{925} = 0,5 \cdot (T + T_d)_{925} - T_{850} - 3; \quad (11)$$

– то же, что и (10), но в слое 700–500 гПа; чем ближе дефициты точки росы d' в слое 700–500 гПа приближаются к оптимальным ($\sim 5-6^\circ$), тем больше T'_{700} соответствует сильному ливню:

$$T'_{700} = 5 - |T_{700} + T_{500} - 11|; \quad (12)$$

При $d \approx 3^\circ$ влажность близка к насыщающей надо льдом, облачность As препятствует солнечному прогреву у земли и термической конвекции, $d'_5 \approx 0^\circ$, ливень маловероятен. То же при $d \approx 8^\circ$, когда слишком велико испарение на границе Сб. Полезно проверить коэффициенты, $A = 5 \pm 1$ и $B = 11 \pm 2$, так как при больших упорядоченных восходящих движениях в сухом воздухе T_{500} понижается, $(T_{850} - T_{500})$ растет, реализуется потенциальная неустойчивость.

Предиктор, у поверхности Земли уменьшающий осадки испарением при $d_3 \gg 8^\circ$, а также при $d_3 \ll 8^\circ$, когда возможно появление низкой облачности St, также резко уменьшающей солнечный прогрев. Коэффициенты с точностью $\pm 1-2^\circ$ взяты из повседневной практики:

$$D' = 9 - |d_3 - 8|; \quad (13)$$

– у земли чем ближе температура к 25°C , тем больше предиктор T'_3 и вероятнее ливень, так как летом в России при сильном ливне T_3 обычно от 23 до 27°C , и сильный ливень бывает редко при $T_3 > 32^\circ\text{C}$ и $T_3 < 18^\circ\text{C}$, так как или под облаком испаряется слишком много влаги, или слишком холодно, когда не исключена скрытая устойчивость в слое 925–850 гПа:

$$T'_3 = 8 - |T_3 - 25|; \quad (14)$$

– чем выше температура точки росы у земли относительно 12°C , тем вероятнее ливень. Для ливня количеством 25–30 мм $T_d \geq 14^\circ\text{C}$, для ливня ≥ 50 мм $T_d \geq 15-16^\circ\text{C}$:

$$T'_d = T_d - 12. \quad (15)$$

Все предикторы берутся таким образом, чтобы они влияли на вероятность ливня однозначно: чем больше значения предиктора, тем больше вероятность ливня. Такая форма предикторов удобна и для поиска комплексов предикторов через их произведение или сумму с коэффициентами, определенными из дискриминантного анализа.

Из предикторов горизонтальной неустойчивости, возможно, наилучший – модельные вертикальные движения на поверхности 850 гПа, так

как в этом случае, в частности, учитываются и орографические движения. Но пока опыт показывает, что лапласиан приземного давления, отражающий циклоничность у поверхности Земли – предиктор не хуже, а может быть и лучше.

Добавочно к приведенным выше предикторам рекомендуется проверить следующие: лапласиан T и T_d при $\Delta x = \Delta y = 300$ км, характеризующие, как показывает мировой опыт, сильно влияющие на ливни языки тепла и влаги, в частности на фронтальных волнах и в молодых циклонах.

Важно, безусловно, контраст T на расстоянии по нормали к сгущению изотерм и фронту, превышающий 8°C .

Все взятые приземные характеристики горизонтальной неустойчивости, возможно, дополняют модельные вертикальные движения на поверхности 850 гПа, так как для конвекции часто важны не упорядоченные движения вверх, а импульс именно у земли.

Важно проверить также рост давления за холодным фронтом, активизирующий сильный ливень тем же импульсом у земли.

Результаты проведенного анализа позволяют несколько приблизиться к прогнозу со 100%-ной предупредительностью сильных осадков (дается прогноз, если значения предикторов внутри диапазонов), максимально возможной оправдываемостью (внутри диапазонов предикторов будут случаи без таких дождей, т. е. ложные тревоги) и 100%-ной оправдываемостью прогнозов их невозможности (дается прогноз без таких осадков в диапазоне значений предикторов, где таких осадков не бывает).

Дополнительный учет синоптической ситуации

80 % очень сильных ливней наблюдаются на малоподвижных фронтах [2]. Применительно ко всем ливням, включая и слабые, факт их связи с фронтами и объяснение этому факту были известны давно [9]. Малоподвижность фронта свойственна только очень сильным ливням (≥ 50 мм/12ч), так как при быстром движении в Сб может быть большая интенсивность (мм/мин, мм/ч) осадков, но общее их количество из-за малой продолжительности осадков над данным местом не успевает достичь обычно экстремально больших величин.

Как и при других экстремальных летних явлениях (ураганных шквалах, особо крупном граде), с холодным фронтом без волнового возмущения на нем связано 17 % очень сильных ливней, а с вершиной волны – 44 %. Очевидно на волне «бурное» вытеснение теплого воздуха идет наиболее интенсивно благодаря ускорению и сходимости ($\text{conv } V$) потоков в формирующемся небольшом (мезо) циклоне. Имеет место концентрация энергии у вершины волны (15×50 км) за счет ее ослабления в окрестностях, сходимость приземных ветров $\text{conv } V$ у вершины увеличивается с 10^{-5} до 10^{-4} c^{-1} .

Тем не менее 20 % очень сильных ливней выпадает на периферии циклона (7 %) и в малоградиентном поле давления на периферии антициклонов (13 %). В этих 20 % присутствует также эффект «бурного» кратковременного вытеснения теплого воздуха вверх за счет «старых», слабо выраженных приземных фронтов, небольших циклонов и ложбин, видимых только при проведении дополнительных изобар. Поднятый от земли теплый влажный воздух поднимается выше за счет вертикальной неустойчивости. Эффект «бурного» вытеснения у земли нужен вместо первоначального слабого термического перегрева (разнородного нагрева участков самой земли). Поднятый таким образом («вынужденно») полосою – линией воздух, за счет всегда имеющегося днем у самой земли сверхadiaбатического градиента T , оказывается теплее окружающего воздуха и поднимается выше термически (обычным путем плавучести при $\Delta T > 0$).

В [2] показано, что фронт играет меньшую роль уже на поверхности 850 гПа: в 77 % очень сильных ливней контрасты T от 0,5 до 2 °C/100км, т. е. почти любой из обычно встречающихся, кроме неустойчивости нужен лишь первоначальный подъем у самой земли или фронтом, или другой силой: сходимостью даже слабых ветров, рельефом. Вынужденный подъем возникает не только на наветренной стороне гор, крутых склонов речных долин, возвышенностей, но и у холмистой гряды с перепадом высот более 100–200 м (например, Клинско-Дмитровская гряда). В [2] показано, что лапласиан приземного давления, характеризующий сходимостью ($\text{con}V$) приземных ветров, при ливнях более 50 мм/12ч положителен (в среднем и в 80 % фронтальных случаев). Расчет лапласиана приземного давления желателен при $r = 150$ км, но обычно в силу исключения модельных ошибок $r = 300$ км.

На периферии циклонов и в размытом поле макромасштабный лапласиан ($r = 300$ км) слабо отрицателен, так как он не улавливает небольшие ложбины, циклоны, зоны сходимости ветров, старые фронты. Об этом же говорят и рассчитанные упорядоченные вертикальные движения на поверхности 850 гПа [2]. Они в среднем восходящие для 87 % очень сильных ливней.

Роль неустойчивости подтверждается: во всех 100 % очень сильных ливней рассчитанная максимальная скорость струи в S_b больше 20 м/с. Даже в малоградиентном поле давления она от 20,6 до 27 м/с, на периферии циклона от 24,6 до 41 м/с, на холодном фронте без волн – от 20,1 до 51,2 м/с, с волнами – от 20,4 до 51,4 м/с. Тот факт, что здесь практически не проявляется роль волн, на которых сильных ливней в 2,5 раза больше, чем на фронтах без волн, говорит о завышении расчетных скоростей на последних. Возможно, недоучтен первоначальный перегрев или вынужденный подъем.

В [2] показана и роль влажности. В среднем для очень сильных ливней T_d у земли составляет 15,5–17,3 °C (колеблется по ситуации), т. е.

значительно выше обычных летом ($9\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$), $(T - T_d)$ в слое $850\text{--}700$ гПа составляет $2,6\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. значительно меньше обычных ($5\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Большую помощь в уточнении прогноза могут оказать данные радиолокационных наблюдений, сеть которых в России модернизируется, ЕТР уже практически покрыта сетью ДМРЛ-С. Диагностированные локатором данные об опасных конвективных явлениях погоды помогают убеждаться в точности краткосрочных прогнозов, совершенствовать наукастинг таких явлений, с достаточной заблаговременностью дать штормовое предупреждение или вовремя передать штормовое оповещение. Кроме того, позволяют получить новые данные о причинах возникновения сильных осадков, а также в диагнозе проверить качество применяемых в прогнозе подходов и на основе полученных результатов совершенствовать методы прогноза.

Рассмотрим пример, показывающий пользу полученных результатов исследований. Проанализируем случай сильного дождя в Курске 10.06.2021 г. В этот же день сильные ливни отмечались в Воронеже и Самарской области (Красный Яр).

На рис. 1 приведены фрагменты синоптических карт от 10 июня 2021 г.: верхний ряд – карты приземного анализа от 06 и 12 ч ВСВ. Синоптическая ситуация определялась малоподвижным южным циклоном с центром над Центрально-Черноземным районом России с серией атмосферных фронтов. Как видно, в 06 ч ВСВ наблюдались отдельные ливни и грозы, а в 12 ч ВСВ они отмечаются повсеместно. На рис. 1в–е представлены карты барической топографии: АТ925, АТ850, АТ700 и АТ500 за 12 ч ВСВ. Циклон прослеживается до 500 гПа. В Самарской области выше 850 гПа – ложбина. На рис. 2 представлен прогноз сильных осадков по внедренному автоматизированному методу альтернативного прогноза осадков в трех градациях интенсивности [4] на дневное время 10.06.2021 г. Как видно, в Курской области прогнозировались осадки в градации 15–34 мм/12ч, в Воронежской области – как осадки в той же градации, так и осадки градации ОЯ. На рис. 3 представлено диагностированное по информации сети ДМРЛ-С ежечасное количество осадков за периоды с 12 до 13 ч и с 13 до 14 ч ВСВ; за два срока наблюдений (12.00 и 12.10 ч ВСВ) на рис. 4 – диагностированные максимальные конвективные скорости и интенсивность осадков и град на рис. 5.

Рассмотрим более подробно случай с сильными осадками в Курске, так как известно количество наблюдаемых осадков. Следует отметить, что прогноз в Курской области оправдался, прогнозируемые и наблюдаемые осадки относятся к одной градации осадков. Предлагаемые для уточнения прогноза физико-синоптические предикторы положительны, кроме T'_{925} , что указывает на сильные осадки. Так, $d'_{850}=1$; $d'_{700}=2$; $d'_{500}=1$; $L > 0$; $|v'|_8^5 = 5,5$; $\gamma = 3$; $T'_{3-850} = 2,7$; $T'_{925} = -1,5$; $T'_{700} = 4$; $D' = 8$; $T'_3 = 6,2$; $T'_d = 2,2$.

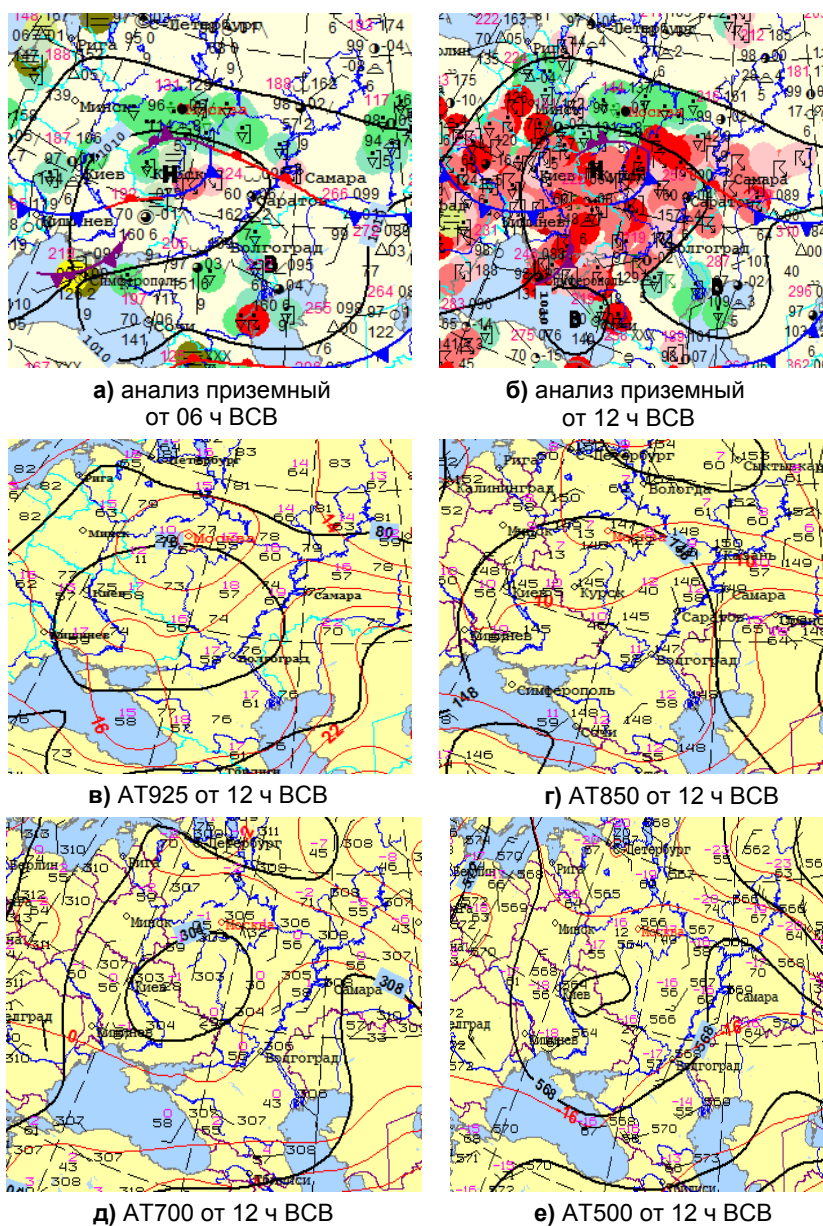


Рис. 1. Фрагменты карт приземного анализа от 06 и 12 ч ВСВ (а, б), барической топографии АТ925 (в), АТ850 (г), АТ700 (д) и АТ500 (е) от 10.06.2021 г. [meteoinfo.ru].

Fig. 1. The fragments of surface analysis charts for 06.00 and 12.00 UTC (a, b) and the charts for the levels of 925 (c), 850 (d), 700 (d), and 500 hPa (e) on June 10, 2021 (<https://meteoinfo.ru>).

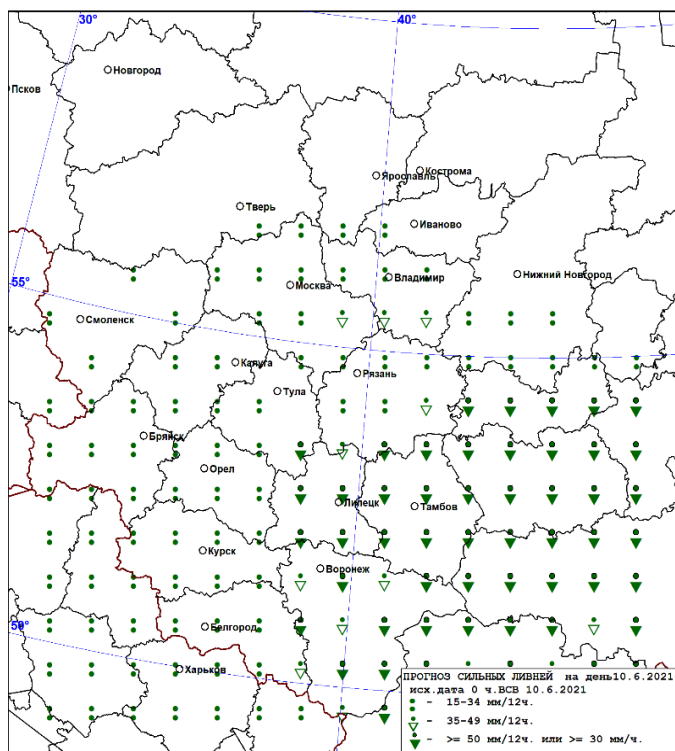
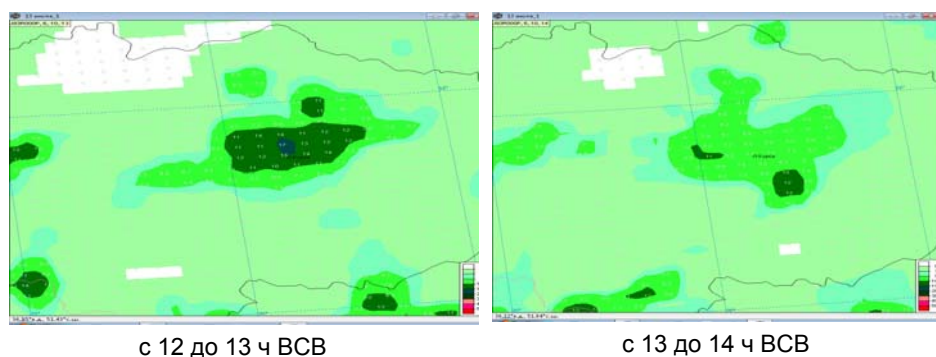


Рис. 2. Прогноз сильных ливней [4] на день 10.06.2021 г. от исходного срока 00 ч ВСВ с заблаговременностью 18 ч.

Fig. 2. The forecast of heavy rainfall [4] for June 10, 2021 from the 00.00 UTC run with a lead time of 18 hours.

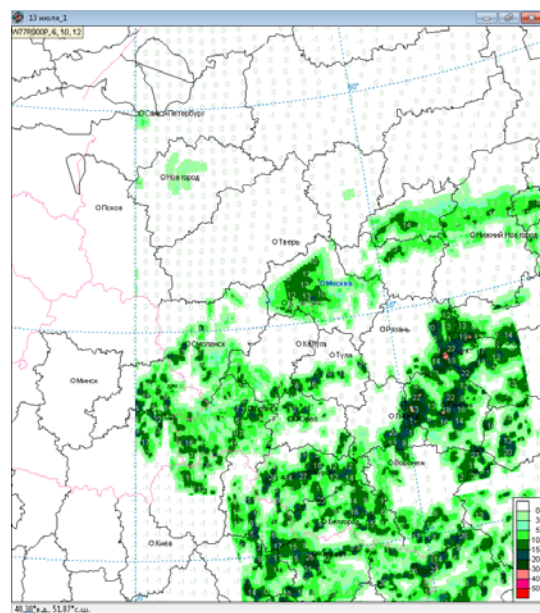


с 12 до 13 ч ВСВ

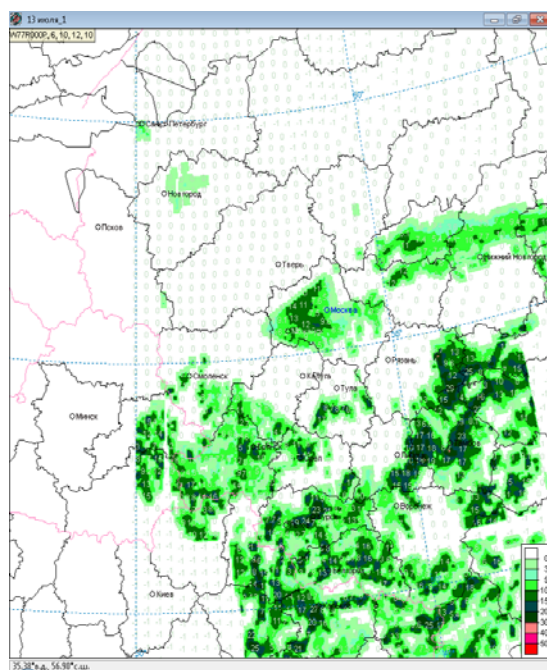
с 13 до 14 ч ВСВ

Рис. 3. Диагностированное по информации сети ДМРЛ-С ежечасное количество осадков, мм/ч, за период с 12 до 13 ч и с 13 до 14 ч ВСВ.

Fig. 3. Hourly precipitation (mm/h) diagnosed according to the information of the DMRL-C network for the period from 12.00 to 13.00 UTC and from 13.00 to 14.00 UTC.



12.00 ч ВСВ



12.10 ч ВСВ

Рис. 4. Диагностированные по информации сети ДМРЛ-С максимальные конвективные скорости (м/с) за сроки 12.00 и 12.10 ч ВСВ.

Fig. 4. The maximum convective velocities (m/s) diagnosed according to the information of the DMRL-C network for 12.00 and 12.10 UTC.

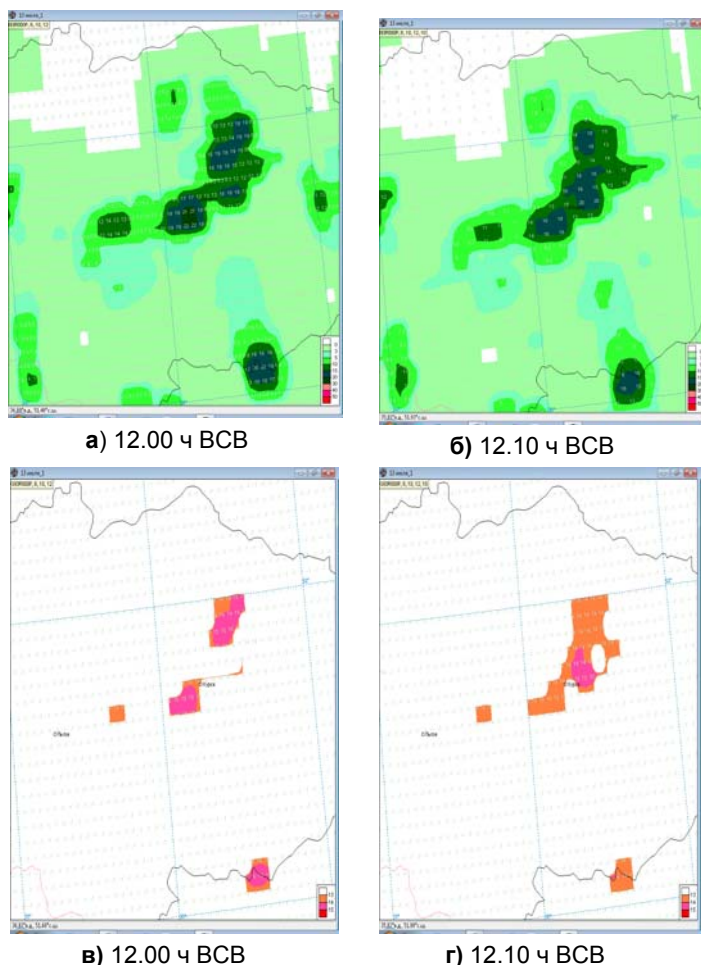


Рис. 5. Диагностированные по информации сети ДМРЛ-С интенсивность осадков, мм/ч (а, б) и град (цифры кода: 13, 14 и 15, соответственно, диаметром менее 1 см, от 1 до 2 см и более 2 см) (в, г) за сроки 12.00 и 12.10 ч ВСВ.

Fig. 5. The precipitation intensity (mm/hour) (а, б) and hail (code numbers 13, 14, and 15, respectively, with a diameter <1 cm, 1–2 cm, and >2 cm) (в, г) diagnosed according to the information of the DMRL-C network for 12.00 and 12.10 UTC.

Диагностированные по данным ДМРЛ-С [6] максимальные конвективные скорости составляют 24–27 м/с; интенсивность осадков 13 и 15 мм/ч, а вблизи города 20–21 мм/ч; град диаметром 1–2 см в сроки 12.00 и 12.10 ч ВСВ; количество осадков 15 и 7,5 мм за период от 12 до 13 ч ВСВ и от 13 до 14 ч ВСВ соответственно. Таким образом, радиолокационные данные также наглядно подтверждают правильность прогнозирования осадков градации 15–35 мм/12ч, т. е. в данном случае прогноз достаточно точен.

Перечислим в завершении главные условия образования сильных ливней:

- вертикальная неустойчивость тропосферы, для оценки которой используется в дополнительных предикторах прежде и чаще всего температура воздуха у земли и на поверхностях 850, 700 и 500 гПа, а также температура точки росы у земли и различные показатели неустойчивости;

- синоптические условия: атмосферные фронты, волны и циклоны на них, упорядоченные вертикальные движения, лапласиан приземного давления.

Влияние синоптической ситуации на ливни изучено давно, влияние на очень сильные ливни показано в [2] и проанализировано в статье. Видно, что влияние ее значимо, как и вертикальной неустойчивости, но оба этих фундаментальных комплексных фактора изучены по отдельности и не учитываются в рамках единого механизма развития Сб.

В ряде работ многие факторы, благоприятные для возникновения сильных ливней, учтены с помощью статистики. На фактических данных показано, что, действительно, одни факторы дополняют другие: с ростом неустойчивости растет вероятность ливней, но при одной и той же неустойчивости дополнительно увеличивают вероятность ливней другие факторы, такие как фронты, упорядоченные восходящие движения. Одна вертикальная неустойчивость сама по себе не приводит к ливням, особенно сильным, в некоторых синоптических ситуациях. Также и фронт сам по себе без вертикальной неустойчивости не дает ливней. Тем не менее эти две группы факторов часто по-прежнему рассматриваются по отдельности. Считается, что на фронте неустойчивость или не важна, или всегда сопутствует ему. С другой стороны, неустойчивость, оцененная по большой группе факторов или не нуждается в дополнительном учете фронта, или все вобрала в себя, что есть на фронте. Есть два мнения: фронт как сильный динамический фактор рождает Сб при любой стратификации и неустойчивость все учитывает сама по себе.

В используемых методах [3, 4] фронт и волны не учитываются. Причины этого – трудности автоматизированного их учета, а также частичный их учет через упорядоченные вертикальные движения. Кроме того, считается, что при расчете неустойчивости косвенно учтены все сопутствующие фронту факторы: повышенные вертикальные градиенты T и влажность у земли и в тропосфере.

Выводы

В представленном исследовании выявлены физико-синоптические предикторы и обоснованы их оптимальные значения для формирования сильных ливневых осадков. Рекомендованы пределы их изменения при уточнении прогнозов сильных и очень сильных осадков в зависимости от применения прогностических данных различных гидродинамических моделей.

Показано, что использование радиолокационных данных позволяет рассчитывать важный параметр конвекции – максимальную конвективную скорость, а также диагностировать интенсивность ливневых осадков, града, почасовое количество осадков, что обеспечивает уточнение их прогноза.

Диагностирование по данным сети ДМРЛ-С максимальной конвективной скорости позволяет определять параметр конвекции с разрешением по площади около 4 км и интервалом 10 минут. Аналогично на практике можно уточнять прогнозы сильных осадков, прогнозируемых любым другим подходом, что практически значимо, так как упомянутые методы рекомендованы со статусом дополнительных или консультативных для синоптиков. Дополнительно с подходами уточнения прогнозов сильных осадков можно ознакомиться в [7, 8].

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.5.

Список литературы

1. *Алексеева А.А.* Условия формирования и краткосрочный прогноз сильных ливней и града на ЕТ СНГ: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 1993. 187 с.
2. *Алексеева А.А.* Исследование условий формирования экстремальных осадков на Европейской территории бывшего СССР // Труды Гидрометцентра России. 1996. Вып. 328. С. 115-124.
3. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 34. 2006. С. 49-69.
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. Информационный сборник № 39. 2012. С. 43-53.
5. *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.
6. *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.
7. *Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е.* Усовершенствование метода прогноза летних осадков // Метеорология и гидрология. 2008. № 10. С. 52-61.
8. *Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г.* Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней // Метеорология и гидрология. 2010. № 9. С. 5-16.
9. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 703 с.

References

1. Alekseeva A.A. Usloviya formirovaniya i kratkosrochnyy prognoz sil'nyh livney i grada na ET SNG. *Dis. ... kand. geogr. nauk*. Moscow, 1993, 187 p. [in Russ.].
2. Alekseeva A.A. Issledovanie uslovii formirovaniya ekstremal'nyh osadkov na Evropeiskoi territorii byvshego SSSR. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 1996, vol. 328, pp. 115-124 [in Russ.].
3. 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 novyh i usovershenstvovannyh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2006, vol. 34, pp. 49-69 [in Russ.].
4. Alekseeva A.A., Losev V.M., Bagrov A.N. Rezul'taty ispytaniya avtomatizirovannogo metoda prognoza osadkov s detalizaciei intensivnosti v trekh gradaciyah (ot 11 do 34, ot 35 do 49, 50 mm/12 ch i bolee) na osnove vyhodnyh dannyh regional'noi modeli s zablagovremennost'yu 12 i 24 ch. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyi sbornik*, 2012, vol. 39, pp. 49-60 [in Russ.].
5. Alekseeva A.A., Losev V.M., Peskov B.E., Vasil'ev E.V., Nikiforova A.E. Prognoz razvitiya zon aktivnoi konvekcii s osobo opasnymi yavleniyami na osnove regional'noi modeli Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 147-159 [in Russ.].
6. 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.].
7. Peskov B.E., Alekseeva A.A., Nikiforova A.E. Enhancement of the method of summer precipitation forecasting. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 10, pp. 644–650. DOI:10.3103/S1068373908100051.
8. Peskov B.E., Dmitrieva T.G. Specifying the mesoscale numerical forecast of heavy showers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 9, pp. 581–589. DOI: 10.3103/S1068373910090013.
9. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Chast' 1*. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

*Поступила 28.06.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 28.06.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-44-52>

УДК 551.513

Особенности формирования и эволюции полярного циклона в Баренцевом и Карском морях в декабре 2020 года

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

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

На основе информации глобальной системы усвоения данных GDAS исследуются условия формирования и эволюции полярного циклона в Баренцевом море в декабре 2020 г. Этот циклон интересен тем, что после выхода в Карское море он не ослабел как обычно, а, наоборот, интенсифицировался. Формирование циклона произошло вблизи ледовой кромки в условиях выноса холодного арктического воздуха. После выхода в Карское море циклон продолжал углубляться, чему способствовали потоки скрытого и явного тепла в свободной ото льда западной части моря. При дальнейшем перемещении циклона над сушей направление ветра, по данным гидрометеорологических станций, менялось с преимущественно южного на северное и существенно увеличивалась скорость ветра. Также отмечалось резкое понижение температуры воздуха на 7–10 °С в течение трех часов.

Ключевые слова: полярный циклон, глобальная система усвоения данных, скорость ветра, потоки скрытого и явного тепла

Features of formation and evolution of a polar cyclone in the Barents and Kara seas in December 2020

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

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

Based on the GDAS (Global Data Assimilation System) information, the conditions for the formation and evolution of a polar cyclone in the Barents Sea in December 2020 are studied. The cyclone is interesting because after entering the Kara Sea, the cyclone did not weaken as usual but continued to intensify. The formation of the cyclone occurred near the ice edge under conditions of the cold Arctic air outbreak. After entering the Kara Sea, the cyclone continued to deepen, which was facilitated by latent and sensible heat fluxes in the ice-free western part of the sea. According to weather station data, when the cyclone moved further over land, the wind direction changed from mainly southern to northern, and wind speed increased significantly. There also was a sharp decrease in air temperature by 7–10 °C for three hours.

Keywords: polar cyclone, global data assimilation system, wind speed, latent and sensible heat fluxes

Введение

Изучению полярных циклонов уделяется большое внимание, так как несмотря на относительно небольшие пространственные (сотни километров) и временные (от нескольких часов до нескольких дней) масштабы они могут создавать опасные условия, влияющие на прибрежную и морскую деятельность, такую как рыболовство, транспорт, добыча углеводородов и т. д. Для полярных циклонов характерны сильные порывы ветра, снегопад, обледенение судов и сооружений, ухудшение видимости, высокие волны и др. [2–4, 8].

Во многих работах показано, что наиболее часто полярные циклоны возникают в области кромки льда с большими градиентами различных гидрометеорологических характеристик. Другим важным условием их формирования являются выносы холодного арктического воздуха на относительно теплую поверхность моря [6]. Развитию полярных циклонов способствуют потоки скрытого и явного тепла на поверхности моря.

Наиболее часто характеристики полярных циклонов исследуются на основе реанализов. Однако из-за малых размеров и короткого времени жизни их воспроизведение в реанализах бывает неудовлетворительным [7]. В данной статье формирование и эволюция полярного циклона изучается на основе информации глобальной системы усвоения данных GDAS (Global Data Assimilation System), разработанной в Национальном центре по прогнозированию окружающей среды США (NCEP) [5]. GDAS имеет пространственное разрешение $0,25^\circ$ и дискретность по времени 6 часов, содержит информацию о более 100 параметрах, в том числе о температуре воздуха, скорости ветра, потоках явного и скрытого тепла, сплоченности льда и др.

Формирование и эволюция полярного циклона в Баренцевом море 15–17 декабря 2020 года

Полярный циклон в северо-восточной части Баренцева моря сформировался 15.12.2020 г. в области арктического фронта и был хорошо выражен в поле облачности (рис. 1).

Замкнутая область в поле приземного давления впервые была отмечена в этот день в 18 ч (рис. 2). Вертикальное развитие циклона происходило достаточно быстро, поскольку замкнутая область в полях геопотенциала H850 и H500 гПа появилась в 00 ч 16.12.2020 г. Анализ ледовой обстановки показал, что циклон сформировался вблизи от кромки льда, расположенной к северу от Новой Земли.

Формированию циклона предшествовало перемещение барической ложбины с северо-запада на восток Баренцева моря, при этом в ее передней части наблюдалось интенсивное падение атмосферного давления, достигающее 2–3 гПа за 3 часа. В тыловой части барической ложбины была хорошо выражена область пониженной температуры воздуха.

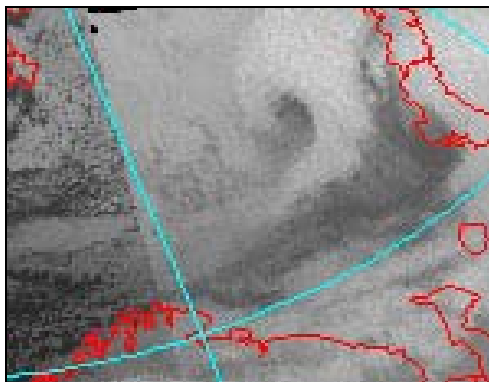


Рис. 1. Облачная система полярного циклона 15.12.2020 г.
Fig. 1. Cloud system of polar cyclone 15.12.2020.

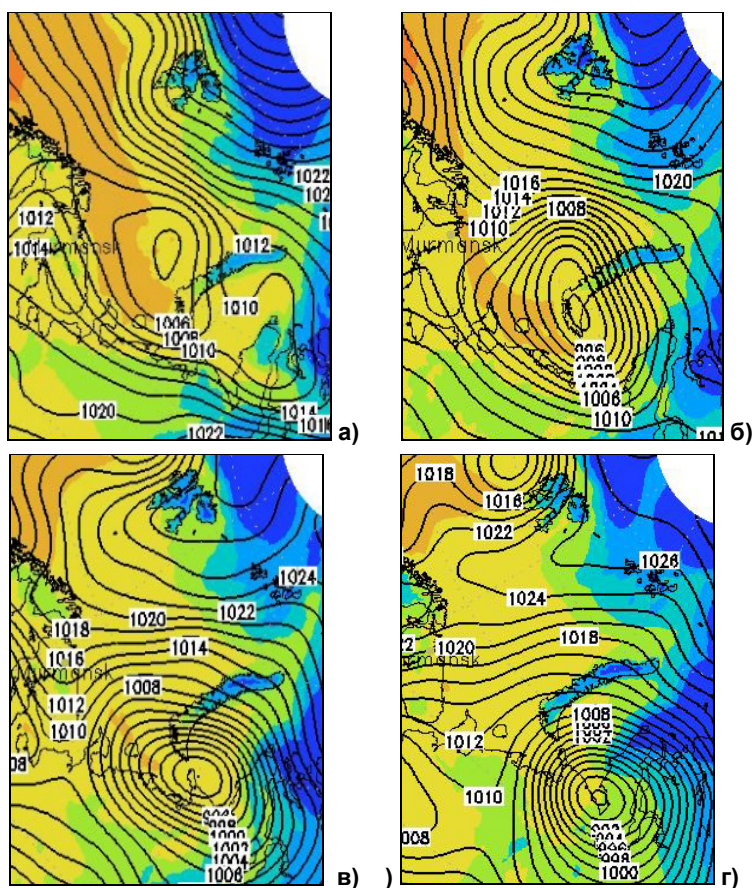


Рис. 2. Приземное давление (гПа): 12 ч 15.12.2020 г. (а);
 00 ч 16.12.2020 г. (б); 12 ч 16.12.2020 г. (в); 00 ч 17.12.2020 г. (г).
Fig. 2. Sea level pressure (hPa) 15.12.2020 12 h (a); G. 16.12.2020
 00 h (б); 16.12.2020 12h (в); 17.12.2020 00 h (г).

Информация GDAS также показывает, что формированию циклона предшествовал вынос холодного воздуха с севера. В период с 10 по 15 декабря направление ветра в рассматриваемом районе изменилось с преимущественно южного на северное, а температура воздуха понизилась с $-5-10^{\circ}\text{C}$ до $-10-20^{\circ}\text{C}$. Циклон перемещался в юго-восточном направлении, пересек Новую Землю, и его центр в 06 ч 17 декабря уже находился над южным побережьем Карского моря (рис. 2). Максимальная скорость ветра в области циклона составляла в основном 15–20 м/с, увеличиваясь иногда до 20–25 м/с (рис. 3).

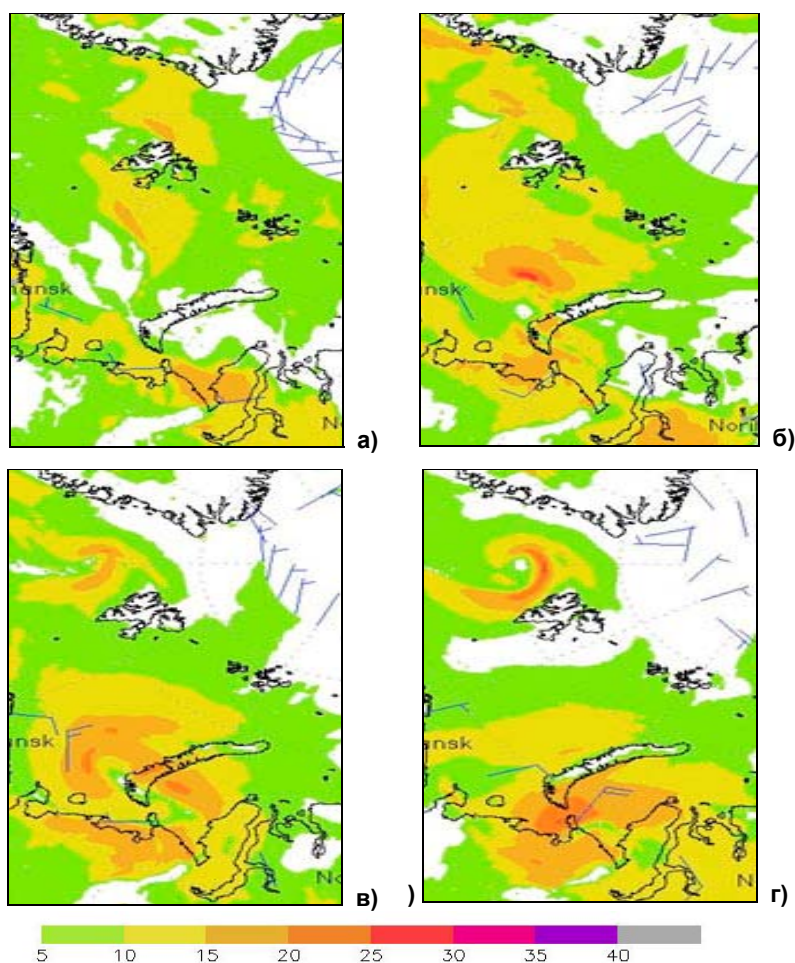


Рис. 3. Скорость приземного ветра (м/с): 12 ч 15.12.2020 г. (а); 00 ч 16.12.2020 г. (б); 12 ч 16.12.2020 г. (в); 00 ч 17.12.2020 г. (г).

Fig. 3. Wind speed (m/s): 15.12.2020 12 h (a); 16.12.2020 00 h (б); 16.12.2020 12h (в); 17.12.2020 00 h (г).

Распределение потоков скрытого и явного тепла отражает их роль в эволюции циклона. Если в южной части Баренцева моря 15 декабря потоки скрытого и явного тепла составляли $20\text{--}50\text{ Вт/м}^2$, то в северной части в районе формирования циклона они доходили до 150 Вт/м^2 (рис. 4а), т. е. способствовали интенсификации циклона. В Карском море потоки были незначительны ($20\text{--}50\text{ Вт/м}^2$). Ситуация изменилась после выхода циклона в Карское море 16 декабря, где произошло их резкое увеличение до $150\text{--}200\text{ Вт/м}^2$ (рис. 4, 5).

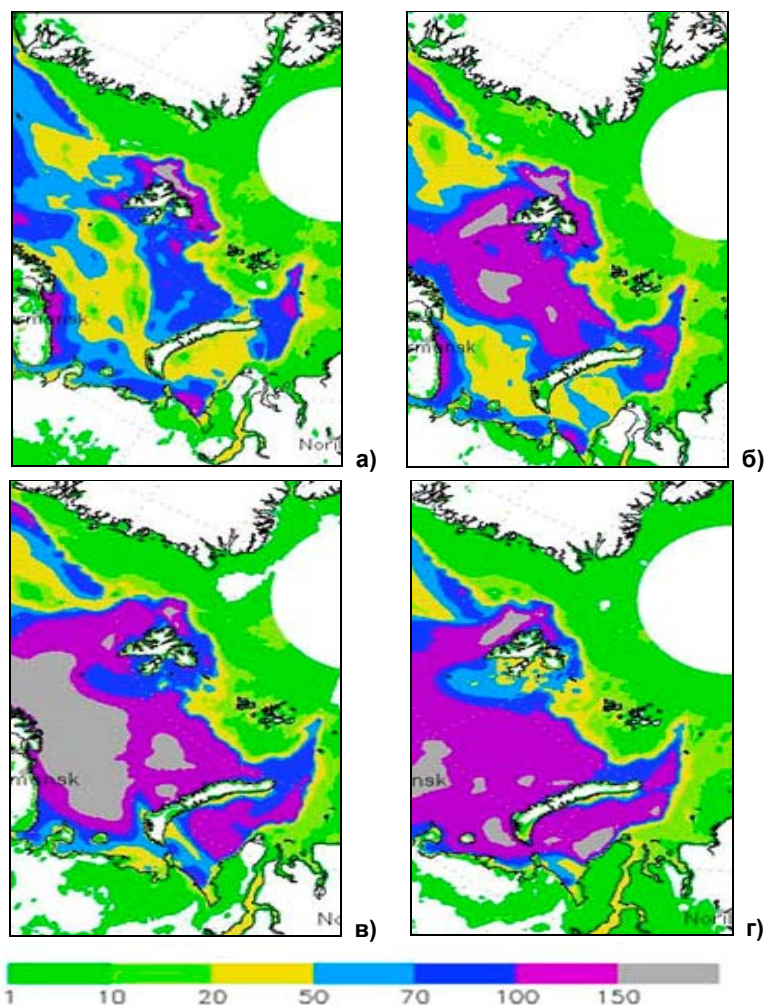


Рис. 4. Поток скрытого тепла (Вт/м^2): 12 ч 15.12.2020 г. (а); 00 ч 16.12.2020 г. (б); 12 ч 16.12.2020 г. (в); 00 ч 17.12.2020 г. (г).

Fig. 4. Latent heat flux (W/m^2): 15.12.2020 12 h (а); 16.12.2020 00 h (б); 16.12.2020 12h (в); 17.12.2020 00 h (г).

После выхода в Карское море циклон продолжал углубляться, хотя есть примеры значительного ослабления и затухания полярных циклонов в этом случае [2]. Если до выхода в Карское море давление в центре циклона составляло 1004 гПа, то при выходе на южное побережье моря оно понизилось до 990 гПа (рис. 2). Основная причина этого явления, по-видимому, состояла в том, что значительная часть Карского моря в этот период была свободна ото льда (рис. 6), что способствовало существенным потокам тепла из моря в атмосферу, которые поддерживали развитие циклона.

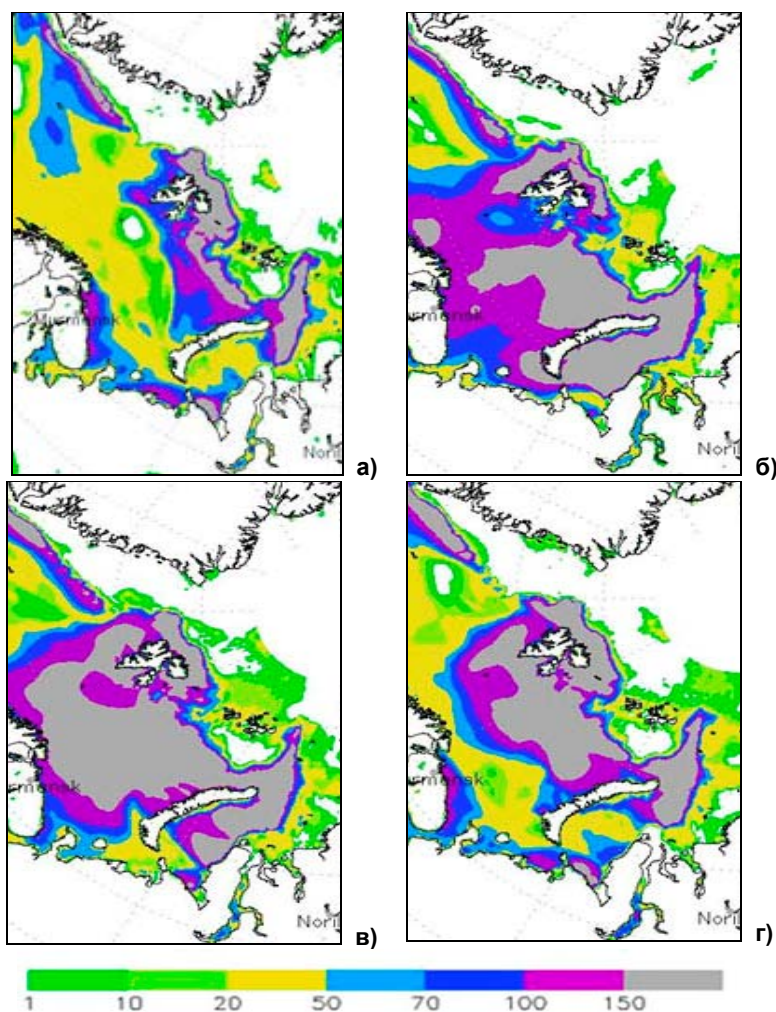


Рис. 5. Поток явного тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$): 12 ч 15.12.2020 г. (а); 00 ч 16.12.2020 г. (б); 12 ч 16.12.2020 г. (в); 00 ч 17.12.2020 г. (г).

Fig. 5. Sensible heat flux (W/m^2): 15.12.2020 12 h (a); 16.12.2020 00 h (б); 16.12.2020 12h (в); 17.12.2020 00 h (г).

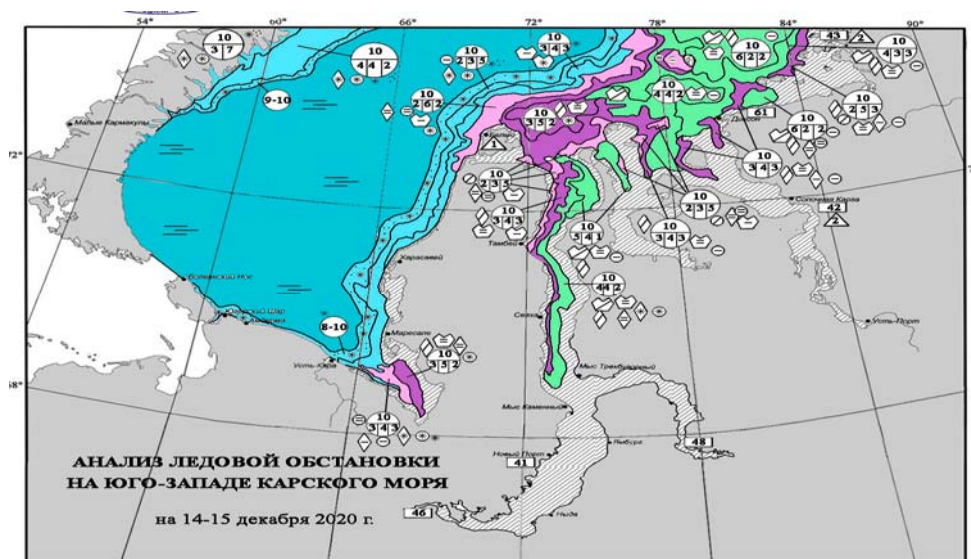


Рис. 6. Анализ ледовой обстановки на юго-западе Карского моря 14–15.12.2020 г.

Fig. 6. Analysis of the ice distribution in the south-west of the Kara Sea 14–15.12.2020.

Ледяной покров в юго-западной части моря зимой 2020/2021 гг. появился позднее обычного. Так, по наблюдениям в Амдерме за период 1934–2012 гг. средняя дата устойчивого появления льда – 6 ноября, а поздняя дата – 6 декабря [1]. Одной из причин позднего замерзания, по-видимому, явилась положительная аномалия температуры воды, сформировавшаяся в этом районе в летний период и сохранившаяся до декабря [https://climaterereanalyzer.org/reanalysis/daily_maps/?dm_id=world-ced2&wm_id=sstanom]. Эти условия способствовали интенсификации циклона над Карским морем.

В зоне прохождения полярного циклона в Карском море 17–18.12.2020 г. по данным судовых наблюдений скорость ветра достигала 23 м/с, высота волн 3 м. Интересно проследить, как менялись метеорологические характеристики при выходе циклона на сушу. В таблице представлены характеристики поля ветра по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях при прохождении циклона. Циклон смещался с севера на юг, и станции в таблице расположены именно в такой последовательности. Прохождение циклона над районом станции характеризовалось сменой направления ветра с южной четверти на северную. Из таблицы видно, что перемещение циклона от северной станции (Мыс Болванский) до южной (Марресале) (примерно 400 км) заняло около 12 ч. После смены направления ветра происходило увеличение скорости ветра, в том числе в порывах.

Прохождение циклона характеризовалось также понижением температуры воздуха. Наиболее значительное похолодание отмечалось 17 декабря на станциях Усть-Кара (на 7,1 °С в течение 3 часов) и Марресале (на 10 °С в течение 3 часов).

Таблица. Характеристики поля ветра при прохождении полярного циклона
Table. Characteristics of the wind field during the passage of a polar cyclone

Станция	Дата изменения направления ветра	Скорость ветра до смены направления ветра	Скорость ветра после смены направления ветра
Мыс Болванский	17.12 (00 ч)	7–12 м/с, порывы до 19 м/с	14–21 м/с, порывы до 29 м/с
Амдерма	17.12 (03 ч)	3–16 м/с, порывы до 22 м/с	12–13 м/с, порывы до 27 м/с
Усть-Кара	17.12 (09 ч)	5–9 м/с, порывы до 16 м/с	12–13 м/с, порывы до 19 м/с
Марресале	17.12 (12 ч)	2–14 м/с, порывы до 19 м/с	16–17 м/с, порывы до 22 м/с

Заключение

На основе информации глобальной системы усвоения данных GDAS выполнен анализ формирования и эволюции полярного циклона в Баренцевом море в декабре 2020 года. Формирование циклона произошло в области арктического фронта вблизи ледовой кромки в условиях выноса холодного воздуха. Интенсификации циклона способствовали потоки скрытого и явного тепла из моря в атмосферу. После выхода в Карское море циклон продолжал углубляться, чему способствовали потоки скрытого и явного тепла в свободной ото льда юго-западной части моря.

Прохождение циклона над сушей нашло отражение в информации гидрометеорологических станций. По мере его продвижения на юг направление ветра менялось с преимущественно южного на северное и существенно увеличивалась скорость ветра, в том числе в порывах. Также отмечалось резкое понижение температуры воздуха на 7–10 °С в течение 3 часов.

Список литературы

1. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
2. Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 76-89.
3. Нестеров Е.С. Полярные циклоны: наблюдения, реанализ, моделирование // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 65-82.

4. Смирнова Ю.Е., Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Шапрон Б. Статистические характеристики полярных циклонов в морях Северо-Европейского бассейна по данным спутниковых микроволновых радиометров // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 27-36.

5. Kleist D., Parish D., Derber J., Treadon L. et al. Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System // Weather and Forecasting. 2009. Vol. 24, no. 6. P. 1691-1705.

6. Kolstad E.W. Higher ocean wind speeds during marine cold air outbreaks // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2017. Vol. 143, no. 706. P. 2084-2092.

7. Laffineur T., Claud C., Chaboureaud J.-P., Noer G. Polar lows over the Nordic seas: improved representation in ERA-Interim compared to ERA-40 and the impact on downscaled simulations // Mon. Weath. Rev. 2014. Vol. 142. P. 2271-2289.

8. Rojo M., Claud C., Noer G., Carleton A.M. In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2019. Vol. 124. P. 700-718.

References

1. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morey evropeyskoy chasti Rossii. Moscow, IG-SOCIN, 2014, 608 p. [in Russ.].

2. Lutsenko E.I., Lagun V.E. Polar meso-scale cyclones in the atmosphere over Barents and Kara seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2013, vol. 96, no. 2, pp. 76-89 [in Russ.].

3. Nesterov E.S. Polar cyclones: observations, reanalysis, modeling. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 65-82 [in Russ.].

4. Smirnova J.E., Zabolotskikh E.V., Bobylev L.P., Chapron B. Statistical Characteristics of Polar Lows in the Nordic Seas Using Satellite Passive Microwave Data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2016, no. 3, pp. 27-36 [in Russ.].

5. Kleist D., Parish D., Derber J., Treadon L. et al. Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System. *Weather and Forecasting*, 2009, vol. 24, no. 6, pp. 1691-1705.

6. Kolstad E.W. Higher ocean wind speeds during marine cold air outbreaks. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 2017, vol. 143, no. 706, pp. 2084-2092.

7. Laffineur T., Claud C., Chaboureaud J.-P., Noer G. Polar lows over the Nordic seas: improved representation in ERA-Interim compared to ERA-40 and the impact on downscaled simulations. *Mon. Weath. Rev.*, 2014, vol. 142, pp. 2271-2289.

8. Rojo M., Claud C., Noer G., Carleton A.M. In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 2019, vol. 124, pp. 700-718.

Поступила 10.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 10.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-53-63>

УДК 551.589

Метеорологические условия формирования экстремального понижения уровня в северо-восточной части Каспийского моря в апреле 2019 года

М.Д. Стамбеков

*Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан
stambekovmuhtar@gmail.com*

Рассмотрены и проанализированы циркуляционные процессы в атмосфере, приведшие в апреле 2019 года к экстремальному понижению уровня в районе шельфового нефтяного месторождения Кашаган, расположенного в северо-восточной части Каспийского моря. Установлено, что увеличение градиентов давления и ветра в районе Северного Каспия привело к возникновению комплекса связанных друг с другом опасных явлений погоды. В районе месторождения Кашаган было зафиксировано экстремальное понижение уровня, вызванное сгоном воды сильным ветром. За холодным фронтом произошла адвекция холода, вызвав резкое падение температуры воздуха на 13 °С. На фоне большого контраста температур и высокой относительной влажности выпало аномальное количество осадков в количестве 33 мм за двое суток.

Ключевые слова: уровень воды, опасные явления погоды, сгон воды, северо-восточная часть Каспийского моря.

Meteorological conditions of extreme low water level in the northeastern part of the Caspian Sea in April 2019

M.D. Stambekov

*Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
stambekovmuhtar@gmail.com*

Atmospheric circulation processes that caused an extreme sea level drop in the area of the Kashagan offshore oil field in the northeastern part of the Caspian Sea in April 2019 are reviewed and analyzed. It is found that an increase in pressure and wind gradients over the Northern Caspian region led to the occurrence of the set of severe weather events related to each other. An extreme sea level drop caused by the downsurge driven by strong wind was recorded in the area of the Kashagan oil field. Behind the cold front, the cold advection occurred, causing a dramatic air temperature drop by 13 °C. A high temperature contrast and high relative humidity led to the abnormal amount of precipitation of 33 mm per two days.

Keywords: water level, severe weather events, downsurge, northeastern part of the Caspian Sea

Введение

Каспийское море – специфический водоем, не имеющий аналогов в мире по биологическому разнообразию флоры и фауны. Социально-экономическое, производственное и хозяйственное развитие в прибрежной полосе моря связано с колебаниями его уровня. Изменение уровня моря непосредственно сказывается на рациональном использовании природного потенциала, в частности земельных, рыбных, рекреационных и ресурсов нефти и газа. В связи с этим, исследование причин межсезонных и межгодовых колебаний уровня Каспийского моря является актуальной проблемой [12].

Долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря напрямую связан с разработкой прогноза климата, что до сих пор остается одной из сложнейших проблем [7, 16].

Каспийское море находится в зоне влияния различных типов циркуляции атмосферы: влажных воздушных масс, формирующихся над Северной Атлантикой, сухих континентальных воздушных масс, формирующихся над восточными районами России и Казахстана, теплых субтропических масс воздуха, приходящих со Средиземного моря и Малой Азии, а также воздушных масс, непосредственно формирующихся над Каспийским морем. Все эти типы циркуляции непрерывно меняются и, взаимодействуя друг с другом, создают стохастический (вероятностный) характер изменчивости погоды. Влияние циркуляции атмосферы оказывается на всех процессах, которые определяют колебания уровня Каспийского моря (сток рек, испарение, осадки и др.).

Особенности возникновения и развития сгонно-нагонных колебаний уровня моря (штормовых нагонов и сгонов) на Каспии исследовались многими авторами [1, 8, 14]. Главными характеристиками штормовых сгонов и нагонов являются даты начала и окончания явления, высота подъема и спада уровня воды, масштаб распространения. Штормовой сгон или нагон часто определяется как разность между наблюдаемым уровнем и уровнем, который мог бы быть в отсутствии шторма. При штормовом нагоне эта разность положительна, при сгоне – отрицательна.

Штормовой нагон генерируется частично в результате изменения атмосферного давления и непосредственного воздействия ветра. Физический механизм формирования сгонно-нагонных колебаний уровня определяется воздействием нормальных и тангенциальных сил ветра и атмосферного давления на водную поверхность моря, в результате чего осуществляется перераспределение водных масс внутри водоема.

Аномальные колебания уровня Каспийского моря прежде всего влияют на гидрологические, морфометрические и гидрохимические характеристики мелководной северо-восточной части, примыкающей к берегам Казахстана, где даже небольшие колебания уровня приводят к затоплению или осушению обширных территорий [15]. Ввиду малых уклонов дна северо-восточной части Каспийского моря и прилегающей

суши, при небольших колебаниях уровня моря происходит значительное изменение береговой линии [11].

К примеру, при сгоне ширина зон осушения в некоторых районах может достигать 10–12 км, а зон затопления при нагонных явлениях – 30–35 км, нанося огромный ущерб экосистемам, хозяйственным объектам и инфраструктуре. Особенно четко колебания уровня моря проявляются на низменных участках, они трансформируют береговые линии и влияют на экзогенные процессы. При повышении уровня моря формируются новые береговые и подводные аккумулятивные формы, размываются крутые берега и ранее образованные береговые формы. При понижении уровня моря наблюдаются обратные процессы, которые сопровождаются образованием и дальнейшим распространением пляжей у берегов и островов за счет донных отвалов [13].

Большую часть побережья северо-восточного Каспия занимают морские, реже аллювиально-морские равнины, плоские или слабо расчлененные сорами (разновидностью солончаков, характерных для Центральной Азии), лиманами и временными водотоками, с относительными превышениями в среднем 1–3 м и незначительными уклонами. Значительное влияние колебания уровня моря оказывают на пустынные ландшафты низменных (относительно опущенных) равнин [9], так как ландшафты относительно приподнятых равнин (слабоволнистых, высотой до 20 м) расположены в условиях относительно глубокого залегания грунтовых вод (более 15 м) и не подвергаются периодическому влиянию стонно-нагонных процессов.

С начала проведения инструментальных наблюдений уровень Каспийского моря колебался в среднем около отметки -25,8 м. В прошлом столетии уровень Каспийского моря почти до конца 70-х годов в основном понижался. Общее непрерывное понижение уровня, которое наблюдалось в 1930–1977 гг., составило 3,2 м со средней интенсивностью падения около 4 см в год.

В 1977 г. уровень моря достиг самой минимальной отметки за период наблюдений – -29,01 м. Понижение уровня вызвало существенные трудности в работе портов Каспийского побережья и значительно ухудшило условия судоходства, особенно в Северном Каспии. Возникло переформирование берегов и опустынивание части территории, что в свою очередь вызвало снижение уровня грунтовых вод. Увеличилась соленость вод Северного Каспия, которая повлияла на состояние кормовой базы полупроходных и осетровых рыб, что впоследствии привело к снижению биомассы большинства донных организмов. К основным факторам, обуславливающим это понижение, относят изменения климата и антропогенная деятельность человека в бассейне реки Волги [3–7].

В 1978 г. началось интенсивное повышение уровня Каспийского моря, которое продолжалось в течение 18 лет. За это время уровень моря увеличился на 2,5 м и к 1995 г. достиг отметки -26,62 м. Средняя

интенсивность подъема уровня за этот период составила около 14 см в год, а в отдельные годы до 36 см. Подъем уровня привел к еще большим негативным последствиям, так как и хозяйство, и население прибрежных районов уже приспособились к низкому уровню. В результате подъема фонового уровня воды и затопления большой территории побережья изменились гидрологические условия и в прибрежной зоне казахстанской части Северного Каспия. Подверглась значительному затоплению территория от села Курмангазы до поселка Жанбай.

Начиная с 2006 г. уровень Каспийского моря имеет тенденцию к снижению. В 2018 г. среднегодовой уровень моря достиг отметки -28,01 м, а в некоторые месяцы его отметки были ниже среднегодового на 20 см.

Анализ каталога сгонно-нагонных явлений [2], разработанного в управлении гидрометеорологических исследований Каспийского моря РГП «Казгидромет», позволил сделать вывод о том, что за последние 10 лет количество нагонов в северо-восточной части Каспийского моря значительно уменьшилось, а сгонов – увеличилось. Количество экстремальных сгонно-нагонных явлений увеличилось в весенний период.

Необходимо отметить, что в северной части Каспийского моря наблюдаются наибольшие по величине сгоны, однако они изучены слабо. Главной причиной этого является чрезвычайная отмелость берегов в этом районе: при сгонах образуется осушка, вода может уходить от водомерного поста на несколько километров в сторону моря, и при сильных сгонах взять отсчет по рейке невозможно.

Северо-Каспийский проект (NCOC) – это первый крупномасштабный проект освоения морских нефтегазовых месторождений в Казахстане. Он включает в себя пять месторождений, такие как Кашаган, Каламкас, Кайран, Актоты и Юго-Западный Кашаган [10].

Кашаган – самое крупное шельфовое нефтегазовое месторождение Казахстана, расположенное в 80 км от города Атырау в северо-восточной части Каспийского моря, занимающее площадь на поверхности 75 на 45 км. Коллектор морского месторождения залегает на глубине порядка 4000–4200 м ниже дна моря в шельфовой зоне.

Исходные данные и методы

Оценка структуры формирования сгонов, необходимая для разработки методов их прогнозирования, невозможна без активного изучения атмосферных процессов. В связи с этим, автором была поставлена задача исследования синоптических процессов над Европейской территорией России, Каспийским морем и Западной Сибирью, обусловивших экстремальное падение уровня воды в мелководной северо-восточной части Каспийского моря.

Для шельфа непривливногo Каспийского моря основным видом колебаний уровня воды являются сгонно-нагонные явления, при которых

за короткий промежуток времени (обычно от нескольких часов до нескольких суток) уровень может измениться на 1,5–3 м.

Опасные явления погоды могут наблюдаться отдельно, а в некоторых случаях могут быть причиной возникновения других опасных явлений. Усиление градиентов давления и ветра в районе Северного Каспия 17 апреля 2019 года привело к возникновению целого комплекса связанных друг с другом опасных явлений погоды. В районе месторождения Кашаган было зафиксировано экстремальное понижение уровня воды, вызванное штормовым северо-восточным ветром (более 24 м/с). За холодным фронтом произошла адвекция холода, вызвав резкое падение температуры воздуха на 13 °С.

Исходной информацией для исследования послужили карты приземного анализа погоды, высотные карты барической топографии AT500, прогностические и фактические данные уровня воды по модели MIKE Датского гидравлического института (DHI), скорости и направления ветра по модели GFS Национального управления океанических и атмосферных исследований США, температуры поверхности моря в районе Кашагана, а также вертикальные профили ветра (по аэрологической диаграмме), карты осадков и минимальных температур.

Результаты и их обсуждение

Для северо-восточной части моря большую часть года характерно преобладание ветров восточных и северо-восточных направлений со скоростями до 10 м/с (более 60 % случаев). Наибольшая повторяемость штормовых ветров наблюдается в направлении с северо-востока на юго-запад.

Сгонно-нагонные колебания уровня моря в северо-восточном Каспии довольно частое явление. В среднем за месяц происходит 3–5 нагонов и 5–6 сгонов воды различной интенсивности. Ниже рассмотрено сгонное явление, наблюдавшееся в северо-восточной части Каспия 18 апреля 2019 года.

На рис. 1а–г представлены карты приземного анализа за 17–18 апреля 2019 года (00 и 12 ч ВСВ).

На приземных картах 17 апреля над ЕТР, Северной Европой и Скандинавией преобладал мощный антициклон с двумя ярко выраженными центрами, одним над Швецией и вторым над Ленинградской и Московской областями. Глубокий циклон распространялся над Западной Сибирью с центром над Сибирской равниной, смещаясь в восточном направлении. В ложбине над севером Ирака к 00 ч ВСВ образовался циклон, который, быстро двигаясь на северо-восток, к 12 ч ВСВ достиг средней и южной части Каспийского моря. Фронтальная ложбина проходила над северо-востоком Каспия по направлению с северо-запада на юго-восток. Над Кашаганом в теплом секторе в течение дня наблюдалась дымка и низкая облачность, сменившиеся на ливневый дождь в вечернее время.

На следующий день отрог мощного антициклона с центром над Швецией вытягивался на юго-восток к северному и центральному Казахстану через ЕТР и Уральские горы. Центр низкого давления сместился восточнее к центральному Туркменистану, в то же время в ложбине над северо-восточным Каспием в зоне сильного сгущения градиентов северо-восточный ветер достиг штормовой силы (24 м/с с порывами до 29 м/с), мокрый снег в Кашагане, наблюдавшийся в ночное время, сменился ливневым дождем днем (33 мм за 48 часов).

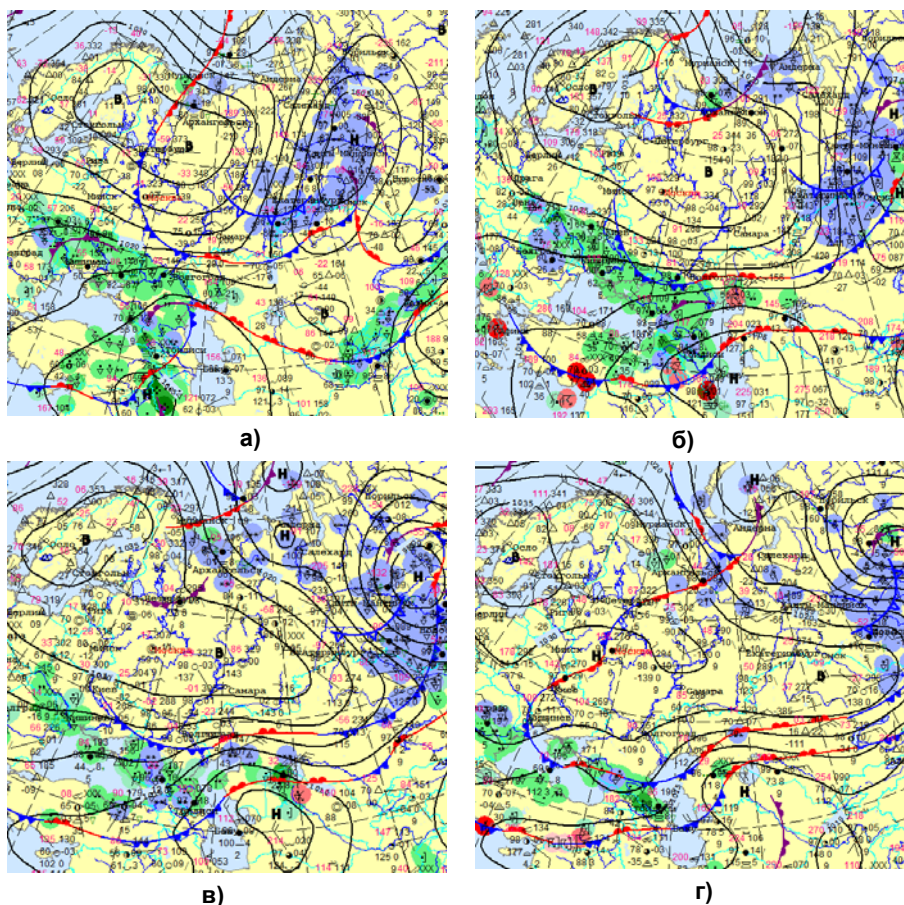


Рис. 1. Приземные карты погоды: 00 ч ВСВ 17.04.2019 г. (а); 12 ч ВСВ 17.04.2019 г. (б); 00 ч ВСВ 18.04.2019 г. (в); 12 ч ВСВ 18.04.2019 г. (г).

Fig. 1. Surface maps of 00 UTC 17.04.2019 (а); 12 UTC 17.04.2019 (б); 00 UTC 18.04.2019 (в); 12 UTC 18.04.2019 (г).

На картах АТ500 (рис. 2) обширная область высокого давления находилась над Скандинавией и Балтийским морем, вытягивая отрог на юго-восток через ЕТР к нижнему течению Волги. Между тем глубокая область

низкого давления над Западной Сибирью смещалась медленно на северо-восток вместе с глубоко вытянутой ложбиной, направленной на северную часть Каспийского моря. Северное вторжение обусловило распространение холодных воздушных масс с Белого моря и Новой Земли через ЕТР на Северный Каспий.

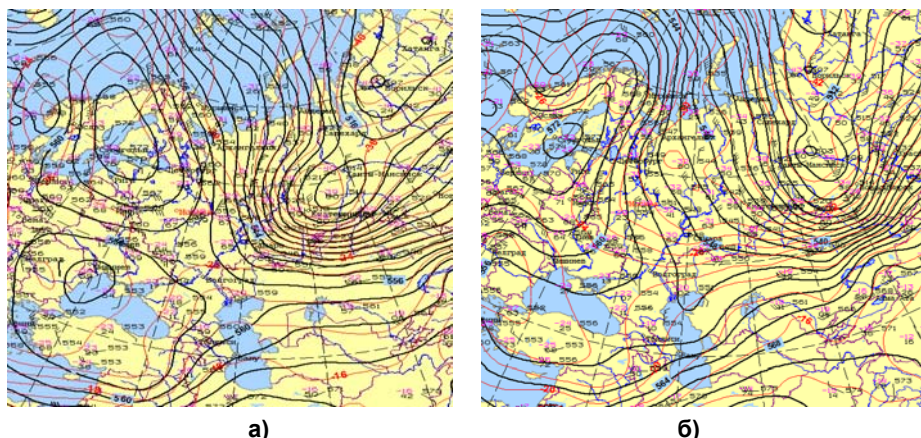


Рис. 2. Высотные карты АТ500: 00 ч ВСВ 17.04.2019 г. (а); 00 ч ВСВ 18.04.2019 г. (б).

Fig. 2. Upper-level maps of 00 UTC 17.04.2019 (a); 00 UTC 18.04.2019 (b).

Следует отметить, что в компании ВМТ Argoss была заблаговременно оценена синоптическая ситуация и выпущены штормовые предупреждения (таблица), где dd и ff –направление и скорость ветра, Ta и Ts – температуры воздуха и воды, ΔH – изменение уровня.

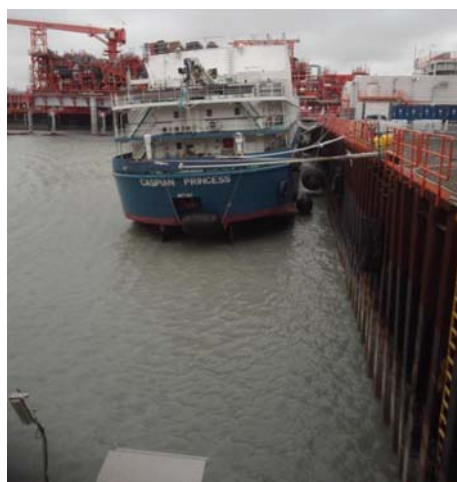
В Кашагане по данным аэрологической диаграммы на протяжении двух суток влажный воздух находился между высотой 200 гПа и земной поверхностью. Ветер восточного направления 17 апреля сменился на устойчивый северо-восточный со второй половины дня (16–18 м/с), превысив критерий опасного явления для ветра (по положению РГП Казгидромет), достигнув максимальной скорости в нижних слоях в ночное время (24 м/с с порывами до 29 м/с), постепенно начав уменьшаться в течение дня и к вечеру.

Сгон воды в районе шельфового месторождения начался 17 апреля, критическое значение ($-2,3$ м относительно среднего фонового уровня) зафиксировано в полдень 18 апреля. В результате адвекции холода за холодным фронтом, штормового северо-восточного ветра и ночного выхолаживания началось быстрое падение уровня моря (на 1,7 м за 24 часа), резкое понижение температуры воздуха, которое за сутки составило $16,2^{\circ}\text{C}$ (с $+15^{\circ}\text{C}$ до $-1,2^{\circ}\text{C}$), и температуры моря на 14°C (с $+15^{\circ}\text{C}$ до $+1^{\circ}\text{C}$). На рис. 3 видно влияние экстремально низкого уровня воды на положение судов в Кашагане.

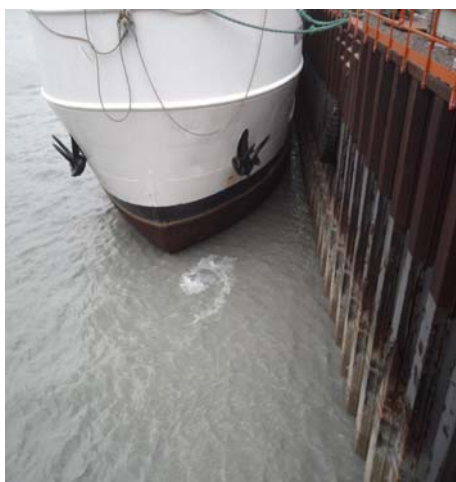
Таблица. Фактические данные измерений в Кашагане и прогностические данные по моделям GFS и MIKE

Table. Actual data from sensors in Kashagan and forecast data by using GFS and MIKE models

Время, ч ВСВ	dd, румбы		ff, м/с		Ta, °C		Ts, °C		ΔH, м	
	Факт.	Прогн.	Факт.	Прогн.	Факт.	Прогн.	Факт.	Прогн.	Факт.	Прогн.
17.04.2021										
00	90	95	10	9	+15	+14	+14	+13	-0,3	-0,4
03	88	90	10	11	+15	+14	+14	+13	-0,3	-0,3
06	84	85	12	11	+14	+13	+13	+12	-0,3	-0,3
09	86	85	12	13	+14	+12	+12	+11	-0,4	-0,5
12	75	75	12	14	+12	+12	+12	+11	-0,4	-0,5
15	68	70	15	14	+11	+10	+10	+9	-0,5	-0,7
18	50	55	16	16	+10	+9	+8	+9	-0,6	-0,7
21	47	45	18	19	+9	+9	+8	+8	-0,7	-0,8
18.04.2021										
00	45	45	20	20	+8	+7	+6	+7	-1,2	-1,1
03	44	45	24	25	+6	+6	+6	+6	-1,4	-1,4
06	45	45	22	23	+4	+3	+4	+4	-1,7	-1,6
09	46	45	18	20	+1	+2	+1	+2	-2,0	-2,1
12	47	50	15	16	-1	-2	0	-1	-2,3	-2,2
15	45	50	11	11	0	-1	+1	0	-2,0	-2,1
18	42	45	10	11	0	0	+1	0	-1,8	-2,0
21	47	50	9	10	+1	0	+1	+1	-1,6	-1,7



а)



б)

Рис. 3. Последствия экстремально низкого уровня моря в Кашагане.
Fig. 3. Effects of extremely low sea level in Kashagan.

Заключение

В выполненном исследовании установлены метеорологические условия формирования особо опасного сгона и резкого понижения температуры воздуха, зафиксированного 18 апреля 2019 года в районе шельфового месторождения Кашаган в северо-восточной части Каспия. Под влиянием штормового ветра северо-восточного направления с усилением скорости до 24 м/с произошло экстремальное падение уровня моря на 1,7 м за сутки. Адвекция холода за холодным фронтом вызвала резкое понижение температуры воздуха более чем 10 °С за сутки.

В результате экстремального сгона некоторые суда сели на мель у искусственных берегов и причалов, поэтому многие морские операции были отменены до полного восстановления уровня моря. Заблаговременная оценка синоптической ситуации позволила избежать значительных экономических потерь для логистических операций в Кашагане.

Проблема прогноза штормовых сгонов и нагонов в той или иной степени актуальна практически для всех мелководных побережий Каспийского моря. Штормовые нагоны и сгоны относятся к числу опасных явлений, поэтому в случае угрозы их возникновения прогностическими органами Казгидромета выпускается штормовое предупреждение в соответствии с требованиями нормативных документов.

Список литературы

1. Герштанский Н.Д. Особенности сгонно-нагонных колебаний уровня воды в устьевом взморье Волги // Труды ГОИН. 1973. Вып. 116. С. 131-145.
2. Ивкина Н.И., Соколова Л.М., Васенина Е.И., Галаева О.С. Каталог сгонно-нагонных явлений по данным Казахстанских наблюдательных пунктов. Алматы: ИП Волкова, 2012. 38 с.
3. Ивкина Н.И., Клове Б. и др. Колебания уровня и их влияние на нефтяное загрязнение Казахстанского сектора Каспийского моря // Гидрометеорология и экология. 2020. № 2. С. 62-72.
4. Информационный бюллетень о состоянии уровня Каспийского моря №15 от 15.03.2018 г. [Электронный ресурс] http://www.caspc.com/files/CASPCOM_bulletin15_1.pdf.
5. Информационный бюллетень о состоянии уровня Каспийского моря №16 от 27.09.2018 г. [Электронный ресурс] http://www.caspc.com/files/CASPCOM_bulletin16_1.pdf.
6. Косарев А.Н., Никонова Р.Е. О причинах и последствиях колебаний уровня Каспийского моря в XX–XXI столетиях // Труды ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 127-151.
7. Косарев А.Н., Никонова Р.Е. Современные колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, тенденции // Вестник Каспия. 2006. № 4 (60). С. 40-59.
8. Кошинский С.Д., Рыжкова Л.М. Условия наводнения в северо-западном Каспии 10-13 ноября 1952 г. // Труды ЗапСибНИИ. 1980. Вып. 9. С. 63-75.

9. Крылова В.С. Ландшафтная карта. Масштаб 1:1500000 // Атлас Атырауской области. Алматы: Казгеодезия. 2014. С. 114-117.
10. Отчет NCOC (Северо-Каспийский проект) об устойчивом развитии за 2017 г. [Электронный ресурс] https://www.ncoc.kz/Documents/SustainabilityReport2017_for%20web%20_ru.pdf.
11. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 4. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат. 1992. 359 с.
12. Рычагов Г.И. Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // Вестник Московского университета. 2011. № 2. С. 4-12.
13. Рычагов Г.И. Экологические аспекты нестабильности уровня Каспийского моря // Материалы XXXV Тектонического совещания. Москва: ГЕОС, 2002. № 6. С. 263-265.
14. Скриптунов Н.А., Горелиц О.В. Ветровые нагоны и сгоны у западного побережья Северного Каспия // Труды ГОИН. 2000. Вып. 207. С. 204-223.
15. Табелинова А.С. Влияние колебаний уровня Каспийского моря на прибрежные ландшафты Мангистауской и Атырауской областей Казахстана // Геоморфология. 2016. № 2. С. 96-103.
16. Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid // Russ. J. Earth. Sci. 2020. Vol. 20. P. 1-10. ES1006. DOI:10.2205/2019ES000688.

References

1. Gershtanskii N.D. Osobennosti sgonno-nagonnyh kolebaniy urovnya vody v usievom vzmorie Volgi. *Trudy GOIN*, 1973, vol. 116, pp. 131-145 [in Russ.].
2. Ivkina N.I., Sokolova L.M., Vasenina E.I., Galayeva O.S. Katalog sgonno-nagonnyh yavlenij po dannym Kazahstanskih nablyudatel'nyh punktov. Almaty, IP Volkova, 2012, 38 p. [in Russ.].
3. Ivkina N.I., Clove B. and others. Fluctuations in the level and their impact on oil pollution of the Kazakhstan sector of the Caspian Sea. *Gidrometeorologiya i ekologiya [Hydrometeorology and ecology]*, 2020, no. 2, pp. 62-72 [in Russ.].
4. Informacionnyj byulleten' o sostoyanii urovnya Kaspijskogo morya №15 ot 15.03.2018 g. [Information bulletin on the state of the Caspian Sea level no. 15 dated 15.03.2018] available at: http://www.caspc.com/files/CASPCOM_bulletin15_1.pdf [in Russ.].
5. Informacionnyj byulleten' o sostoyanii urovnya Kaspijskogo morya №16 ot 27.09.2018 g. [Information bulletin on the state of the Caspian Sea level no. 16 dated 27.09.2018] available at: http://www.caspc.com/files/CASPCOM_bulletin16_1.pdf [in Russ.].
6. Kosarev A.N., Nikonova R.E. O prichinah i posledstviyah kolebaniy urovnya Kaspijskogo morya v XX-XXI stoletiyah. *Trudy GOIN*, 2008, vol. 211, pp. 127-151 [in Russ.].
7. Kosarev A.N., Nikonova R.E. Sovremennye kolebaniya urovnya Kaspijskogo morya: prichiny, posledstviya, tendencii. *Vestnik Kaspiya*, 2006, no. 4 (60), pp. 40-59. [in Russ.].
8. Koshinskii S.D., Ryzhkova L.M. Usloviya navodneniya v severo-zapadnom Kaspii 10-13 noyabriya 1952, *Trudy ZapSibNNI*, 1980, vol. 9, pp. 63-75 [in Russ.].

9. Krylova V.S. Landshaftnaya karta. Masshtab 1:1500 000, Atlas Atyrauskoj oblasti. Almaty, Kazgeodeziya, 2014, pp. 114-117 [in Russ.].
10. Otchet NCOC (Severo-Kaspijskij proekt) ob ustojchivom razvitii za 2017 g. [NCOC (North Caspian Project) Report on Sustainable Development for 2017] available at: https://www.ncoc.kz/Documents/SustainabilityReport2017_for%20web%20_ru.pdf [in Russ.].
11. Proekt «Morya». Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej, Kaspijskoe more, vol. 1, Gidrometeorologicheskie usloviya, Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992, 359 p. [in Russ.].
12. Rychagov G.I. Fluctuations in the Caspian Sea level: causes, consequences, forecast. *Vestnik Moskovskogo universiteta* [Bulletin of the Moscow University], 2011, no. 2, pp. 4-12 [in Russ.].
13. Rychagov G.I. Ekologicheskie aspekty nestabil'nosti urovnya Kaspijskogo morya Materialy XXXV Tektonicheskogo soveshchaniya, Moskva, GEOS, 2002, no. 6, pp. 263-265 [in Russ.].
14. Skriptunov N.A., Gorelits O.V. Vetrovye nagony i sgony u zapadnogo poberezhia Severnogo Kaspiya. *Trudy GOIN*, 2000, vol. 207, pp. 204-223 [in Russ.].
15. Tabelinova A.S. The impact of fluctuations in the Caspian Sea level on the coastal landscapes of the Mangistau and Atyrau regions of Kazakhstan. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2016, no. 2, pp. 96-103 [in Russ.].
16. Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid. *Russ. J. Earth. Sci.*, 2020, vol. 20, pp. 1-10, ES1006, doi:10.2205/2019ES000688.

*Поступила 06.07.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 06.07.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-64-79>

УДК 551.583.16

Охотский тропосферный циклон и его роль в формировании экстремальной температуры воздуха в январе в 1950–2019 гг.

Т.А. Шатилина¹, Г.Ш. Цициашвили², Т.В. Радченкова²

*¹Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии, тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»),
Владивосток, Россия;*

*²Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, Россия
tatyana.shatilina@tinro-center.ruguram@iam.dvo.ru, tarad@yandex.ru*

В январе 1950–2019 гг. анализируется поле геопотенциала H_{500} над центральным районом второго естественно синоптического района с целью определения режимных характеристик охотского тропосферного циклона и его роли в формировании аномалий температуры воздуха над восточным побережьем Азии. Представлен механизм формирования экстремальных значений температуры воздуха у земли с использованием этой методики. В годы локализации минимума геопотенциала H_{500} над Охотским морем происходит формирование экстремально низкой температуры воздуха в области минимума и связанной с ним глубокой ложбины. Обсуждается разработанная методика построения эллипсов, аппроксимирующих линии уровня H_{500} в малой окрестности минимума геопотенциала H_{500} , рассчитаны характеристики эллипсов и анализируется их связь с эволюцией тропосферного циклона. Характеристики эллипсов, построенных в окрестностях минимума геопотенциала, вне пределов Охотского моря значительно отличаются от характеристик эллипсов над Охотским морем. Сильное сжатие эллипсов к большой оси отмечается при ослаблении интенсивности дальневосточной ложбины. В этом случае наблюдается вынос теплых океанических воздушных масс в Охотское море. Положение минимума H_{500} и характеристики эллипсов в окрестности центра могут использоваться для анализа причин резких изменений температуры воздуха в исследуемом районе.

Ключевые слова: охотский тропосферный циклон, центры минимумов геопотенциала H_{500} , экстремальная температура воздуха у земли, характеристики эллипсов

The Okhotsk tropospheric cyclone and its role in the occurrence of extreme air temperature in January in 1950–2019

T.A. Shatilina¹, G.Sh. Tsitsiashvili², T.V. Radchenkova²

*¹Research Institute of Fisheries and Oceanography, pacific branch
of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia;*

*²Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia
tatyana.shatilina@tinro-center.ruguram@iam.dvo.ru, tarad@yandex.ru*

The field of H_{500} geopotential height over the central part of the second natural synoptic region in January during 1950-2019 is analysed to determine regime characteristics of the Okhotsk tropospheric cyclone and its role in the formation of air temperature anomalies over the eastern coast of Asia. A mechanism of occurrence of extreme surface air temperatures using this technique is presented. Extremely low air temperature in the area of the minimum and related deep through are formed during the years when the H_{500} minimum is localized over the Sea of Okhotsk. A methodology for constructing ellipses approximating the H_{500} level lines in a small neighborhood of the H_{500} minimum is developed, the ellipse characteristics are calculated, and their relation to the tropospheric cyclone evolution is analysed. The characteristics of the ellipses constructed in the neighborhood of the geopotential height minimum outside the Sea of Okhotsk significantly differ from those of the ellipses over the Sea of Okhotsk. A high compression of the ellipses towards the major axis is reported when the Far Eastern through intensity is reduced. In this case, an outflow of warm oceanic air masses to the Sea of Okhotsk is observed. The location of the H_{500} minimum and the characteristics of the ellipses located within the center circle may be used to explain reasons for dramatic changes in air temperature in the study region.

Keywords: Okhotsk tropospheric cyclone, H_{500} minima centers, extreme surface air temperature, ellipse characteristics

Введение

В зимний период основными центрами действия атмосферы у восточного побережья Азии в приземном поле являются сибирский антициклон и алеутская депрессия. Изменчивости этих центров посвящен ряд работ [4–7]. В средней тропосфере в зимний период над Дальним Востоком расположена дальневосточная ложбина, большая часть которой располагается над Охотским морем. Некоторые данные о режиме тропосферной ложбины в 21 веке были опубликованы в кратком сообщении [9].

Над северо-западной частью Охотского моря часто наблюдается вторичный полярный тропосферный циклон, интенсивность и положение которого определяют циркуляцию воздушных масс у восточного побережья Азии и климатические особенности [8].

Охотский тропосферный циклон (ОТЦ) можно считать самостоятельным центром действия атмосферы. Роль зимнего охотоморского циклона как сезонного центра действия атмосферы мало изучена [1]. В общей циркуляции атмосферы ОТЦ играет не меньшую роль, чем алеутская депрессия. В середине зимы наблюдается наибольшая разница температур поверхностей океана и материка, что приводит к очень большим контрастам температуры в высотной фронтальной зоне. Поэтому характерные для зимнего сезона процессы наиболее четко проявляются в январе. Охотский тропосферный циклон обнаруживается на изобарической поверхности AT_{500} как минимум геопотенциала H_{500} . Поэтому нам представляется важным рассчитать характеристики эллипсов, аппроксимирующих линии уровня H_{500} в малой окрестности минимума, и проанализировать их связь с эволюцией тропосферного циклона.

Целью работы является определить режимные характеристики, местоположение охотского тропосферного циклона и выявить его роль в формировании климатических аномалий над восточным побережьем Азии.

Использованные данные и методика исследования

Основными данными для расчета режимных характеристик охотского тропосферного циклона послужили архивы реанализа NCEP/NCAR атмосферного давления P_0 , геопотенциала H_{500} и температуры воздуха T_a в узлах регулярной сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ за период с 1950 по 2019 год.

Использовались данные температуры воздуха T_a из архива ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/it/178-aisori>) по станциям, расположенным на побережье Охотского и Японского морей: Охотск ($59^\circ 22'$ с. ш., $143^\circ 12'$ в. д.), Аян ($56^\circ 27'$ с. ш., $138^\circ 09'$ в. д.), Магадан ($59^\circ 33'$ с. ш., $150^\circ 47'$ в. д.), Поронайск ($49^\circ 13'$ с. ш., $143^\circ 06'$ в. д.), Николаевск-на-Амуре ($53^\circ 09'$ с. ш., $140^\circ 42'$ в. д.), Южно-Сахалинск ($46^\circ 57'$ с. ш., $142^\circ 43'$ в. д.), Александровск-Сахалинский ($50^\circ 54'$ с. ш., $142^\circ 10'$ в. д.), Советская Гавань ($49^\circ 00'$ с. ш., $140^\circ 18'$ в. д.). Широта и долгота центра выбиралась как точка минимума для района $45\text{--}65^\circ$ с. ш., $120\text{--}160^\circ$ в. д. по сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Перейдем теперь к анализу заданных в узлах квадратной решетки функций, характеризующих геопотенциал H_{500} . Пусть трижды непрерывно дифференцируемая функция $f(x, y)$ определена на прямоугольнике $D = \{0 \leq x \leq Nh, 0 \leq y \leq Mh\}$ и измерена в точках (ih, jh) , $i = 0, \dots, N$, $j = 0, \dots, M$. Всюду далее полагаем, что величина шага решетки h является достаточно малой. Известно, что в точке (kh, lh) функция f достигает глобального минимума. Причем точка (kh, lh) является внутренней в дискретном множестве $\{(ih, jh), i = 0, \dots, N, j = 0, \dots, M\}$, т. е. $0 < k < N$; $0 < l < M$. Представим разложение функции $f(x, y)$ в ряд Тейлора при условии $|x - kh| \leq h$, $|y - lh| \leq h$:

$$f(x, y) = f(kh, lh) + \frac{1}{2} \left[A(x - kh)^2 + B(y - lh)^2 + 2C(x - kh)(y - lh) + o(h^2) \right],$$

$$A = f_{x,x}(kh, lh), B = f_{y,y}(kh, lh), C = f_{x,y}(kh, lh).$$

Поскольку точка (kh, lh) является точкой глобального минимума функции $f(x, y)$, то квадратичная форма $A(x - kh)^2 + B(y - lh)^2 + 2C(x - kh)(y - lh)$ является положительно определенной и, значит, выполняются неравенства: $A + B > 0$, $AB > C^2$.

Построим конечно-разностные оценки частных производных A, B, C :

$$\begin{aligned} a &= \frac{f((k+1)h, lh) - 2f(kh, lh) + f((k-1)h, lh)}{h^2} = A + O(h), \\ b &= \frac{f(kh, (l+1)h) - 2f(kh, lh) + f(kh, (l-1)h)}{h^2} = B + O(h), \\ c &= \frac{f((k+1)h, (l+1)h) - f((k+1)h, lh) - f(kh, (l+1)h) + f(kh, lh)}{h^2} = \\ &= C + O(h) \end{aligned}$$

Тогда функцию f можно аппроксимировать функцией $\hat{f}$ с точностью $o(h^2)$ в переменных $X = \frac{x - kh}{h}$, $Y = \frac{y - lh}{h}$,

$$\hat{f}(x, y) = f(kh, lh) + \frac{1}{2}(aX^2 + bY^2 + 2cXY), \quad a + b > 0, \quad ab > c^2 \text{ и, значит,}$$

квадратичная форма $aX^2 + bY^2 + 2cXY$ также является положительно определенной.

Приведем теперь эту квадратичную форму к диагональному виду.

Для этого построим матрицу этой квадратичной формы $D = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix}$ и

выпишем характеристическое уравнение $(a - \lambda)(b - \lambda) - c^2 = 0$. Корнями

этого квадратного уравнения являются $\lambda_{\pm} = \frac{a+b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a-b}{2}\right)^2 - ab + c^2} > 0$

– собственные числа матрицы D , а ее ортонормированные собственные вектора n_+, n_- удовлетворяют линейным уравнениям $Dn_+ = \lambda_+ n_+$, $Dn_- = \lambda_- n_-$.

Перейдем в систему координат (u_+, u_-) с ортонормированным базисом $\vec{n}_+, \vec{n}_-$. В этой системе координат квадратичная форма $aX^2 + bY^2 + 2cXY$ представима суммой квадратов $\lambda_+ u_+^2 + \lambda_- u_-^2$. Линии уровня этой квадратичной формы являются эллипсами вида $\lambda_+ u_+^2 + \lambda_- u_-^2 = \text{const} > 0$. Обозначим $K = \sqrt{\lambda_+ / \lambda_-}$, тогда для построения указанных эллипсов окружности, задаваемые уравнением $u_+^2 + u_-^2 = \text{const}$, следует сжать по оси u_+ в K раз. Здесь рассмотрен способ построения эллипсов линий уровня функции f в малой окрестности точки минимума. Аналогично такие эллипсы можно построить в малой окрестности точки максимума функции f (рис. 1).

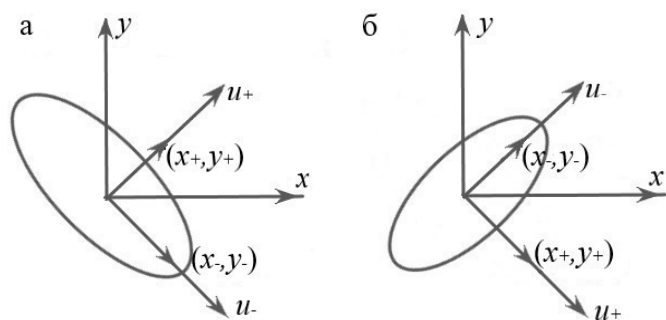


Рис. 1. Направление поворота эллипсов, построенных в окрестностях точки минимума геопотенциала H_{500} : эллипс 1 повернут против часовой оси, когда $y_+ > 0$ (а); эллипс 2 повернут по часовой оси, когда $y_+ < 0$ (б).

Fig.1. Direction of a turn of the ellipses, built in the vicinity of geopotential H_{500} 's minimum point: ellipse 1 is turned anti-clockwise when $y_+ > 0$ (a); while ellipse 1 is turned clockwise when $y_+ < 0$ (б).

Результаты и обсуждение

На первом этапе были определены центры минимума H_{500} над центральным районом второго естественно синоптического района за период 1950–2019 гг. (рис. 2).

Отметим, что в 50-х годах прошлого столетия большая часть центра минимума геопотенциала H_{500} располагалась над северо-западной частью Охотского моря, за исключением 1950 и 1953 гг., когда центр находился в западной континентальной части района и к юго-востоку от п-ва Камчатки (рис. 2а). В 60-х годах прошлого столетия центры минимума располагались в пределах Охотского моря, за исключением южного смещения минимума в 1963 г. (рис. 2б). В 70-е годы центры располагались в основном над северным побережьем Охотского моря, а также вне границ Охотского моря (рис. 2б). Аномальное смещение центра на континент отмечалось в январе 1974 и 1979 гг., а в 1976 и 1977 гг. отмечалось смещение к юго-востоку от Камчатки. В 80-х годах прошлого столетия большинство центров находилось в северо-западной части Охотского моря либо над северной частью моря. Исключение составили 1981 г., когда центр отмечался над Камчаткой, и 1980, 1984 гг., когда центры были смещены на континентальную часть (рис. 2в). По положению центров значительно отличаются 90-е годы прошедшего столетия (рис. 2в). В эти годы только в январе 1990 г. минимум H_{500} отмечался над Охотским морем, в остальные годы минимумы были смещены на континентальную часть района (1994, 1995 и 1996) либо на юго-восток (1997 и 1991).

В первом десятилетии 21 века количество лет, когда минимумы располагались над Охотским морем увеличилось до 5. ОТПЦ наблюдался в 2000, 2001, 2004, 2005 и 2008 гг. (рис. 2г). Во втором десятилетии

21 века минимумы над Охотским морем отмечались в 2010, 2014 и 2016 и 2019 гг. (рис. 2г). Аномальные отклонения на западную континентальную часть района были зафиксированы в 2002, 2012, 2009, 2015 и 2018 гг., а на восточную часть – в 2011 и 2013 гг.

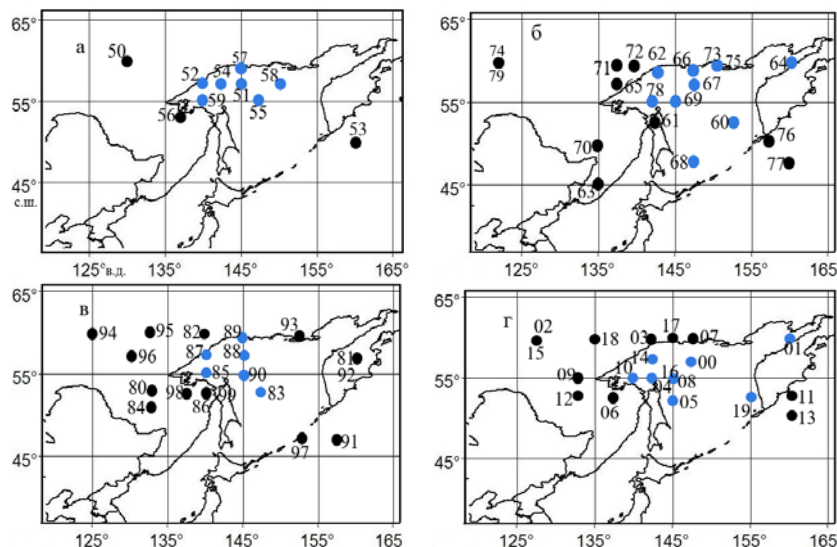


Рис. 2. Положение центров минимума геопотенциала H_{500} в январе: 1950–1959 (а); 1960–1979 (б); 1980–1999 (в); 2000–2019 гг. (г). Синим цветом выделены центры над Охотским морем.

Fig. 2. Location of the centers of geopotential H_{500} 's minimum in January: 1950–1959 (a); 1960–1979 (б); 1980–1999 (в); 2000–2019 (r). The centers above the Sea of Okhotsk are painted blue.

В первую очередь нас интересуют характеристики центра минимума геопотенциала H_{500} над Охотским морем, так называемого охотского тропосферного циклона. В таблице представлены характеристики ОТЦ: координаты центра, значения геопотенциала H_{500} в центре, коэффициент K , характеризующий сжатие эллипса, координаты эллипса x_+ и y_+ и тип эллипса 1 или 2 в зависимости от его поворота по часовой стрелке, когда $y_+ < 0$ (рис. 1б), или против часовой стрелки, когда $y_+ > 0$ (рис. 1а).

Рассмотрим несколько примеров, когда центры минимума геопотенциала H_{500} располагались над Охотским морем. Так, в 1952 г. центр располагался в точке с координатами $57,5^\circ$ с. ш., 140° в. д., значение H_{500} в центре было 500,5 дам. Построенный вокруг него эллипс имеет коэффициент $K=3,5$ и повернут против часовой оси, так как тип эллипса 1 при $y_+ > 0$. В 1960 г. центр минимума геопотенциала H_{500} (507,8 дам) располагался в точке с координатами $52,5^\circ$ с. ш., $152,5^\circ$ в. д., коэффициент $K=10,98$, значит, эллипс более вытянут вдоль основной оси и повернут по часовой стрелке, так как тип эллипса 2 при $y_+ < 0$.

Таблица. Значение геопотенциала H_{500} в центре минимума, широта и долгота центра, коэффициент сжатия эллипса K , x_+ , y_+ и типы эллипсов в годы, когда центр охотского тропосферного циклона расположен над Охотским морем

Table. The value of the geopotential H_{500} in the center of the minimum, the latitude and longitude of the center, the compression coefficient of the ellipse K , x_+ , y_+ and the types of ellipses in the years when the center of the Okhotsk tropospheric cyclone is located over the Sea of Okhotsk

Годы	H_{500} , дам	Широта, °с. ш.	Долгота, °в. д.	K	x_+	y_+	Тип эллипса
1951	509,1	57,5	145	2,6	0,999	-0,044	2
1952	500,5	57,5	140	3,5	0,994	0,105	1
1954	502,8	57,5	142,5	3,0	0,999	0,046	1
1955	505,0	55	147,5	4,1	1,000	0,027	1
1957	506,8	60	145	2,2	0,962	-0,275	2
1958	506,1	57,5	150	9,1	0,998	0,067	1
1959	502,3	55	140	2,4	0,996	0,084	1
1960	507,8	52,5	152,5	11,0	1,000	-0,018	2
1962	509,1	60	142,5	2,5	0,042	-0,999	2
1966	506,9	60	147,5	3,8	0,999	-0,051	2
1967	498,4	57,5	147,5	3,8	1,000	-0,018	2
1968	512,1	47,5	147,5	5,0	1,000	0,024	1
1969	500,9	55	145	3,7	1,000	0,026	1
1973	501,5	60	150	3,1	1,000	-0,006	2
1978	498,7	55	142,5	3,0	0,995	-0,095	2
1983	507,9	52,5	147,5	2,8	0,973	-0,231	2
1985	508,0	55	140	5,6	0,995	0,103	1
1987	503,9	57,5	140	3,8	0,996	-0,087	2
1988	502,1	57,5	145	3,4	1,000	0,007	1
1989	503,3	60	145	5,7	0,992	-0,126	2
1990	503,5	55	145	3,9	0,994	-0,109	2
2000	514,9	57,5	147,5	1,4	0,917	0,400	1
2001	506,7	60	160	8,9	1,000	0,015	1
2004	514,5	55	142,5	4,6	1,000	-0,020	2
2005	512,0	52,5	145	2,2	0,999	0,053	1
2006	512,8	52,5	137,5	4,4	0,986	-0,169	2
2008	502,6	55	145	3,5	0,992	-0,125	2
2010	510,2	55	140	2,5	1,000	-0,009	2
2014	504,6	57,5	142,5	3,7	0,996	-0,094	2
2016	506,0	55	145	2,5	1,000	-0,009	2
2019	510,4	52,5	155	6,8	0,998	-0,058	2

Для исследования роли ОЦ в формировании экстремально низкой температуры воздуха у земли были рассмотрены данные температуры воздуха на ГМС, расположенных на побережье Охотского и Японского

морей (в области влияния тропосферной ложбины). На ГМС Охотск, расположенной на побережье северо-западной части Охотского моря, экстремально низкая температура воздуха отмечалась в годы, когда центр минимума H_{500} располагался над Охотским морем. Аномалия температуры воздуха здесь в 1951 и 1952, 1954 и 1955, 1966 и 1967 гг., а также в 1987 г. составляла от -3,4 до -5,2 °С.

На ГМС Аян, также расположенной в северо-западной части Охотского моря, экстремальное понижение температуры воздуха происходило в годы, когда ОТЦ располагался над северо-западной частью Охотского моря. Аномалия температуры воздуха при этом здесь составляла от -3,3 до -4,4 °С, в 1959 г. – -6,9 °С.

На ГМС Магадан, расположенной на побережье северной части Охотского моря, экстремально низкая температура воздуха отмечалась в 1954 (-5,2 °С), 1966 (-5,8 °С), 1967 (-6,6 °С), 1973 (-6,6 °С). Экстремально низкая температура воздуха на севере Охотского моря была обусловлена интенсивным развитием северо-охотской ложбины (аномалии H_{500} здесь достигали минус 6–10 дам).

Влияние ОТЦ и связанной с ним ложбины обуславливало экстремальное понижение температуры воздуха также на Сахалине и в восточных районах Приморского края.

Для демонстрации роли ОТЦ (когда центр располагается над Охотским морем) в формировании экстремумов над Дальним Востоком на рис. 3 представлена среднемесячная структура поля H_{500} , положение центров, эллипсов и экстремальных областей температуры воздуха у земли (по данным реанализа).

В январе 1954 г. центр тропосферного циклона (эллипс 1 типа) располагался над северо-западной частью Охотского моря, давление в его центре было 502,8 дам, значение коэффициента сжатия $K=3$, $x_+=0,999$ и $y_+=0,046$ (см. таблицу), ось эллипса повернута против часовой стрелки. Над северной частью Охотского моря располагается глубокая тропосферная ложбина, значения H_{500} здесь достигают 508 дам. Аномалии температуры воздуха в этой ложбине достигают -6 °С. Второй очаг с аномально низкой температурой воздуха отмечается на континентальном побережье Приморского края (рис. 3а). Изогипса 540 дам (центральная изогипса высотной фронтальной зоны над восточной Азией) занимает среднемноголетнее положение. Об интенсивном похолодании в области тропосферного циклона и тропосферной ложбины свидетельствуют также данные ГМС, описанные выше.

В январе 1969 г. центр тропосферного циклона располагался над центральной частью Охотского моря, давление в его центре было 500,9 дам, значение $K=3,7$ $x_+=1$ и $y_+=0,026$ (см. таблицу). Заметим, что эти показатели были близки к 1954 г. Обширная область холодных воздушных масс располагалась над континентальными районами Дальнего Востока (рис. 3б). В этом году экстремально низкая температура воздуха была на ГМС Николаевск-на-Амуре и Благовещенск (аномалия - 4,4 °С).

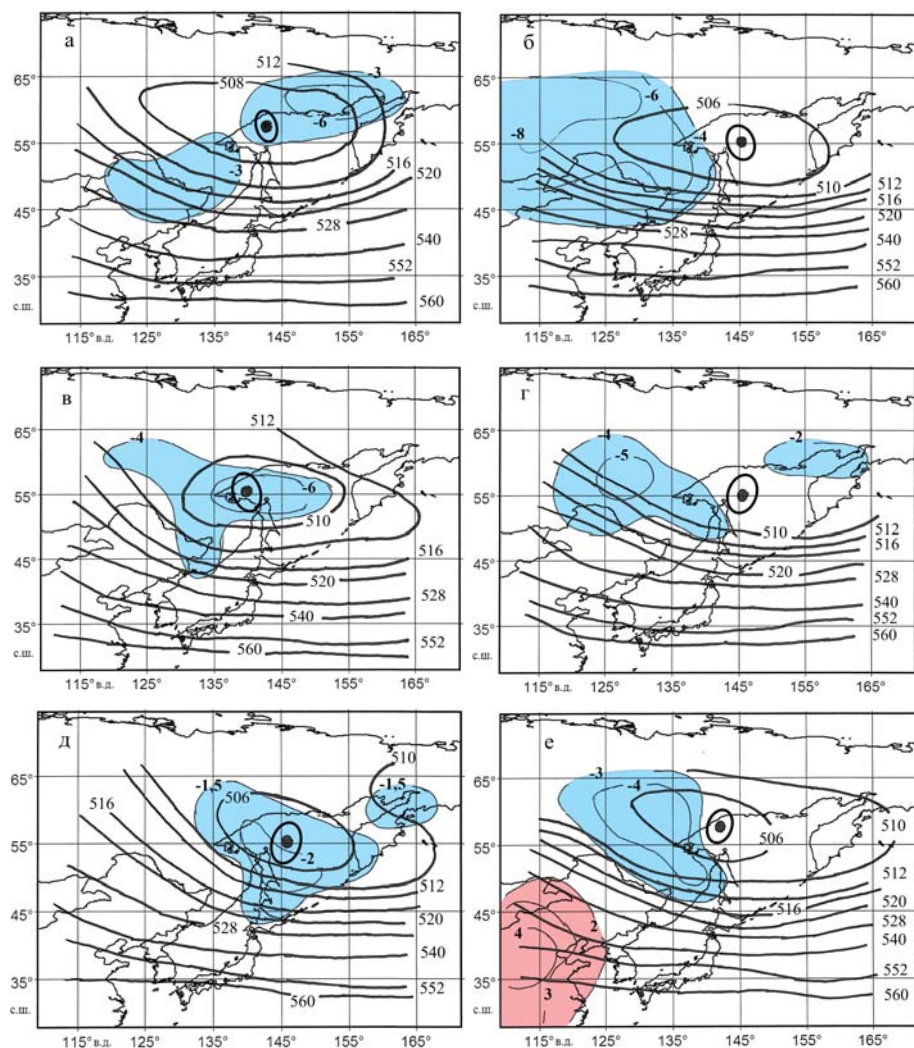


Рис. 3. Среднемесячная структура поля геопотенциала изобарической поверхности 500 дам и положение экстремальных областей приземной температуры воздуха T_a у земли в январе: 1954 г. (а); 1969 г. (б); 1985 г. (в); 1990 г. (г); 2008 г. (д); 2014 г. (е). Точкой показан центр охотского тропосферного циклона и положение эллипсов в окрестности центра. Синим цветом показаны области с экстремально низкой температурой воздуха у земли, красным цветом – области с экстремально высокой температурой воздуха у земли.

Fig. 3. Mean monthly structure of the geopotential field at 500 gPa isobaric surface and positions of extreme areas of surface air temperature T_a in January: 1954 (a); 1969 (б); 1985 (в); 1990 (г); 2008 (д); 2014 (е). The point indicates the Okhotsk tropospheric cyclone's center and the ellipse positions in the center's vicinity. Areas of extremely low surface air temperature are painted blue, while areas of extremely high surface air temperature are painted red.

В январе 1985 г. центр тропосферного циклона (эллипс 1 типа) располагался над северо-западной частью Охотского моря (несколько западнее 1954 г.), давление в его центре было 505,4 дам, значение коэффициента сжатия $K=5,6$, $x_+=0,995$ и $y_+=0,103$ (см. таблицу). Охотское море и прилегающие районы северной части Японского моря и Тихого океана находились под влиянием глубокой тропосферной ложбины. Изогипса 540 дам располагалась южнее своего среднего положения (в отличие от первых двух лет). Экстремально холодные воздушные массы наблюдались над северо-западной частью моря (рис. 3в). В этом году заметно увеличилось число станций с экстремально низкой температурой воздуха. Так, на ГМС Южно-Сахалинск, Советская Гавань, Николаевск-на-Амуре, Холмск, Александровск-Сахалинский, Погиби аномалии температуры воздуха составляли от $-4,4$ до $4,8$ °C.

В январе 1990 г. центр тропосферного циклона (эллипс 2 типа) располагался над центральной частью Охотского моря, давление в его центре было 503,5 дам, $K=3,9$, $x_+=-0,994$ и $y_+=0,109$ (см. таблицу), в отличие от предыдущих лет ось эллипса была повернута на северо-восток. Основной очаг холодных воздушных масс располагался в северо-западной континентальной части (рис. 3г). В этом году экстремально низкая температура отмечалась на ГМС Александровск-Сахалинский, Советская Гавань (аномалии -4 °C) и Поронайск ($-5,5$ °C).

В январе 2008 г. центр тропосферного циклона располагался над центральной частью Охотского моря, давление в его центре было 502,6 дам, $K=3,5$, $x_+=-0,992$ и $y_+=0,125$ (см. таблицу). Основной очаг холодных воздушных масс располагался над Охотским морем (рис. 3д).

В январе 2014 г. центр тропосферного циклона располагался над северо-западной частью Охотского моря, давление в его центре было 504,6 дам, $K=3,7$, $x_+=-0,996$ и $y_+=0,094$ (см. таблицу). Очаг холодных воздушных масс располагался в северо-западной части района и над северной частью Японского моря (рис. 3е). Область теплых воздушных масс наблюдалась над юго-восточной частью района. Аномалии температуры воздуха на ГМС Николаевск-на-Амуре и Александровск-Сахалинский составили $-2,8$ °C.

Таким образом, в годы локализации минимума геопотенциала H_{500} над Охотским морем происходит формирование экстремально низкой температуры воздуха в области минимума и связанной с ним глубокой ложбины. В этом случае ось эллипса повернута либо по часовой стрелке (на северо-запад), либо против (на северо-восток).

Из всех рассмотренных лет самым экстремальным был январь 1985г., когда почти на всех станциях аномалии температуры воздуха превышали -4 °C.

Нами были рассчитаны также характеристики эллипсов, когда минимума H_{500} располагались вне Охотского моря (данные не приводятся). На рис. 4 представлены примеры барических полей, когда центры минимумов H_{500} располагались вне Охотского моря.

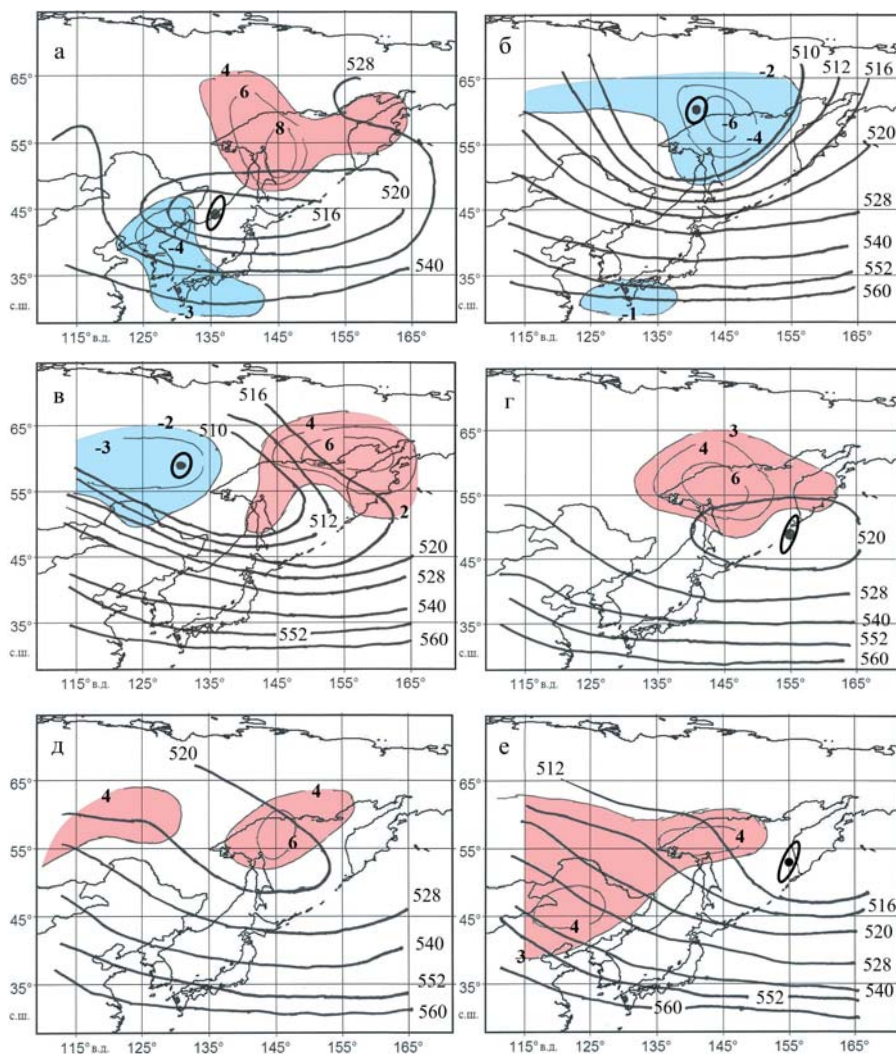


Рис. 4. Среднемесячная структура поля геопотенциала изобарической поверхности 500 дам и положение экстремальных областей приземной температуры воздуха T_a у земли в январе: 1963 г. (а); 1982 г. (б); 1996 г. (в); 1997 г. (г); 2015 г. (д); 2019 г. (е). Синим цветом показаны области с экстремально низкой температурой воздуха у земли, красным цветом – области с экстремально высокой температурой воздуха у земли.

Fig. 4. Mean monthly structure of the geopotential field at 500-gPa isobaric surface and locations of extreme areas of surface air temperature T_a in January: 1963 (a); 1982 (b); 1996 (v); 1997 (r); 2015 (d); 2019 (e). Areas of extremely low surface air temperature are painted blue, while areas of extremely high surface air temperature are painted red.

В январе 1963 г. минимум H_{500} (эллипс 2 типа) располагался над югом Приморского края, $K=6,339$, $x_+=-1,0$, $y_+=0,019$, большая ось эллипса повернута по часовой стрелке, Дальневосточная ложбина была значительно ослаблена, изогипса 540 дам смещалась далеко к югу. Охотское море находилось в области экстремально теплых воздушных масс. В то же время юг Японского моря находился под воздействием холодных воздушных масс (рис. 4а). Теплые воздушные массы распространялись в передней части обширной тропосферной депрессии, значения H_{500} были 516, 520 дам. В этом году экстремальная температура воздуха отмечалась на ГМС Николаевск-на-Амуре (аномалия составила 4 °С), на ГМС Южно-Сахалинск (4,3 °С), на ГМС Охотск она была выше нормы на 6,9 °С. На юге района в области экстремально низкой температуры воздуха на корейской станции Сеул температура была ниже нормы на 6,5 °С, а на станции Есу на 4,4 °С.

В 1982 г. дальневосточная ложбина располагалась над Охотским морем, центр глубокой депрессии наблюдался на северной границе Охотского моря, в его области отмечалось экстремальное понижение температуры воздуха (рис. 4б), ось эллипса повернута по часовой стрелке.

В январе 1996 г. Охотское море находилось под влиянием тропосферного гребня, минимум располагался в северо-западной части континента (рис. 4в). Экстремально высокая температура воздуха у земли отмечалась над северо-восточной частью Охотского моря.

В январе 1997 г. минимум H_{500} (эллипс 2 типа) располагался над юго-восточной частью Охотского моря, $K=5,401$, $x_+=-1,0$, $y_+=0,008$ (рис. 4г). Коэффициент K показывает сильное сжатие эллипса, повернутого по часовой стрелке. Дальневосточная ложбина была значительно ослаблена, давление над Охотским морем составляло 520 дам, что было значительно выше среднего многолетнего значения.

В январе 2015 г. минимум H_{500} не наблюдался в пределах исследуемого района. Дальневосточная ложбина была значительно ослаблена, давление над Охотским морем составляло 520 дам, что было значительно выше среднего многолетнего значения (рис. 4д).

В передней части тропосферной ложбины осуществлялся перенос теплого воздуха с океанических районов. Здесь располагался очаг с экстремально высокой температурой воздуха. Так, по сведениям Гидрометцентра России [2], температура воздуха на станции Охотск была выше нормы на 5,8 °С, а на станции Аян на 4,7 °С.

В январе 2019 г. минимум H_{500} (эллипс 2 типа) располагался над юго-восточной частью Охотского моря, $K=6,787$, $x_+=-0,998$, $y_+=0,058$ (рис. 4е). Над континентальной частью восточной Азии отмечался высотный гребень (периферия высотного сибирского гребня). В [3] отмечено, что Сибирский антициклон в январе 2019 г. оставался стабильным и очень интенсивным, давление в его центре на 6 дам превышало норму. Центр антициклона располагался на северо-западе Монголии. Наиболее

интенсивная циклоническая деятельность происходила у берегов Камчатки, где располагался основной центр раздвоенного алеутского минимума. Аномалии давления достигали здесь -15 дам. Отмечено также [3], что на ГМС Аян аномалия температуры воздуха была 5°C повторяемостью один раз в 110 лет, на станции Благовещенск $6,7^{\circ}\text{C}$ повторяемостью раз в 136 лет.

Таким образом, характеристики эллипсов вне пределов Охотского моря значительно отличаются от характеристик эллипсов, располагающихся над Охотским морем. Сильное сжатие отмечается при ослаблении интенсивности дальневосточной ложбины и выносе теплых воздушных масс на Охотское море. Механизм формирования экстремальной температуры воздуха над вторым естественно синоптическим районом демонстрируется на рис. 5.

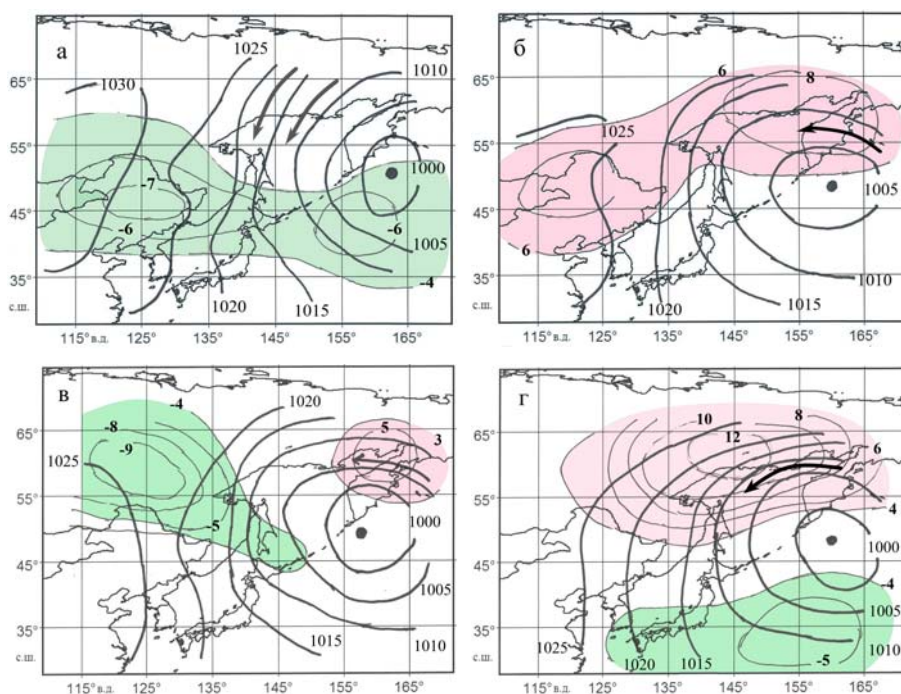


Рис. 5. Приземное поле давления P_0 и положение экстремальных областей геопотенциала H_{500} (дам) в январе: 1985 г. (а); 2015 г. (б); 1996 г. (в); 1997 г. (г). Зеленым цветом выделена область со значительными отрицательными аномалиями геопотенциала, а розовым области положительных аномалий геопотенциала H_{500} . Точками выделены центры приземных циклонов. Стрелками показано направление выноса воздушных масс.

Fig. 5. Surface pressure field P_0 and position of geopotential H_{500} 's extreme areas (dam) in January: 1985 (a); 2015 (б); 1996 (в); 1997 (г). The area of geopotential H_{500} 's significant negative anomalies is painted green, while areas of the geopotential's positive anomalies are painted pink. Points indicate the surface cyclone centers. Arrows indicate the outflow direction of air masses.

Видно, что в 1985 г. в умеренных районах отмечались значительные отрицательные аномалии H_{500} , ложбина была интенсивна (рис. 5а). Приземные циклоны выходили к югу от Камчатки. В тыловой части циклонов закачивался холодный воздух из полярных районов. В 2015 г. в умеренных и северных районах наблюдались значительные положительные аномалии, циклоны были менее глубокими, в этом случае отмечался восточный вынос (рис. 5б).

Теплая воздушная масса распространялась на Охотское море с океана. В 1996 и 1997 гг. также наблюдался восточный вынос теплых воздушных масс с Тихого океана в передней части циклона (рис. 5в, г). Таким образом, когда ОЦ находится вне Охотского моря, а высотный гребень с Тихого океана располагается в пределах моря, то наблюдается восточный вынос теплых океанических масс в область тропосферной ложбины. В этом случае тихоокеанский гребень выступает в роли блокирующего механизма для продвижения приземных циклонов в северную часть Охотского моря.

Заключение

Показано, что положение минимума геопотенциала H_{500} над центральным районом второго естественно синоптического района определяет распределение воздушных масс и формирование экстремальной температуры воздуха. Коэффициент K показывает степень сжатия эллипса к большой оси, а угол наклона большой оси эллипса определяется x_+, y_+ .

В годы локализации минимума геопотенциала H_{500} над Охотским морем происходит формирование экстремально низкой температуры воздуха в области минимума и связанной с ним глубокой ложбины. В этом случае ось эллипса повернута либо по часовой стрелке (на северо-запад), либо против часовой стрелки (на северо-восток).

Характеристики эллипсов, построенных в окрестностях минимума геопотенциала, вне пределов Охотского моря значительно отличаются от характеристик эллипсов над Охотским морем. Сильное сжатие, определяемое коэффициентом K , отмечается при ослаблении интенсивности дальневосточной ложбины. В этом случае наблюдается вынос теплых океанических воздушных масс в Охотское море.

Механизм формирования экстремально высокой температуры воздуха у земли связан со смещением ОЦ из района Охотского моря либо на континентальные районы восточной Азии, либо в восточную часть центрального района. Вторжение тихоокеанских гребней на Охотское море вызывает смещение ОЦ, а значит, и очага холода из пределов Охотского моря.

Положение минимума H_{500} и характеристики эллипсов в окружности центра могут использоваться при анализе причин резких изменений температуры воздуха и ледообразования в Японском и Охотском морях.

Список литературы

1. Архангельский В.Л. Зимний охотоморский циклон – сезонный центр действия атмосферы // Метеорология и гидрология. 1959. № 4. С. 21-25.
2. Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паришина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в январе 2015 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 107-111.
3. Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паришина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в январе 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 122-126.
4. Богдановская Т.В., Богдановский А.А. Изменчивость положения центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона и их вклад в формирование аномалий температуры воздуха Сахалина // Гидрометеорологические и экологические условия дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду: Темат. вып. ДВНИГМИ, № 3. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 26-33.
5. Василевская Л.Н., Журавлева Т.М., Манько А.Н. Сезонные и многолетние изменения параметров Сибирского антициклона // Труды ДВНИГМИ. 2002. Вып. 150. С. 87-102.
6. Даишко Н.А., Варламов С.М. Оценка изменений характеристик центров действия атмосферы азиатско-тихоокеанского региона в течение 20-го столетия и их влияние на циркуляцию над Японским морем // Труды ДВНИГМИ. 2000. № 3. С. 10-25.
7. Смолянкина Т.В. Многолетняя изменчивость аномалий давления, широты и долготы центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона // Гидрометеорологические процессы на шельфе: оценка воздействия на морскую среду: Темат. вып. ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 10-16.
8. Шатилина Т.А., Анжина Г.И. Особенности атмосферной циркуляции и климата на Дальнем Востоке в начале 21 века // Известия ТИНРО. 2008. Т. 152. С. 225-239.
9. Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Изменчивость режима тропосферной ложбины у Восточного побережья Азии и климатические экстремумы в период 1980–2017 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 102-106.

References

1. Arhangel'skij V.L. Zimnij ohotomorskij ciklon - sezonnyj centr dejstvija atmosfery. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1959, no. 4, pp. 21-25 [in Russ.].
2. Berezhnaja T.V., Golubev A.D., Parshina L.N. Anomal'nye gidrometeorologicheskie javleniya na territorii Rossijskoj Federacii v janvare 2015 g. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2015, no. 4, pp. 107-111 [in Russ.].
3. Berezhnaja T.V., Golubev A.D., Parshina L.N. Anomal'nye gidrometeorologicheskie javleniya na territorii Rossijskoj Federacii v janvare 2019 g. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2019, no. 5, pp. 122-126 [in Russ.].
4. Bogdanovskaja T.V., Bogdanovskij A.A. Izmenchivost' polozheniya centrov dejstvija atmosfery Aziatsko-Tihookeanskogo regiona i ih vklad v formirovanie anomalij temperatury vozduha Sahalina. *Gidrometeorologicheskie i jekologicheskie uslovija dal'nevostochnyh morej: ocenka vozdejstvija na morskiju sredu. Russ. Tematicheskij vypusk DVNIGMI*. Vladivostok: Dal'nauka publ., 2000, no. 3, pp. 26-33 [in Russ.].

5. Vasilevskaja L.N., Zhuravleva T.M., Man'ko A.N. Sezonnye i mnogoletnie izmeneniya parametrov Sibirskogo anticiklona. *Russ. Proceedings of DVNIGMI*, 2002, is. 150, pp. 87-102 [in Russ.].

6. Dashko N.A., Varlamov S.M. Ocenka izmenenij harakteristik centrov dejstviya atmosfery aziatsko-tihookeanskogo regiona v techenie 20-go stoletija i ih vlijanie na cirkuljaciju nad Japonskim morem. *Russ. Proceedings of DVNIGMI*. Vladivostok: Dal'nauka publ., 2000, no. 3, pp. 10-25 [in Russ.].

7. Smoljankina T.V. Mnogoletnjaja izmenchivost' anomalij davlenija, shiroti i dolgoty centrov dejstviya atmosfery Aziatsko-Tihookeanskogo regiona. Gidrometeorologicheskie processy na shel'fe: Ocenka vozdejstviya na morskiju sredu. *Russ. Tematicheskij sbornik. Proceedings of DVNIGMI*. Vladivostok: Dal'nauka publ., 1999, pp. 10-16 [in Russ.].

8. Shatilina T.A., Anzhina G.I. Features of atmospheric and climate in the Far East in the beginning of 21 Century. *Russ. Izv. TINRO*, 2008, vol. 152, pp. 225-239 [in Russ.].

9. Shatilina T.A., Ciciashvili G.Sh., Radchenkova T.V. Variability of the tropospheric col regime at the Eastern Asia coast and climatic extremes in the period 1980-2017. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 2019, no. 8. pp. 102-106 [in Russ.].

Поступила 21.04.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 21.04.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-80-98>

УДК 551.583

Изменения климатических условий Юго-Восточного Забайкалья за период вегетации по метеорологическим и дендрохронологическим данным

И.Л. Вахнина^{1,2}, Е.В. Носкова¹

*¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Чита, Россия;*

*²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
elena-noskova-2011@mail.ru, vahnina_il@mail.ru*

Анализируются климатические характеристики Юго-Восточного Забайкалья с мая по сентябрь (период вегетации), которые определяют накопление биомассы растений и, как следствие, агрометеорологические характеристики территории. Установлено, что за период с 1959 по 2018 год наблюдалось достоверное увеличение приземной температуры в среднем за год и за период вегетации. По значениям аномалий атмосферных осадков для последней завершившейся сухой фазы цикла (1999–2011 гг.) отмечается их увеличение по сравнению с предшествующей (1963–1982 гг.). С 2012 г. по настоящее время фиксируется фаза повышенного увлажнения. Древесно-кольцевые хронологии, построенные по деревьям, произрастающим в Юго-Восточном Забайкалье, могут быть использованы для реконструкции параметров тепло- и влагообеспеченности территории и анализа климатических изменений за период, значительно превышающий ряды метеонаблюдений (до 500 лет).

Ключевые слова: температура воздуха, атмосферные осадки, индексы засухливости и увлажнения, дендрохронология, радиальный прирост

Changes in climatic conditions in southeastern Transbaikalia during the growing season according to meteorological and dendrochronological data

I.L. Vakhnina^{1,2}, E.V. Noskova¹

*¹Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia;*

*²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
elena-noskova-2011@mail.ru, vahnina_il@mail.ru*

Climatic characteristics of southeastern Transbaikalia from May to September (the growing season), that determine the accumulation of plant biomass and, hence, agro-meteorological characteristics of the territory, are analyzed. The study showed that from 1959 to 2018, there was a significant increase in air temperature values on average for the year and for the growing season. According to the values of precipitation anomalies for the last completed dry phase of the cycle (1999–2011), their increase in comparison

with the previous one (1963–1982) is noted. From 2012 till now, a phase of increased moisture has been recorded. The tree-ring chronologies constructed from trees growing in southeastern Transbaikalia can be used to reconstruct the parameters of heat and moisture supply of the territory and to analyze climatic changes over a period significantly exceeding the series of meteorological observations (up to 500 years).

Keywords: air temperature, precipitation, drought and moisture indices, dendrochronology, radial growth

Введение

Оценка и прогнозирование климата возможны на основе знаний о долгопериодных колебаниях метеопараметров и детальном анализе их современных тенденций. В условиях текущих климатических изменений [24, 32 и др.] это приобретает особую актуальность. Учитывая, что в большинстве случаев ряды наблюдений метеостанций позволяют оценить климат не более чем за последние 100 лет, для продления данных необходимо привлечение дополнительных источников информации. В качестве надежных косвенных источников, отражающих динамику параметров среды за продолжительные периоды времени (до нескольких тысяч лет), применяются древесно-кольцевые хронологии [2, 8, 11, 13–16, 21, 31].

Территория исследования – Юго-Восточное Забайкалье – представлена степной и лесостепной природными зонами, наиболее населена и освоена в хозяйственном отношении [28]. Перепад высот над уровнем моря здесь колеблется в пределах 600–900 м. Климат резко континентальный с выраженной цикличностью в чередовании гумидных и аридных фаз, основная часть годовой суммы атмосферных осадков выпадает в теплое время года [22]. Период вегетации продолжается с мая по сентябрь [25]. Преобладающим фактором, лимитирующим развитие растительности Юго-Восточного Забайкалья, является режим увлажнения [8].

Исследуемая территория характеризуется увеличением приземной температуры воздуха [23–25, 30]. Данная тенденция проявляется во всех регионах Российской Федерации. Это приводит к ряду социально-эколого-экономических проблем [1, 12, 19, 29, 33]. В Восточном Забайкалье до конца 1980-х гг. рост среднегодовых температур был по большей части обусловлен потеплением в зимний период года, а с 1990-х годов – в теплый [25].

Большинство работ, посвященных климатическому отклику в рядах радиальных приростов и реконструкции климата с помощью древесно-кольцевых хронологий, выполнены для территорий, где рост растительности лимитируется приземной температурой воздуха (таежные и лесотундровые зоны, верхняя граница леса и т. п.) [14–16, 21, 31 и др.]. Для степной и лесостепной зон дендроклиматический анализ затруднен в связи с тем, что здесь на размеры годичных колец совместное влияние оказывает ряд параметров, характеризующих гидротермический режим

территории, и выделение одного из них представляется достаточно трудоемким. К тому же для аридных и семиаридных условий на территории России древесно-кольцевые хронологии более 200–300 лет практически отсутствуют, что связано как с возрастными особенностями деревьев, продолжительность жизни которых здесь не превышает 200–250 лет, так и отсутствием исторических деревянных построек ранее 1700 года и плохой сохранностью древесины в археологических раскопках.

В связи с этим создание длительных хронологий, чувствительных к флуктуациям параметров, характеризующих гидротермические условия степного и лесостепного поясов, имеет особенно важное значение.

Целью данной работы является анализ климатических условий и оценка возможности использования динамики радиального прироста деревьев для выявления долговременных климатических изменений на территории Юго-Восточного Забайкалья.

В рамках данной цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить оценку метеорологических показателей тепло- и влагообеспеченности территории (приземная температура воздуха, атмосферные осадки, индексы засушливости и увлажнения, продолжительность периода вегетации, сумма активных температур воздуха);

- проанализировать отклик радиального прироста на климатические параметры с помощью корреляционных зависимостей Пирсона и возможность проведения реконструкции метеопараметров и индексов засушливости и увлажнения.

Материалы и методы исследования

Анализ климатических характеристик и расчет индекса засушливости Д.А. Педя (SI) и гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова (ГТК) [10, 27] выполнены на основе использования суточных и среднемесячных данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [3–5] по шести опорным метеорологическим станциям Юго-Восточного Забайкалья за 60-летний период (1959–2018 гг.). Три из этих метеостанций (Мангут, Кыра и Борзя) расположены в степной природной зоне и три (Чита, Агинское, Нерчинский-Завод) – в лесостепной (рис. 1). Индекс SI был определен по формуле: $SI = \Delta T / \sigma T - \Delta R / \sigma R$, где ΔT (ΔR) – отклонения от нормы средней месячной температуры воздуха (месячной суммы осадков); σT (σR) – их среднеквадратичные отклонения. ГТК рассчитан по уравнению $ГТК = 10R / \sum t$, где R – сумма осадков (мм) за период со средней суточной температурой воздуха выше 10 °С и $\sum t$ – сумма среднесуточных температур за тот же период.

Суммы активных температур воздуха выражены суммами средних суточных температур воздуха выше 10 °С. Даты устойчивых переходов температуры воздуха через 5 и 10 °С определены в соответствии с Методическими указаниями [20]. Аномалии атмосферных осадков

и температуры воздуха рассчитаны как отклонения от среднего значения за базовый период 1981–2010 гг. [9]. Линейные тренды многолетних изменений определены методом наименьших квадратов, их статистическая значимость оценивалась при помощи t-статистики Стьюдента.

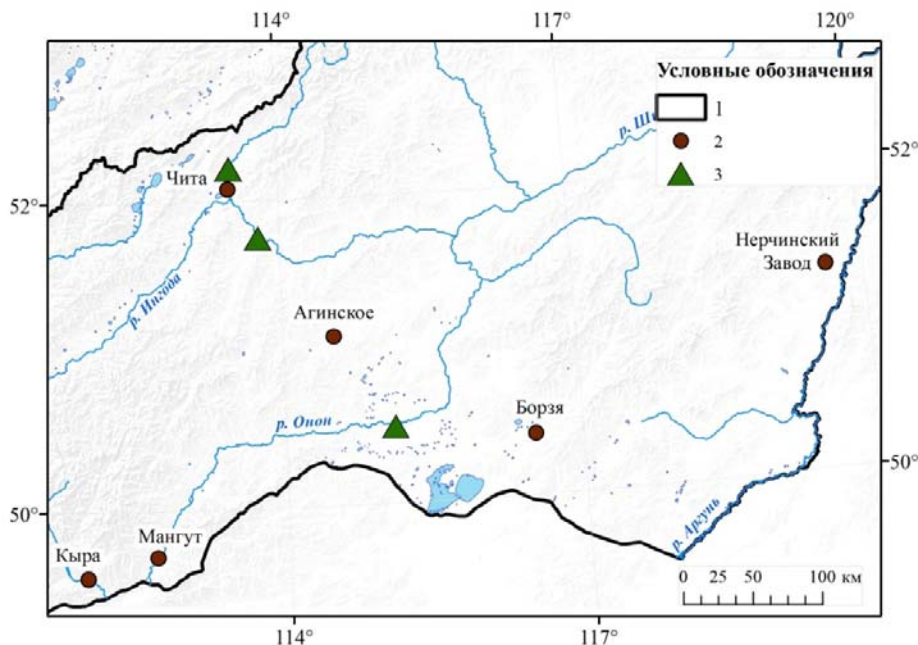


Рис. 1. Месторасположение метеорологических станций и участков отбора дендрохронологического материала на территории Юго-Восточного Забайкалья (1 – граница Забайкальского края; 2 – метеорологические станции; 3 – участки отбора древесных кернов с произрастающих деревьев и построек).

Fig. 1. Location of meteorological stations and sampling sites for dendrochronological material on the territory of South-Eastern Transbaikalia (1 – the border of the Trans-Baikal Territory; 2 – meteorological stations; 3 – sites for sampling wood cores from growing trees and buildings).

Для оценки отклика радиального прироста на метеопараметры использована обобщенная стандартная 571-летняя древесно-кольцевая хронология по ширине годовичных колец, охватывающая период с 1447 по 2017 год. (рис. 2) [34]. В основу построения хронологии легли 122 буровых керна ствола деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающие на двух участках в степной и лесостепной зонах Юго-Восточного Забайкалья, а также керны с деревянных сооружений XVIII–XX вв., материал для которых заготавливался в пределах исследуемой территории. Статистические показатели хронологии свидетельствуют о ее пригодности для выполнения дендроклиматического отклика и целей

реконструкции с 1550 г. Дендроклиматический анализ выполнен с использованием коэффициентов корреляции Пирсона между стандартизированной древесно-кольцевой хронологией и метеопараметрами и расчетными индексами засушливости и увлажнения, усредненными по территории Юго-Восточного Забайкалья.

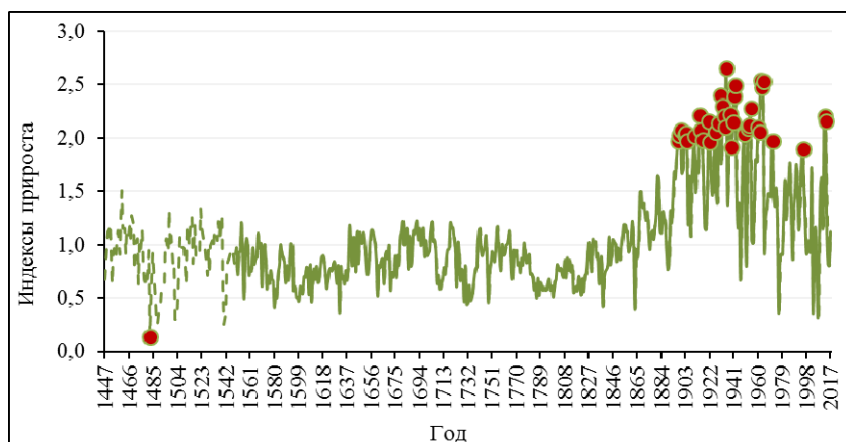


Рис. 2. Обобщенная стандартная древесно-кольцевая хронология по ширине годичных колец сосны обыкновенной для территории Юго-Восточного Забайкалья (жирной линией обозначен период, на котором хронология может использоваться для целей реконструкции климатических условий; красными точками выделены годы с экстремальными значениями индексов ширины годичных колец, выходящими за два стандартных отклонения).

Fig. 2. Generalized standard tree-ring chronology according to the width of the annual rings of Scots pine for the territory of Southeastern Transbaikalia (the bold line indicates the period in which the chronology can be used for the reconstruction of climatic conditions; the red dots mark the years with extreme values of the indexes of the width of annual rings emerging for two standard deviations).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты работы показали, что среднегодовая температура воздуха на территории Юго-Восточного Забайкалья по данным исследуемых метеостанций отрицательная (табл. 1). За 60 лет ее амплитуда составляет от 3,6 °C в Кыре до 4,5 °C в Чите. При этом самым холодным на большинстве метеостанций был 1969 г. и только в Агинском – 1974 г., самыми теплыми по разным метеостанциям – 2006, 2007 и 2015 гг. В среднем на исследуемой территории выпадает около 350 мм атмосферных осадков в год. За 1959–2018 гг. годовые суммы атмосферных осадков в среднем по метеостанциям колебались от 209 мм (2004 г.) до 516 мм (1988 г.).

В соответствии со значениями ГТК в среднем на территории исследования за период исследования отмечается повышенная влагообеспеченность (ГТК=1,42), при этом на двух станциях (Кыра и Нерчинский

Завод) она избыточная ($1,51 \leq \text{ГТК} < 2,00$), на остальных – достаточная ($1,11 \leq \text{ГТК} < 1,40$). Значения SI здесь говорят о нормальных условиях увлажнения ($\text{SI} = 0,00$). Стоит отметить, что за 60-летний период только с начала 2000-х отмечались годы, когда средние значения SI соответствовали слабой ($1 < \text{SI} \leq 2$) (2000, 2001, 2002, 2004, 2010, 2015 и 2016 гг.) и средней ($3 > \text{SI} > 2$) (2007 г.) засухе. В этот же период по значениям ГТК 2004 и 2007 гг. характеризовались как годы со средней засухой ($0,41 \leq \text{ГТК} < 0,60$), а 2000, 2001, 2002, 2006, 2010, 2015 и 2016 гг. – с недостаточными условиями увлажнения ($0,76 \leq \text{ГТК} < 1,10$). За предшествующие годы только в 1972 и 1992 гг. по значениям ГТК увлажнение было недостаточным.

Таблица 1. Климатическая характеристика Юго-Восточного Забайкалья по данным опорных метеорологических станций с 1959 по 2018 г.

Table 1. Climatic characteristics of South-Eastern Transbaikalia according to the data of reference meteorological stations from 1959 to 2018

Станция	Температура воздуха, °C	Атмосферные осадки, мм	ГТК	SI	Сумма активных температур, °C	Продолжительность устойчивого периода с различной температурой воздуха, дни	
						5 °C	10 °C
Агинское	$\frac{-1,2}{13,7}$	$\frac{345}{303}$	1,40	0	1852	152	116
Борзя	$\frac{-1,9}{14,4}$	$\frac{298}{263}$	1,14	0	1975	156	121
Кыра	$\frac{-0,7}{13,4}$	$\frac{368}{331}$	1,58	0	1825	156	118
Мангут	$\frac{-0,2}{14,1}$	$\frac{338}{305}$	1,39	0	1920	159	121
Нерчинский Завод	$\frac{-2,4}{13,8}$	$\frac{428}{362}$	1,64	0	1871	155	118
Чита	$\frac{-1,8}{13,7}$	$\frac{343}{304}$	1,38	0	1845	150	115
Среднее	$\frac{-1,4}{13,9}$	$\frac{354}{304}$	1,42	0	1881	155	118

Примечание. В числителе указано годовое значение, в знаменателе – за период вегетации.

Оценка внутригодового хода температуры воздуха (рис. 3) показывает, что самыми холодными месяцами в году являются январь и декабрь, когда она опускается до $-24,1^\circ\text{C}$ и $-21,4^\circ\text{C}$ соответственно, а самым теплым – июль. Средняя температура июля за 1959–2018 гг. составила $18,5^\circ\text{C}$.

Средняя температура воздуха по всем метеостанциям за вегетационный период колеблется около 14°C . Суммы активных температур воздуха

находятся в пределах 2000 °С. Устойчивый переход температуры воздуха весной через 5 °С и 10 °С в среднем происходит в третьей декаде апреля на большинстве метеостанций и второй декаде мая соответственно. Осенью переход через 5 °С в Борзе, Кыре и Мангуте отмечается в первой декаде октября, на остальных станциях – в третьей декаде сентября; через 10 °С – во второй декаде сентября. Таким образом, продолжительность устойчивого периода с температурой воздуха выше 5 °С в Юго-Восточном Забайкалье в среднем за исследуемый период составляет 155 дней, выше 10 °С – около 120 дней. За период вегетации атмосферных осадков на территории выпадает около 300 мм (см. табл. 1), что составляет около 90 % от их годовой суммы. При этом более 50 % их количества приходится на июль-август (см. рис. 3).

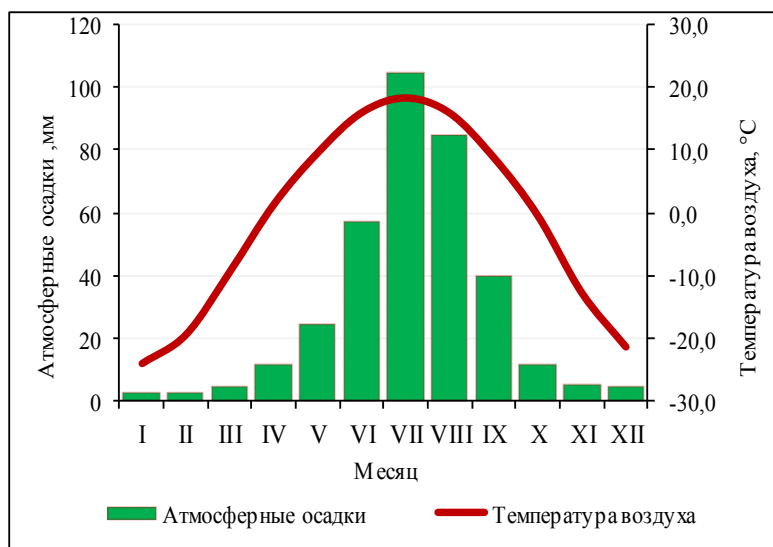


Рис. 3. Годовой ход месячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков, усредненных по территории Юго-Восточного Забайкалья, за 1959–2018 гг.

Fig. 3. Annual variation of monthly values of air temperature and atmospheric precipitation, averaged over the territory of South-Eastern Transbaikalia, for 1959–2018.

Межгодовые изменения температуры воздуха за последние 60 лет (1959–2018 гг.) между метеостанциями происходят с высокой степенью согласованности: коэффициенты корреляции между рядами данных варьируются в пределах достоверных значений от 0,79 до 0,96 ($|r_{\text{крит}}| = 0,25$ при $p < 0,05$). Значения коэффициентов между усредненными температурами воздуха за май–сентябрь по разным станциям близки к годовым (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции температуры воздуха и атмосферных осадков за период вегетации между опорными метеорологическими станциями на территории Юго-Восточного Забайкалья с 1959 по 2018 г.

Table 2. Coefficients of correlation between air temperatures and precipitation during the growing season of reference meteorological stations in the territory of South-Eastern Transbaikalia from 1959 to 2018

Станции	Агинское	Борзя	Кыра	Мангут	Нерчинский Завод
Борзя	$\frac{0,96}{0,38}$				
Кыра	$\frac{0,93}{0,58}$	$\frac{0,93}{0,54}$			
Мангут	$\frac{0,94}{0,57}$	$\frac{0,95}{0,49}$	$\frac{0,98}{0,79}$		
Нерчинский Завод	$\frac{0,91}{0,46}$	$\frac{0,91}{0,54}$	$\frac{0,86}{0,39}$	$\frac{0,87}{0,39}$	
Чита	$\frac{0,94}{0,68}$	$\frac{0,92}{0,32}$	$\frac{0,92}{0,53}$	$\frac{0,94}{0,42}$	$\frac{0,87}{0,29}$

Примечание. В числителе указан коэффициент корреляции между температурами воздуха, в знаменателе – между атмосферными осадками.

Колебания атмосферных осадков менее согласованы между собой, чем температуры воздуха. Тем не менее значения коэффициентов корреляции между суммами атмосферных осадков разных метеостанций за период вегетации достоверны и варьируют от 0,29 до 0,79.

Достоверные значения коэффициентов корреляции рассматриваемых характеристик между исследуемыми станциями свидетельствуют об однородном климатическом поле, что позволяет усреднить данные по территории Юго-Восточного Забайкалья.

Анализ отклонений приземной температуры воздуха от климатической нормы (рис. 4) показывает, что за последние 30 лет значительно увеличилось число их положительных значений.

В среднем за 1959–2018 гг. рост среднегодовой температуры воздуха, который характерен для всех исследуемых метеостанций [24], составляет 0,29 °C/10 лет. Наименьший рост температуры воздуха зафиксирован в Агинском (0,20 °C/10 лет), наибольший – в Чите (0,47 °C/10 лет). За период вегетации изменения аналогичны. Соответственно отмечается и увеличение сумм активных температур воздуха [23], которое за 60 лет составило 25 % от их среднего значения. Рост длительности устойчивых периодов с температурами воздуха выше 5 и 10 °C составил 11 и 19 % от среднего значения за 60 лет, при этом весной их наступление стало происходить раньше, осенью – позже.

Современное увеличение среднегодовой температуры воздуха на исследуемой территории началось в 70-х гг. прошлого столетия (рис. 5). Однако в последнее десятилетие отмечается замедление ее роста, как и

в целом по территории Сибири [18], что связывают с климатическими изменениями в Северной Атлантике и Тихом океане, вариациями солнечной активности и пр. [17].

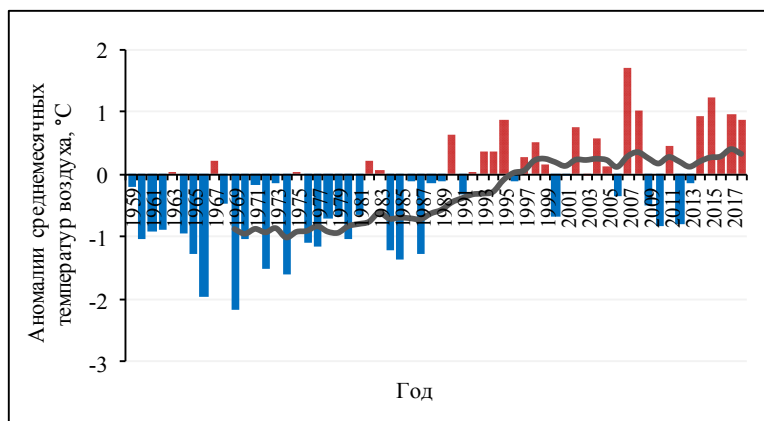


Рис. 4. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха (°C), усредненные по территории Юго-Восточного Забайкалья, за 1959-2018 гг. (линией показана сглаженная кривая, полученная 11-летним скользящим осреднением).

Fig. 4. Average annual anomalies of surface air temperature (°C), averaged over the territory of South-Eastern Transbaikalia, for 1959-2018 (the line shows the smoothed curve obtained by the 11-year moving average).

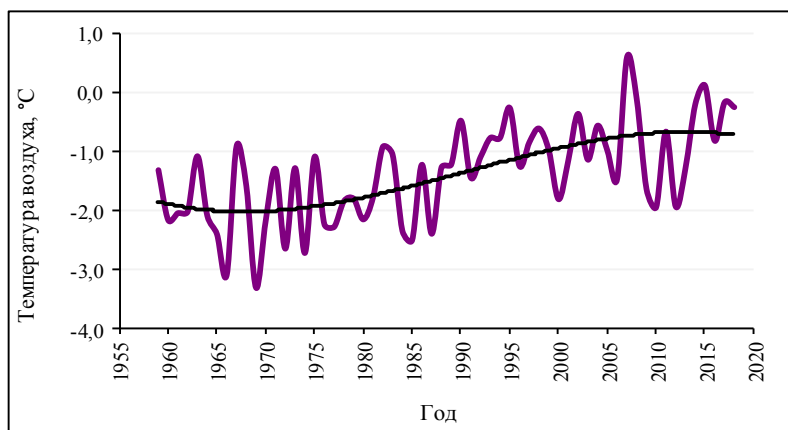


Рис. 5. Межгодовые изменения среднегодовой температуры воздуха, усредненной по территории Юго-Восточного Забайкалья, за 1959-2018 гг. (черной линией показан полиномиальный тренд 3-й степени).

Fig. 5. Interannual changes in the mean annual air temperature, averaged over the territory of Southeastern Transbaikalia, for 1959-2018 (the black line shows the polynomial trend of the 3rd degree).

В режиме выпадения атмосферных осадков на территории исследования отмечается цикличность: за 1959–2018 гг. выделяется две полных аридных фазы (1963–1982, 1999–2011 гг.) и одна гумидная (1983–1998 гг.). При этом для последней завершившейся сухой фазы по сравнению с предшествующей характерно увеличение значений отрицательных аномалий атмосферных осадков (рис. 6). В настоящее время отмечается фаза повышенного увлажнения. В условиях проявляющейся цикличности выделение трендов в режиме выпадения атмосферных осадков представляется некорректным.

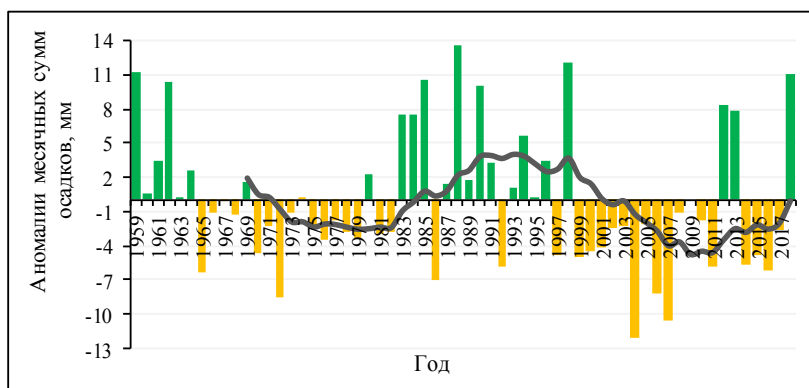


Рис. 6. Среднегодовые аномалии атмосферных осадков, усредненных по территории Юго-Восточного Забайкалья, за 1959–2018 гг. (линией показана сглаженная кривая, полученная 11-летним скользящим усреднением).

Fig. 6. Average annual anomalies of atmospheric precipitation, averaged over the territory of South-Eastern Transbaikalia, for 1959–2018 (the line shows the smoothed curve obtained by the 11-year moving average).

Дендроклиматический анализ дает возможность оценить вклад различных климатических характеристик в формирование годичных колец и на основе этой информации проследить динамику климата на исследуемой территории за период, значительно превышающий инструментальные ряды метеорологических наблюдений.

Коэффициенты корреляции между обобщенной стандартной древесно-кольцевой хронологией по Юго-Восточному Забайкалью и усредненными по шести исследуемым станциям метеопараметрами и расчетными индексами за текущий период вегетации за 1959–2017 гг. (табл. 3) свидетельствуют о значимом влиянии условий тепло- и влагообеспеченности территории на формирование годичных колец деревьев. При этом наибольшее воздействие на радиальный прирост деревьев на исследуемой территории оказывают атмосферные осадки. Ранее [8] было показано, что периодичность в полосе частот, выявленная в динамике ширины годичных колец деревьев на исследуемой территории и близкая к 30-летним

ритмам, согласуется с цикличностью в режиме выпадения атмосферных осадков по Юго-Восточному Забайкалью.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между обобщенной стандартной древесно-кольцевой хронологией и усредненными метеопараметрами и расчетными индексами по территории Юго-Восточного Забайкалья за 1959–2017 гг.

Table 3. Correlation coefficients between the generalized standardized tree-ring chronology and averaged meteorological parameters and calculated indices for the territory of South-Eastern Transbaikalia for 1959–2017

Период	Атмосферные осадки	Температура воздуха	ГТК	SI
V	0,30	-0,02	0,05	-0,22
VI	0,31	-0,22	0,22	-0,32
VII	0,30	-0,37	0,31	-0,41
VIII	0,29	-0,14	0,23	-0,24
IX	0,22	-0,30	0,03	-0,34
V-VI	0,41	-0,17	0,22	-0,39
V-VII	0,48	-0,28	0,36	-0,46
V-VIII	0,49	-0,27	0,40	-0,45
V-IX	0,52	-0,32	0,32	-0,49
VI-VII	0,39	-0,34	0,35	-0,43
VI-VIII	0,43	-0,31	0,40	-0,42
VI-IX	0,46	-0,35	0,37	-0,46
VII-VIII	0,38	-0,31	0,38	-0,39
VII-IX	0,42	-0,35	0,33	-0,44
VIII-IX	0,37	-0,26	0,23	-0,35

Примечание. Полу жирным начертанием выделены коэффициенты, статистически значимые при $p < 0,05$ ($|r_{\text{крит}}| = 0,25$).

Значимые положительные корреляционные связи получены между индексами прироста и суммами осадков за каждый месяц периода вегетации, кроме сентября (от $r = 0,29$ в августе до $r = 0,31$ в июне), а также их накопительными суммами с максимальными значениями коэффициентов корреляции за май–сентябрь ($r = 0,52$). Наиболее тесные связи получены со средней температурой в июле ($r = -0,37$). Температура воздуха оказывает негативное воздействие на ширину годичного кольца, что в большей степени проявляется для второй половины сезона вегетации. Совместное влияние атмосферных осадков и температуры воздуха определяет режим засушливости и увлажнения территории, который сказывается на процессах формирования годичных колец на исследуемой территории. Это и проявляется в значимых связях приростов с ГТК и SI. Наибольшие значения коэффициентов корреляции получены между индексами стандартной хронологии и значениями индекса засушливости Д.А. Педя, несколько меньшие — значениями гидротермического коэффициента

Г.Т. Селянинова. Учитывая достоверные коэффициенты между приростом с атмосферными осадками и температурой воздуха в июле, логично, что для этого месяца выявлены значимые связи для обоих расчетных параметров. Для всех накопительных периодов выявлены статистически значимые коэффициенты. Наибольшие их величины получены для ГТК ($r = 0,40$) за май–август и июнь–август, для SI – за период вегетации ($r = -0,49$). Таким образом, динамика ширины годичных колец в целом более чувствительна к засушливости территории, описываемой индексом Д.А. Педя, чем к ее увлажнению, характеризуемому гидротермическим коэффициентом Г.Т. Селянинова. Данные результаты согласуются с выводами, полученными ранее для более коротких хронологий, построенных по деревьям, произрастающим на территории Юго-Восточного Забайкалья [6–8].

Оценка динамики ширины годичных колец за 571-летний период, охваченный древесно-кольцевой хронологией, показала, что в последние 100–150 лет отмечается увеличение амплитуды колебаний их значений. В этот период выявляется значительное количество лет, когда приросты выходят за пределы двух стандартных отклонений (см. рис. 2). Данные экстремумы являются следствием влияния погодных условий. Годы, в которые фиксируется максимальное количество годичных колец, выпадающих у разных деревьев, соответствуют наиболее засушливым по SI и ГТК (2003, 2007 и 2016 гг.).

Полученные результаты свидетельствует о потенциале территории Юго-Восточного Забайкалья для проведения дендрохронологических исследований и возможности построения на их основе высокоточных палеоклиматических реконструкций.

Таким образом, используемые в работе метеорологические параметры и расчетные индексы могут быть реконструированы по обобщенной стандартной древесно-кольцевой хронологии по ширине годичных колец сосны обыкновенной для территории Юго-Восточного Забайкалья за период с 1550 года. Анализ погодных условий в годы, когда формировались экстремальные радиальные приросты, позволит исследовать механизмы формирования засух.

Заключение

Анализ климатических условий на территории Юго-Восточного Забайкалья за 1959–2018 гг. свидетельствует о достоверном увеличении значений температуры воздуха в среднем за год и за период вегетации. Тенденции, отмечаемые в их межгодовом ходе в последние десятилетия, сохраняются. По значениям аномалий атмосферных осадков для последней завершившейся сухой фазы цикла (1999–2011 гг.) отмечается их увеличение по сравнению с предшествующей (1963–1982 гг.). С 2012 г. по настоящее время на территории исследования отмечается фаза повышенного увлажнения.

Проведенные исследования показывают, что тенденция роста приземной температуры воздуха сохранится, а количество атмосферных осадков будет повышенным еще на протяжении нескольких лет.

Впервые для исследуемой территории выполнен анализ взаимосвязей длительной древесно-кольцевой хронологии с метеопараметрами и расчетными индексами, который говорит о потенциале Юго-Восточного Забайкалья для проведения дендрохронологических исследований и возможности построения на их основе высокоточных палеоклиматических реконструкций. Значимые связи индексов прироста годовых колец с условиями тепло- и влагообеспеченности территории свидетельствуют о возможности использования динамики радиального прироста для реконструкции климатических характеристик с 1550 года.

Климатические показатели по территории Юго-Восточного Забайкалья рассчитывались в рамках государственного задания по теме «Механизмы обеспечения экономической устойчивости и экологической безопасности в новой модели развития регионов Востока РФ в условиях трансграничных отношений и глобальных вызовов 21 в.» (№ гос. регистрации 121032200126-6), дендроклиматический анализ осуществлен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-14-00028).

Climatic indicators for the territory of the steppe and forest-steppe zones of Eastern Transbaikalia were calculated within the framework of the state assignment on the topic "Mechanisms for ensuring economic sustainability and environmental security in a new model of development of regions of the East of the Russian Federation in the context of cross-border relations and global challenges of the 21st century" (State registration No. 121032200126-6)., Dendroclimatic analysis was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project no 19-14-00028).

Список литературы

1. Балыбина А.С., Трофимова И.Е. Динамика температуры почвы на территории Забайкалья в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 109-116.
2. Баринов В.В., Мыглан В.С., Назаров А.Н., Ваганов Е.А., Агатова А.Р., Непон Р.К. Экстремальные климатические события в Республике Алтай по дендрохронологическим данным // Известия Российской Академии наук. Серия биологическая. 2016. № 2. С. 188-198.
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ): Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>.
4. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Кориунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство

о государственной регистрации базы данных № 2015620394. <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных>.

5. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>.

6. Вахнина И.Л. Анализ динамики ширины годовых колец сосны обыкновенной в условиях Восточного Забайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2011. Т. 4, № 3. С. 13-17.

7. Вахнина И.Л. Радиальный прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зеленой зоне города Читы во второй половине прошлого столетия // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 180-182.

8. Вахнина И.Л., Обязов В.А., Замана Л.В. Динамика увлажнения в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья с начала XIX столетия по кернам сосны обыкновенной // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 2. С. 28-33.

9. ВМО-№ 1203. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. 2017. 32 с.

10. Галимова Р.Г., Переведенцев Ю.П., Яманаев Г.А. Агроклиматические ресурсы республики Башкортостан // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2019. № 3. С. 29-39.

11. Глызин А.В., Размахнина Т.Б., Корсунов В.М. Дендрохронологические исследования в контактной зоне «лес-степь» как источник информации о ее динамике // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12, № 1. С. 79-83.

12. Голятина М.А., Вахнина И.Л., Носкова Е.В. Оценка динамики площадей, пройденных пожарами, на территории Забайкальского края в условиях изменения климата по данным ДЗЗ // Географический вестник = Geographical bulletin. 2018. № 3 (46). С. 126-135. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-3-126-135.

13. Даценко Н.М. Особенности воспроизведения крупномасштабных климатических колебаний дендрохронологическими рядами // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2005. № 4. С. 27-34.

14. Даценко Н.М., Сонечкин Д.М. Реконструкция синхронных вековых колебаний на Западе и Востоке Северного полушария за последние 2000 лет и их связь с солнечной активностью // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2009. № 4. С. 40-48.

15. Даценко Н.М., Иващенко Н.Н., Кин Ч., Лиу Дж., Сонечкин Д.М., Янг Б. Сравнение средневекового и современного потеплений климата по данным о годовичном приросте можжевельника Пржевальского // Метеорология и гидрология. 2014. № 1. С. 31-37.

16. Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н., Ротомеева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800-2005 гг.) по дендрохронологическим данным // Лед и снег. 2013. Т. 53, № 1. С. 34-42.

17. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И. Изменчивость климата Азиатской территории России в 1975-2012 годах // География и природные ресурсы. 2014. № 4. С. 13-21.

18. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В., Ильин С.Н. Изменения климатов пограничного слоя атмосферы Сибири в период глобального потепления. Часть 1. Аномалии и тренды температуры воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 11. С. 942-950.

19. *Медведков А.А.* Адаптация к климатическим изменениям: глобальный эколого-экономический тренд и его значение для России // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2018. № 4. С. 11-19. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19.

20. Методические указания по составлению «Научно-прикладного справочника по агроклиматическим ресурсам СССР». Л.: Гидрометеиздат, 1986. 148 с.

21. *Мыглан В.С., Ойдунаа О.Ч., Ваганов Е.А.* Построение 2367-летней древесно-кольцевой хронологии для Алтае-Саянского региона (горный массив Мон-гун-Тайга) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2012. № 3(51). С. 76-83.

22. *Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Курганович К.А.* Характеристика условий увлажненности территории бессточных озер Торейской равнины с использованием метеорологических данных // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 3. С. 22-30.

23. *Носкова Е.В., Вахнина И.Л., Рахманова Н.В.* Суммы активных температур воздуха (выше 10 °С) на территории Забайкальского края // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 148-153. DOI: 10.17513/use.

24. *Носкова Е.В., Обязов В.А., Вахнина И.Л.* Изменения приземной температуры воздуха на юге Сибири и их взаимосвязь с крупномасштабными циркуляционными процессами в атмосфере // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2 (57). С. 75-84. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-75-84.

25. *Обязов В.А.* Адаптация к изменениям климата: региональный подход // География и природные ресурсы. 2010. № 2. С. 34-39.

26. *Обязов В.А.* Региональный отклик приземной температуры воздуха на глобальные изменения (на примере Забайкалья) // Доклады академии наук. 2015. Том 461, № 4. С. 459-462.

27. *Обязов В.А., Носкова Е.В.* Многолетние изменения агроклиматических ресурсов Забайкалья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 8 (123). С. 20-29.

28. *Помазкова Н.В., Фалейчик Л.М.* Динамика структуры землепользования в Забайкальском крае // Вестник ИрГСХА. 2020. № 101. С. 59-69. DOI 10.51215/1999-3765-2020-101-59-69.

29. *Редникова Т.В.* Меры адаптации к климатическим изменениям: совершенствование экологического законодательства Российской Федерации в свете присоединения к Парижскому соглашению по климату // Союз криминалистов и кримиологов. 2020. № 4. С. 122-127. DOI: 10.31085/2310-8681-2020-4-208-122-127.

30. *Смахтин В.К.* Оценка изменений температуры воздуха и осадков на территории Забайкалья // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 138-146. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-138-146.

31. *Соломина О., Джакоби Г., Дарриго Р., Браунинг А., Еременко Н., Муравьев Я.* Реконструкции летних температур на Камчатке и на острове Кунашир по дендрохронологическим данным за последние 400 лет // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2005. Т. 20. С. 37-58.

32. *Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Каверина Е.С., Сумерова К.А., Куликова И.А., Круглова Е.Н.* О результатах восемнадцатой сессии Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-18) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 141-152. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-2-141-152.

33. Чугункова А.В., Пыжжев А.И., Пыжжева Ю.И. Влияние глобального изменения климата на экономику лесного и сельского хозяйства: риски и возможности // Актуальные проблемы экономики и права. 2018. Т. 12, № 3. С. 523-537. DOI: 10.21202/1993-047X.12.2018.3.523-537.

34. Vakhnina I.L., Taynik F.B., Sidorova M.O., Noskova E.V. Construction of a long (571-year) precepitation sensitive tree-ring chronology for the steppe zone of Transbaikalia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019. Vol. 19, is. 3.2. P. 739-744. DOI: 10.5593/sgem2019/3.2/S14.095/.

References

Balybina A.S., Trofimova I.Ye. Dinamika temperatury pochvy na territorii Zabaykal'ya v usloviyakh izmeneniya klimata [Dynamics of soil temperature on the territory of Transbaikalia under conditions of climate change]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 10, pp. 712-717. DOI: 10.3103/S1068373919100108 [in Russ.].

2. Barinov V.V., Myglan V.S., Nazarov A.N., Vaganov Ye.A., Agatova A.R., Nepop R.K. Extreme climatic events in the Altai Republic according to dendrochronological data. *Biology Bulletin*, 2016, vol. 43, no. 2, pp. 152-161. DOI: 10.1134/S1062359016020023.

3. Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Aleksandrova T.M. Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR) [Description of the data set of monthly precipitation totals at Russian stations. Certificate of state registration of the database No. 2015620394]. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#opisaniye-massiva-dannykh> [in Russ.].

4. Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Opisaniye massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii [Description of the data array of average monthly air temperature at Russian stations. Certificate of state registration of the database No. 2015620394]. <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#opisaniye-massiva-dannykh> [in Russ.].

5. Bulygina O.N., Razuvayev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Opisaniye massiva dannykh srednemesyachnoy temperatury vozdukha na stantsiyakh Rossii [Description of the data array of the average monthly air temperature at Russian stations. Certificate of state registration of the database no 2014621485]. <http://meteo.ru/data/156-temperature#opisaniye-massiva-dannykh> [in Russ.].

6. Vakhnina I.L. Analiz dinamiki shiriny godichnykh kolets sosny obyknovennoy v usloviyakh Vostochnogo Zabaykal'ya [Analysis of the dynamics of the width of the annual rings of Scots pine in the conditions of Eastern Transbaikalia]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 13-17 [in Russ.].

7. Vakhnina I.L. Radial'nyy prirost sosny obyknovennoy (*Pinus sylvestris* L.) v zelenoy zone goroda Chity vo vtoroy polovine proshlogo stoletiya [adial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the green zone of the city of Chita in the second half of the last century]. *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and Natural Resources], 2011, no. 1, pp. 180-182 [in Russ.].

8. Vakhnina I.L., Obyazov V.A., Zamana L.V. Dinamika uvlazhneniya v stepnoy zone Yugo-Vostochnogo Zabaykal'ya s nachala XIX stoletiya po kernam sosny obyknovennoy [Dynamics of humldification in the steppe zone of southeastern

Transbaikalia since the beginning of the 19th century evidenced by the cores of scots pine]. *Steel in translation*, 2018, no. 2, pp. 28-33 [in Russ.].

9. *WMO-No. 1203*. WMO Guidelines for the Calculation of Climate Norms. Geneva, 2017, 32 p.

10. *Galimova R.G., Perevedentsev YU.P., Yamanayev G.A.* Agroklimaticheskiye resursy respubliki Bashkortostan [Agroclimatic resources of the Republic of Bashkortostan]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 29-39 [in Russ.].

11. *Glyzin A.V., Razmakhnina T.B., Korsunov V.M.* Dendrokronologicheskiye issledovaniya v kontaktной zone «les-step'» kak istochnik informatsii o yeye dinamike [Dendrochronological studies in the contact zone "forest-steppe" as a source of information about its dynamics]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2005, vol. 12, no. 1, pp. 79-83 [in Russ.].

12. *Golyatina M.A., Vakhnina I.L., Noskova Ye.V.* Otsenka dinamiki ploshchadey, proydennykh pozharami, na territorii Zabaykal'skogo kraya v usloviyakh izmeneniya klimata po dannym DZZ [Assessment of the dynamics of areas covered by fires on the territory of the Trans-Baikal Territory under conditions of climate change according to remote sensing data]. *Geograficheskiy vestnik [Geographical bulletin]*, 2018, vol. 46, no. 3, pp. 126-135. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-3-126-135 [in Russ.].

13. *Datsenko N.M.* Osobennosti vosproizvedeniya krupnomasshtabnykh klimaticheskikh kolebaniy dendrokronologicheskimi ryadami [Features of reproduction of large-scale climatic fluctuations by dendrochronological series]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2005, no. 4, pp. 27-34 [in Russ.].

14. *Datsenko N.M., Sonechkin D.M.* Rekonstruktsiya sinkhronnykh vekovykh kolebaniy na Zapade i Vostoke Severnogo polushariya za posledniye 2000 let i ikh svyaz's solnechnoy aktivnost'yu [Reconstruction of synchronous secular oscillations in the West and East of the Northern Hemisphere over the past 2000 years and their relationship with solar activity]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2009, no. 4, pp. 40-48 [in Russ.].

15. *Datsenko N.M., Ivashchenko N.N., Kin CH., Liu Dzh., Sonechkin D.M., Yang B.* Comparison of medieval and modern climate warming according to the data on the annual growth of Przhevalsky juniper. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 17-21. DOI: 10.3103/S1068373914010038.

16. *Dolgova Ye.A., Matskovskiy V.V., Solomina O.N., Rototayeva O.V., Nosenko G.A., Khmelevskoy I.F.* Rekonstruktsiya balansa massy lednika Garabashi (1800-2005 gg.) po dendrokronologicheskim dannym [Reconstruction of the mass balance of the Garabashi glacier (1800-2005) based on dendrochronological data]. *Led i sneg*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 34-42 [in Russ.].

17. *Ippolitov I.I., Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Moraru E.I.* Izmenchivost' klimata Aziatskoy territorii Rossii v 1975-2012 godakh [Climate variability of the Asian territory of Russia in 1975-2012]. *Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and Natural Resources]*, 2014, no. 4, pp. 13-21 [in Russ.].

18. *Komarov V.S., Lomakina N.YA., Lavrinenko A.V., Il'in S.N.* Izmeneniya klimatov pogranichnogo sloya atmosfery Sibiri v period global'nogo potepleniya. Chast' 1. Anomalii i trendy temperatury vozdukha [Changes in climates of the boundary layer of the atmosphere of Siberia during the period of global warming. Part 1. Anomalies and trends in air temperature]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2010, vol. 23, no. 11, pp. 942-950 [in Russ.].

19. Medvedkov A.A. Adaptatsiya k klimaticheskim izmeneniyam: global'nyy ekologo-ekonomicheskiy trend i yego znachenie dlya Rossii [Adaptation to climate change: a global ecological and economic trend and its significance for Russia]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki*, 2018, no. 4, pp. 11-19. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19 [in Russ.].

20. Metodicheskiye ukazaniya po sostavleniyu "Nauchno-prikladnogo spravochnika po agroklimaticheskim resursam SSSR" [Guidelines for the compilation of the "Scientific and applied reference book on the agroclimatic resources of the USSR"]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 148 p. [in Russ.].

21. Myglan V.S., Oydupaa O.CH., Vaganov Ye.A. Postroyeniye 2 367-letney drevesno-kol'tsevoy khronologii dlya Altaye-Sayanskogo regiona (gornyy massiv Mongun-Tayga) [onstruction of 2 367-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (Mongun-Taiga mountain range)]. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii*, 2012, no. 3(51), pp. 76-83 [in Russ.].

22. Noskova E.V., Vakhnina I.L., Kurganovich K.A. Kharakteristika usloviy uvla-zhnennosti territorii besstochnykh ozer Toreyskoy ravniny s ispol'zovaniyem meteorologicheskikh dannykh [Characteristics of the moisture conditions of the territory of the closed lakes of the Torey Plain using meteorological data]. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikal State University], 2019, vol. 25, no 3, pp. 22-30 [in Russ.].

23. Noskova Ye.V., Vakhnina I.L., Rakhmanova N.V. Summy aktivnykh temperatur vozdukha (vyshe 10 °S) na territorii Zabaykal'skogo kraya [The sums of active air temperatures (above 10 °C) on the territory of the Trans-Baikal Territory]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2019, no. 11, pp. 148-153. DOI: 10.17513/use [in Russ.].

24. Noskova Ye.V., Obyazov V.A., Vakhnina I.L. Izmeneniya prizemnoy temperatury vozdukha na yuge Sibiri i ikh vzaimosvyaz's krupnomasshtabnymi tsirkulyatsionnymi protsessami v atmosfere [Variations in the surface air temperature in the south of Siberia and their relationship with large-scale circulation processes in the atmosphere.]. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical bulletin], 2021, vol. 57, no. 2, pp. 75-84. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-2-75-84 [in Russ.].

25. Obyazov V.A. Adaptatsiya k izmeneniyam klimata: regional'nyy podkhod [Adaptation to climate change: a regional approach]. *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and Natural Resources], 2010, no. 2, pp. 34-39 [in Russ.].

26. Obyazov V.A. Regional'nyy otklik prizemnoy temperatury vozdukha na global'nyye izmeneniya (na primere Zabaykal'ya) [Regional response of surface air temperature to global changes (on the example of Transbaikalia)]. *Doklady akademii nauk*, 2015, vol. 461, no. 4, pp. 459-462 [in Russ.].

27. Obyazov V.A., Noskova Ye.V. Mnogoletniye izmeneniya agroklimaticheskikh resursov Zabaykal'ya [Long-term changes in the agroclimatic resources of Transbaikalia]. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 8 (123), pp. 20-29 [in Russ.].

28. Pomazkova N.V., Faleychik L.M. Dinamika struktury zemlepol'zovaniya v Zabaykal'skom kraye [Dynamics of the structure of land use in the Trans-Baikal Territory]. *Vestnik IrGSKHA*, 2020, no. 101, pp. 59-69. DOI 10.51215/1999-3765-2020-101-59-69 [in Russ.].

29. Rednikova T.V. Mery adaptatsii k klimaticheskim izmeneniyam: sovershenstvovaniye ekologicheskogo zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii v svete prisoyedineniya k Parizhskomu soglasheniyu po klimatu [Measures to adapt to climate

change: improving the environmental legislation of the Russian Federation in the light of joining the Paris Agreement on climate]. *Soyuz kriminalistov i kriminologov*, 2020, no. 4, pp. 122-127. DOI: 10.31085/2310-8681-2020-4-208-122-127 [in Russ.].

30. Smakhtin V.K. Assessment of changes in air temperature and precipitation in Transbaikalia. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2021, vol. 380, no 2, pp. 138-146. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-138-146 [in Russ.].

31. Solomina O., Dzhakobi G., Darrigo R., Brauning A., Yeremenko N., Murav'yev YA. Rekonstruktsii letnikh temperatur na Kamchatke i na ostrove Kunashir po dendrokronologicheskim dannym za posledniye 400 let [econstruction of summer temperatures in Kamchatka and on Kunashir Island using dendrochronological data for the last 400 years]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2005, vol. 20, pp. 37-58 [in Russ.].

32. Khan V.M., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A., Kaverina Ye.S., Sumerova K.A., Kulikova I.A., Kruglova Ye.N. On the results of the eighteenth session of the North Eurasian Climate Forum (SEACOF-18). *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2020, vol. 376, no. 2, pp. 141-152. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-2-141-152 [in Russ.].

33. Chugunkova A.V., Pyzhev A.I., Pyzheva Yu.I. Vliyaniye global'nogo izmeneniya klimata na ekonomiku lesnogo i sel'skogo khozyaystva: riski i vozmozhnosti [The impact of global climate change on the economy of forestry and agriculture: risks and opportunities]. *Aktual'nyye problemy ekonomiki i prava*, 2018, vol. 12, no 3, pp. 523-537. DOI: 10.21202/1993-047X.12.2018.3.523-537 [in Russ.].

34. Vakhnina I.L., Taynik F.B., Sidorova M.O., Noskova E.V. Construction of a long (571-year) precepitation sensitive tree-ring chronology for the steppe zone of Transbaikalia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2019, vol. 19, no. 3.2, pp. 739-744. DOI: 10.5593/sgem2019/3.2/S14.095/.

Поступила 25.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 25.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-99-114>

УДК 551.467.3(265.53)

Исследование изменений климатических норм в долгосрочном прогнозе ледовитости Охотского моря

Г.И. Анжина, А.Н. Вразжкин

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия
anzhinagi@mail.ru*

Отмечено сходство в динамике и количественное различие режима ледовитости за четыре последовательных 30-летних периода: 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг. Наибольшие отличия наблюдаются в режимных характеристиках первого и последнего периодов. Абсолютный максимум или минимум, зафиксированный хотя бы в одном из месяцев с января по май, определяет характер ледовитости всего ледового сезона. Исследована чувствительность прогностической физико-статистической модели к изменениям климатических норм. Получены оценки качества прогнозов среднемесячной ледовитости.

Ключевые слова: базисный период, долгосрочный прогноз, физико-статистическая модель, ледовитость, режимные характеристики, типизация, оценки качества прогноза

Studying changes in climate normal in long-term forecasting of the Sea of Okhotsk ice cover

G.I. Anzhina, A.N. Vrazhkin

*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute,
Vladivostok, Russia
anzhinagi@mail.ru*

There is a similarity in dynamics and a quantitative difference in the ice cover regime in four consecutive 30-year periods: 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 are noted. The greatest differences are observed in the regime characteristics of the first and the last periods. The absolute maximum or minimum recorded in at least one of the months from January to May determines the nature of the ice cover of the entire ice season. The sensitivity of the predictive physical-statistical model to the replacement of climatic norms has been investigated. Estimates of the quality of forecasts of the average monthly ice cover are obtained.

Keywords: base period, long-term forecast, physical and statistical model, ice cover, climate characteristics, typification, forecast skill scores

Введение

В климатологии при рассмотрении аномалий какого-либо параметра указывается период, на котором была рассчитана «норма». Всемирная метеорологическая организация (ВМО) рекомендует на практике рассчитывать климатологические стандартные нормы (КСН) [12] как средние данные за ближайший к текущему времени 30-летний базисный период (БП), который завершается годом с последней цифрой 0. За временной промежуток 1961–2020 гг. может быть сформировано четыре базисных периода: 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг.

Период с 1961 по 1990 г. используется как стандартный опорный период для долгосрочной оценки изменений климата. В Руководящих указаниях ВМО [12] отмечается, что эффективность прогнозирования изменений климатических норм будет выше, если они обновляются чаще. Например, период осреднения с 1981 по 2010 г. будет с большей вероятностью репрезентативным для современных условий, чем период с 1961 по 1990 год. Это же утверждение подтверждается Г.В. Грузой и Э.Я. Раньковой [5] на примере расчета оценок базовых климатических характеристик среднемесячной температуры приземного воздуха на территории России. На основе анализа данных авторы обосновывают необходимость учета наблюдаемых изменений климата как в методологии прогнозирования, так и при оценке качества прогнозов. Предлагается использовать «динамические климатические нормы», которые уже не содержат ни межсезонных, ни текущих многолетних трендов (изменений климата).

В настоящее время в ФГБУ «ДВНИГМИ» в оперативном режиме осуществляется долгосрочный прогноз ледовитости и кромки льда в акваториях дальневосточных морей с заблаговременностью 7 и более месяцев [1–4]. Методы прогнозирования этих ледовых параметров основаны на использовании физико-статистической модели. При ее создании периодом для получения стандартных статистических параметров (ССП), включающих КСН и среднееквадратическое отклонение от нормы (σ), послужило 30-летие 1971–2000 годов.

Сформированные к настоящему времени архивы данных позволяют в соответствии с алгоритмом построения методов (наличием независимой выборки при генерировании ансамбля прогнозов) использовать для расчетов СПП базисный период 1981–2010 гг. Однако прежде следует оценить, насколько при переходе от одного базисного периода к другому могут изменяться результаты расчетов по действующей прогностической модели. Необходимость оценки возникла потому, что значения аномалий используются не только при анализе выходной продукции, но в самой модели при выявлении информативных предикторов в полях гидрометеопараметров [7].

Предварительно в данном исследовании на примере расчета статистических характеристик средней месячной ледовитости Охотского моря

за месяцы с наиболее устойчивым ледяным покровом (с декабря по май) были рассмотрены особенности режимов ледовых условий в упомянутых выше базисных периодах. Помимо этого, была оценена успешность применения ССП каждого из четырех базисных периодов в прикладных целях (при типизации и климатологическом прогнозе).

Ранее [8] был выполнен анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря, вычисленных относительно стандартного опорного периода. Для проведения исследования авторы подготовили уникальный ряд значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2015 г. с использованием различных источников информации: судовой (1929–1960 гг.), авиационной (1957–1992 гг.), спутниковой (1971–2015 гг.). Установлено, что точность расчета ледовитости по судовым и авиационным наблюдениям и по авиационным и спутниковым наблюдениям вполне сопоставима и в среднем не превышает 1–2 % площади моря. Данные по ледовитости Охотского моря за период с 1882 по 1928 г. реконструированы и квалифицируются как качественные. Анализ многолетних изменений проводился для сезонных значений ледовитости, рассчитанных «усреднением месячных значений площадей ледяного массива с декабря по май».

Исходя из представленного разделения ряда по источникам получения информации, наши данные относятся к этапам авиационных и спутниковых. Их описание можно найти в [16]. Хотя количественного сопоставления рядов ледовитости не проводилось, но можно предположить, что тенденция в многолетних изменениях этого параметра должна сохраняться. Поэтому при обсуждении результатов данного исследования, относящихся к режиму ледовитости Охотского моря, мы будем обращаться для сравнения к материалам [8].

Материалы и методы

Существующие в нашем распоряжении архивные данные позволили рассмотреть режимные характеристики ледовитости Охотского моря (выраженной в процентах от площади акватории) в четырех рекомендованных ВМО базисных периодах (БХХ): Б61, Б71, Б81, Б91. В принятых сокращениях ХХ обозначают последние две цифры года начала базисного периода. Также при анализе использовался 60-летний период с 1961 по 2020 г. (А60), объединяющий эти БП. На временном ряду А60 определены абсолютный максимум ($A_{\max}$) и абсолютный минимум ($A_{\min}$) ледовитости в Охотском море.

На упомянутых данных по каждому месяцу ледового сезона были проведены расчеты ССП, коэффициентов вариации (c_v), рассчитанных как отношение среднеквадратического отклонения к климатологической стандартной норме, выраженное в процентах, а также определено максимальное и минимальное значения ледовитости.

Для сравнения успешности применения ССП базисных периодов при климатологическом прогнозе и типизации была использована 10-летняя

проверочная выборка ледовитости (сезоны 2010/2011 – 2019/2020 гг.). Для методических прогнозов средней месячной ледовитости выбран временной период 2011/2012 – 2019/2020 гг.

Показателями успешности методических, а также климатологических прогнозов послужили оправдываемость ($P\%$) и абсолютная ошибка (δ), вычисляемая как абсолютная разность прогностического и фактического значений ледовитости. Оценка проводилась по критериям, представленным в Наставлении [11] и Методических указаниях [10].

Особенности режима ледовитости Охотского моря за период 1961–2020 гг.

В [8] представлен график многолетнего изменения сезонной ледовитости Охотского моря. На нем выделены периоды роста с 1958 по 1980 г. и дальнейшего уменьшения значений сезонной ледовитости до 2015 года. Аналогичная тенденция отмечается на графике интегральной кривой аномалий ледовитости Охотского моря, вычисленных относительно климатической нормы 1961–1990 гг., и в сглаженном по 24 годам многолетнем ходе аномалий ледовитости Охотского моря.

Интегральные кривые отклонений среднегодовых значений сезонной площади льда Охотского моря, представленные в [15], также демонстрируют периоды аномального увеличения и уменьшения площади льда в Охотском море. Преобладание зим с суровыми условиями отмечалось с 1958 г. до середины 80-х годов. С 1984 по 2014 г. в Охотском море отмечалось уменьшение площади ледяного покрова как в период формирования тяжелых льдов (с середины января), так и в период их активного разрушения (с апреля до середины мая). Исходя из этого, можно априори предположить, что между вариантами Б61 и Б81 (Б91) будут отмечаться значительные различия: большая часть Б61 попадает на период увеличения ледовитости, а Б81 (Б91) – на период уменьшения ледовитости. Б71 является промежуточным, поэтому будет иметь как черты Б61, так и Б81 (Б91). В [8] также отмечается, что нормы ледовитости, рассчитанные по усредненным за сезон данным для Б71 и Б81, существенно отличаются от норм для Б61.

В настоящей работе проведено количественное сравнение динамики ледовитости для базисных периодов по каждому месяцу ледового сезона (с декабря по май), обращая особое внимание на Б71 и Б81. В качестве характеристик ледовых условий в Охотском море рассматривались распределения: климатологической стандартной нормы, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации, максимальных и минимальных значений ледовитости (рис. 1). В дальнейшем для этих величин используются принятые выше обозначения.

В месяцы с января по май прослеживается четкая тенденция к уменьшению КСН от Б61 к Б81 (Б91) (рис. 1а). Разница между нормами Б61 и Б81 изменяется от 5,0 % в январе до 9,0 % в апреле, а отличия КСН

Б61 и Б91 еще больше, до 12,6 % в апреле. Только в декабре климатологическая стандартная норма Б61 на 0,6 % меньше Б81. Для Б71 нормы в месяцы сезона занимают промежуточные значения между Б61 и Б81. Наибольшие значения КСН для базисных периодов отмечаются в марте (с максимумом для Б61), а минимальные – в мае для Б71, Б81 и Б91. Для Б61 минимальные значения ледовитости наблюдаются в декабре.

Для σ (рис. 1б) такой четкой тенденции не отмечается, однако некоторая особенность проявляется в повышенной изменчивости Б71 в первой половине сезона по сравнению с Б61, Б81 и Б91. Также с декабря по февраль величина σ Б81 превышает Б91.

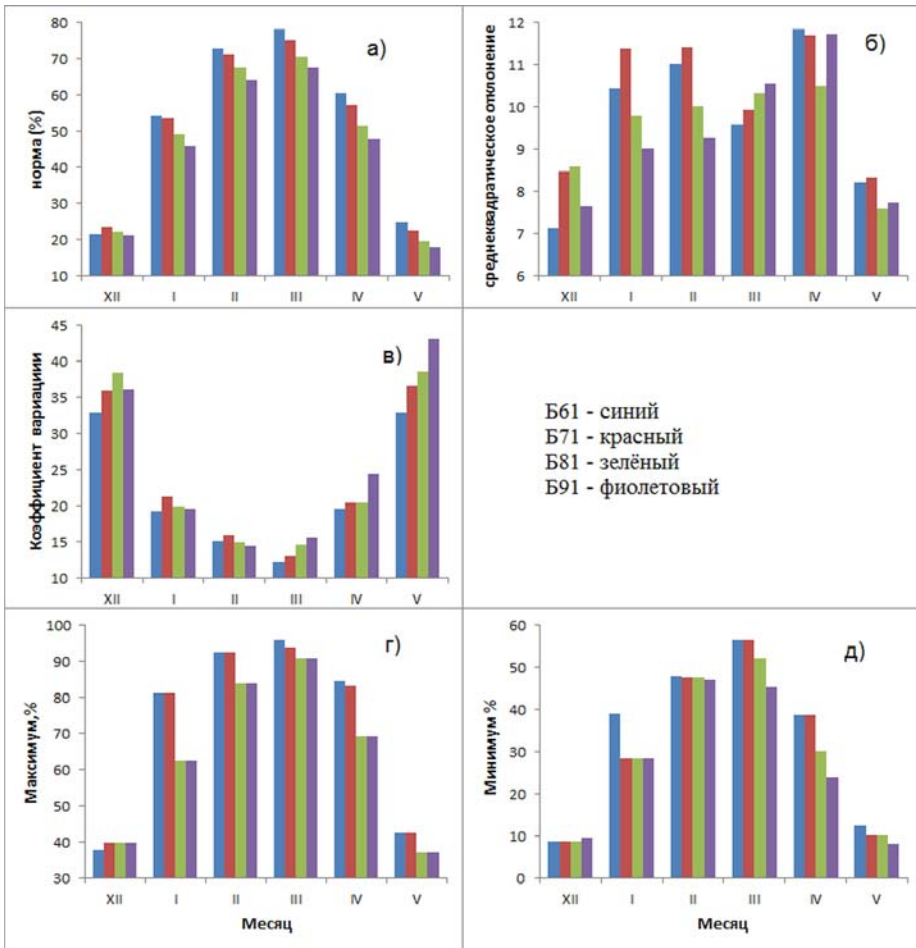


Рис. 1. Распределение климатологических стандартных норм (а), σ (б), c_v (в), максимальной (г) и минимальной (д) ледовитости в Охотском море.

Fig. 1. Distribution of climatological standard norms (a), σ (б), c_v (в), maximum (г) and minimum (д) ice cover in the Sea of Okhotsk.

Степень рассеивания значений коэффициента вариации (рис. 1в) в начале и конце ледового периода (декабрь, май) в четырех выборках (Б61, Б71, Б81, Б91) является самой большой. В другие месяцы c_v изменяется от 12 до 25 %, т. е. КСН действительно характеризуют данные выделенных базисных периодов. В Б81 отмечается более заметный разброс отклонений от среднего, чем в выборке Б61 во всех месяцах ледового сезона. Выборка Б71 более вариабельна, чем Б81 и Б91 в январе и феврале.

В месяцы с января по май максимальная ледовитость (рис. 1г) принимает наименьшие значения в Б81 и Б91. Максимум Б71 несколько меньше в марте и апреле, чем в период Б61, а в январе, феврале и мае – на одном уровне. В декабре максимум в Б61 меньше, чем в других базисных периодах.

Внутри сезона величина минимальной ледовитости (рис. 1д) в целом уменьшается от Б61 к Б91, что наиболее ярко проявилось в январе и второй половине ледового сезона.

На периоде 1961–2020 гг. были выявлены исторические экстремумы значений ледовитости по каждому месяцу. Зафиксированные абсолютные максимумы ($A_{\max}$) ледовитости приходятся на годы, отмеченные как период положительной аномалии, а абсолютные минимумы ($A_{\min}$) – как период отрицательной аномалии ледовитости по данным [8] и [15].

В табл. 1 указаны годы, в которые на 60-летнем периоде зафиксированы экстремальные значения ледовитости и приведена величина аномалии, рассчитанная в долях σ для Б61, Б71, Б81 и Б91 в каждом месяце ледового сезона.

Таблица 1. Годы экстремальной ледовитости Охотского моря и ее аномалии (в долях σ) за 1961–2020 гг. по четырем базисным периодам

Table 1. Years of extreme ice cover of the Sea of Okhotsk and its anomalies (in fractions of σ) for 1961–2020 by four base periods

Месяц	Год $A_{\max}$	Базисный период				Год $A_{\min}$	Базисный период			
		Б61	Б71	Б81	Б91		Б61	Б71	Б81	Б91
XII	1998	–	1,9	2,4	2,4	1988	-1,8	-1,7	-1,6	-
I	1979	2,6	2,4	–	–	1996	–	-2,2	-2,1	-1,9
II	1978	1,8	1,9	–	–	2015	–	–	–	-1,8
III	1967	1,8	–	–	–	2015	–	–	–	-2,1
IV	1967	2,0	–	–	–	2017	–	–	–	-2,1
V	1980	2,2	2,4	–	–	2019	–	–	–	-1,3

Если проанализировать распределение $A_{\max}$ и $A_{\min}$ в рассматриваемые базисные периоды, можно отметить, что в Б61 во все месяцы, кроме декабря, наблюдается максимум ледовитости при аномалиях от 1,8 σ

до $2,6 \sigma$, тогда как в Б81 и Б91 $A_{\max}$ отмечается только в декабре (аномалия $2,4 \sigma$). Во все другие месяцы значения ледовитости не достигают $A_{\max}$. Противоположная картина отмечается при анализе распределения $A_{\min}$. За период Б61 $A_{\min}$ наблюдался только в декабре (для Б71 и Б81 еще и в январе), а в Б91 – во все месяцы сезона, кроме декабря, т. е. последнее десятилетие оказалось самым малоледовитым. При этом отрицательные аномалии по величине несколько меньше, чем положительные аномалии. В Б71 в марте и апреле значения ледовитости Охотского моря не достигли ни $A_{\max}$, ни $A_{\min}$. Характер распределения экстремальных значений по месяцам для Б71 имеет большее сходство с Б61 в области максимальных величин и с Б81 – в области минимальных значений.

Отметим еще такой факт: в течение ледового сезона только в 1967 г. встречался абсолютный максимум ледовитости последовательно в двух месяцах (март и апрель), абсолютный минимум – в 2015 г. (февраль и март). Во всех остальных случаях экстремальное значение наблюдалось по каждому месяцу в разные годы.

Обратимся к [8], где приведены годы с пятью типами зим, определенными по суровости ледовых условий в Охотском море. Критерий типизации рассчитывался по формуле, основанной на амплитуде ледовитости и количестве выделяемых типов зим [9]. Напомним, типизация осуществлялась по усредненным за весь ледовый сезон значениям ледовитости. Тем не менее годы с абсолютными значениями ледовитости для месяцев ледового сезона с января по май, представленные в табл. 1, попали в типы экстремально суровых и экстремально мягких зим. Однако в случае, когда экстремальное значение ледовитости отмечалось только в начале ледового сезона, такого совпадения не обнаружилось. Так, декабрь 1998 г. с большой ледовитостью вошел в тип мягких зим, а малоледовитый декабрь 1988 г. вошел в класс умеренных зим.

Типизация ледовитости Охотского моря на периоде 2011–2020 гг.

Оценим, как использование статистических параметров, рассчитанных для различных базисных периодов, может отразиться при типизации (классификации) явлений или процессов. Для этого была проведена классификация ледовитости Охотского моря способом, предложенным для типизации ледовых условий по характеру их сезонных (ноябрь–апрель) изменений в Баренцевом море [14]. При делении на группы в качестве критериев были приняты доли стандартного отклонения площади, занятой льдом (σ), за выбранный период. Аномалия ледовитости (anL) рассчитывалась как разность значения ледовитости и средней многолетней за месяц. Критерием крупной аномалии послужило значение $1,2 \sigma$, предложенное В.А. Спичкиным [13]. Выделено 5 групп: экстремально легкая (эл), когда $anL \leq -1,2 \sigma$; легкая (л) при $-1,2 \sigma < anL < -0,4 \sigma$; средняя (ср), когда $-0,4 \sigma \leq anL \leq 0,4 \sigma$; тяжелая (т), если $0,4 \sigma < anL < 1,2 \sigma$; экстремально тяжелая (эт), если $anL \geq 1,2 \sigma$.

По стандартным статистическим характеристикам, рассчитанным для каждого из четырех базисных периодов, используя вышеприведенные правила, получено распределение по группам ледовых условий в Охотском море для шести месяцев ледового сезона. Расчеты проводились на данных проверочной выборки за 2011–2020 гг. (всего по 60 случаям для каждого базисного периода). Количество месяцев экстремально легкой и легкой ледовитости от Б61 к Б91 уменьшается, а со средней и тяжелой ледовитостью – возрастает. Ни одного месяца с экстремально тяжелой ледовитостью за последние 10 лет не наблюдалось. Более детально рассмотрим распределение ледовых условий по группам за каждый месяц и год проверочной выборки (табл. 2).

Таблица 2. Распределение групп ледовых условий в Охотском море за период 2011–2020 гг., полученным по четырем базисным периодам

Table 2. Distribution of groups of ice conditions in the Sea of Okhotsk for the period 2011-2020, obtained for four base periods

Месяц	Период	Годы									
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
XII	Б61	л	т	л	эл	ср	л	ср	ср	л	л
	Б71	эл	т	л	эл	л	л	ср	ср	л	л
	Б81	л	т	л	эл	ср	л	ср	ср	л	л
	Б91	л	т	л	эл	ср	л	ср	ср	ср	л
I	Б61	эл	л	л	эл	эл	л	л	л	л	л
	Б71	эл	ср	ср	эл	эл	л	л	л	л	л
	Б81	эл	ср	ср	л	л	л	ср	л	л	ср
	Б91	эл	ср	ср	л	л	ср	ср	ср	ср	ср
II	Б61	эл	л	л	л	эл	л	эл	эл	л	л
	Б71	л	л	л	л	эл	л	л	эл	ср	ср
	Б81	л	ср	ср	ср	эл	ср	л	л	ср	ср
	Б91	л	ср	ср	ср	эл	ср	л	л	ср	ср
III	Б61	эл	ср	л	л	эл	л	эл	л	ср	л
	Б71	л	ср	л	л	эл	ср	эл	л	ср	л
	Б81	л	т	ср	ср	эл	ср	эл	ср	т	ср
	Б91	ср	т	ср	ср	эл	т	эл	ср	т	ср
IV	Б61	л	ср	эл	эл	эл	л	эл	л	эл	эл
	Б71	ср	ср	эл	эл	эл	л	эл	л	эл	эл
	Б81	ср	т	л	эл	эл	ср	эл	л	л	эл
	Б91	т	т	л	л	л	ср	эл	ср	л	л
V	Б61	л	ср	л	эл	л	л	эл	эл	эл	эл
	Б71	л	т	ср	эл	л	л	эл	эл	эл	эл
	Б81	ср	т	ср	эл	ср	л	эл	эл	эл	л
	Б91	ср	т	ср	эл	ср	ср	эл	л	эл	л

Разделение ледовых условий на группы с декабря по май для Б61 и Б91 в 43 случаях отличается, а в 17 – совпадает. При этом для января–мая совпадение по четырем базисным периодам одновременно происходит в случаях экстремально легкой и легкой ледовитости, а в декабре – еще и в случае средней ледовитости и тяжелой ледовитости (сезон 2011/2012 гг.). Группы, выделенные по Б71, в преобладающем большинстве (47) случаев совпадают с группами, определенными по Б61, в 36 случаях – с Б81 и в 23 случаях – Б91. Совпадение групп ледовитости, выделенных по стандартным статистическим параметрам Б81 и Б91, составляет 47 случаев. В декабре группы, выявленные по всем базисным периодам, совпадают одновременно в семи годах, а в другие месяцы – только от 1 до 3 лет (в мае).

Обратимся еще раз к типизации зим по суровости ледовых условий в Охотском море [8], осуществленной по нормам Б61. Годы 2011, 2014, 2015, входящие в рассматриваемую 10-летнюю выборку, отнесены к типу экстремально мягких зим. Усреднив за 6 месяцев ледового сезона аномалии ледовитости, выраженные в долях σ , можно с большой степенью вероятности оценить ледовые условия года. По рассчитанным таким образом величинам аномалий по Б61 упомянутые годы следует отнести к годам экстремально легкой ледовитости: аномалии $-1,2 \sigma$ (2011 г.), $-1,5 \sigma$ (2014 г.), $-1,7 \sigma$ (2015 г.). При оценке по группам, сформированным по Б81, только в 2015 г. наблюдались экстремально легкие (средняя аномалия составила $-1,2 \sigma$) ледовые условия, а в 2011 и 2014 гг. ледовые условия в Охотском море были легкими (средние аномалии $-0,7 \sigma$ и $-1,0 \sigma$ соответственно). По аномалиям Б91 ледовые условия для этих лет можно отнести к легким: $-0,5 \sigma$ (2011 г.), $-0,8 \sigma$ (2014 г.), $-1,0 \sigma$ (2015 г.).

Таким образом, при интерпретации события, отнесенного к тому или иному классу, обязательно следует учитывать базисный период, на котором классификация осуществлялась.

Стоит отметить, что за последнее десятилетие с февраля по май изменился абсолютный минимум ледовитости Охотского моря. Так, абсолютный минимум ледовитости 2015 г. в феврале уменьшился на 0,4 %, а в марте – на 6,8 %. В апреле уменьшение $A_{\min}$ произошло на 6,5 % в 2017 г., а в мае 2019 г. – на 2 %. Абсолютный максимум ледовитости, определенный за A_{60} , в этот период не наблюдался. Максимальная ледовитость за десятилетие была меньше по сравнению с $A_{\max}$ от 10,2 % (декабрь 2011 г.) до 31,6 % (январь 2013 г.).

Оценки качества климатологических прогнозов на выборке 2011–2020 гг.

В практике прогнозирования ледовитости иногда будущие ледовые условия определяются на основании климатологических прогнозов. Качество таких прогнозов оценим на контрольной выборке 2011–2020 гг. Это период вне временных рядов, на которых рассчитаны нормы для Б61, Б71,

Б81, но включает десятилетие для Б91. Поэтому больший акцент при сравнении делаем на особенностях Б81. За прогностические принимались значения КСН, рассчитанные по каждому из базисных периодов.

По каждому году и месяцу 10-летней выборки были вычислены оценки прогнозов (δ и $P\%$). Оправдываемость определялась по величине σ , рассчитанного для каждого базисного периода. Предположим, что прогноз осуществляется с заблаговременностью более 6 месяцев. В этом случае прогноз считается оправдавшимся, если δ не превосходит σ . Значения δ и $P\%$, осредненные за ледовый сезон, приведены в табл. 3.

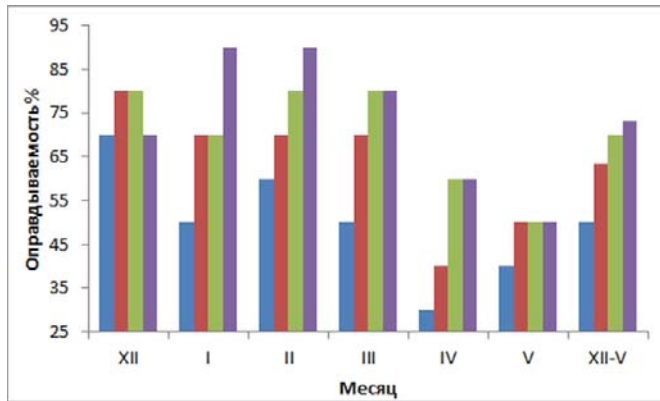
Таблица 3. Абсолютная ошибка и оправдываемость климатологических прогнозов ледовитости, осредненные за ледовый сезон, по четырем базисным периодам

Table 3. Absolute error and accuracy of climatological forecasts of ice cover, averaged over the ice season, for four base periods

Период	Годы										Среднее
	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016	2016/ 2017	2017/ 2018	2018/ 2019	2019/ 2020	
Абсолютная ошибка											
Б61	11,9	3,5	8,3	14,7	17,7	8	17,4	11,7	8,9	11	11,3
Б71	10,5	4,2	6,9	13,3	16,2	6,6	15,6	9,6	8,2	9,5	10,1
Б81	7,5	5,5	3,3	9,4	12,4	3,6	11,9	6,2	6,2	5,7	7,2
Б91	6,1	7,8	3,3	7,4	9,9	3	10	3,9	5,6	4,9	6,2
Оправдываемость (%)											
Б61	33,3	83,3	83,3	16,7	33,3	66,7	33,3	16,7	66,7	66,7	50
Б71	33,3	100	83,3	33,3	33,3	100	33,3	66,7	66,7	66,7	61,7
Б81	66,7	100	100	33,3	33,3	100	50	66,7	83,3	66,7	70
Б91	66,7	50	100	50	66,7	100	50	83,3	83,3	83,3	73,3

Прогнозы с использованием норм Б81 по 9 годам оказались значительно успешнее прогнозов, чем по Б61, как по δ , так и по $P\%$, а также качественнее прогнозов по Б71 по величине δ . Только в ледовом сезоне 2012 г. абсолютная ошибка климатологического прогноза по нормам Б81 немногим превысила ошибки других прогнозов (при ледовитости, близкой к нормальной). Аналогичные оценки получены по Б91. При сравнении оправдываемости климатологических прогнозов по годам, отмеченной режимной особенностью не наблюдается, хотя прогнозы по Б61 в 7 годах менее успешны, чем по Б81, а в двух случаях (2015, 2020 гг.) находятся на одном уровне. Значения оправдываемости прогнозов, осуществленных по КСН Б71, в среднем за десятилетие оказались больше в сравнении с $P\%$ прогнозов по нормам Б61, но меньше, чем $P\%$ по КСН Б81 и Б91.

Оправдываемость прогнозов ледовитости, осредненная за десятилетний период по каждому месяцу ледового сезона, представлена на рис. 2 и также свидетельствует о преимуществе климатологических прогнозов по Б81 в сравнении с Б61. Наибольшая разность $P\%$ наблюдается в марте и апреле. Оправдываемость климатологических прогнозов на периоде Б71 или меньше Б81 (с февраля по апрель), или на одном уровне (декабрь, январь и май). На периоде Б91 $P\%$ в январе, феврале и в среднем за сезон самая высокая, только в декабре – на уровне Б61.



Б61 — синий; Б71 — красный; Б81 — зеленый; Б91 — фиолетовый

Рис. 2. Распределение средней за десятилетие оправдываемости климатологических прогнозов ледовитости в Охотском море.

Fig. 2. Distribution of the decade-long average accuracy of climatological forecasts of ice cover in the Sea of Okhotsk.

Приведенные оценки свидетельствуют о том, что КСН текущего периода дают более достоверное представление о будущей величине ледовитости, чем КСН предыдущих базисных периодов.

Результаты проведенного анализа показали разницу в режимных характеристиках ледовитости, вычисленных для четырех базисных периодов, рекомендованных ВМО. Наибольшие отличия самих характеристик и прикладного их использования (при климатологическом прогнозе и типизации ледовых условий) демонстрируют Б61 и Б81 (Б91).

Оценка качества методических прогнозов ледовитости

В оперативном режиме в ДВНИГМИ выпускаются прогнозы среднемесячной ледовитости в акваториях дальневосточных морей с заблаговременностью 7 и более месяцев по методике, утвержденной Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [4]. В оперативном прогнозе используется базисный период Б71. Независимая выборка

начинается с 2001 г. и ежегодно увеличивается, поскольку в алгоритме разработанной модели предусмотрена адаптивная схема прогноза. При введении базисного периода Б81 начало формирования независимой выборки будет сдвинуто на 10 лет. Представлялось необходимым оценить реакцию прогностической модели на замену базисного периода. С этой целью первоначально были осуществлены и оценены ретроспективные методические и климатологические прогнозы среднемесячной ледовитости с использованием стандартных статистических параметров для Б71 и Б81 в полях гидрометеозаписей и временных рядах ледовитости на семилетнем периоде (2011/2012 – 2017/2018 гг.). Затем по ССП Б81 рассчитаны «квазиоперативные» прогнозы на два ледовых сезона (2018/2019 – 2019/2020 гг.). Оценки (оправдываемость и абсолютная ошибка) «квазиоперативных» прогнозов были сопоставлены с аналогичными оценками оперативных прогнозов средней месячной ледовитости.

Результаты оправдываемости ретроспективных методических и климатологических прогнозов среднемесячной ледовитости с использованием норм Б71 и Б81 помещены в табл. 4.

Таблица 4. Оправдываемость (Р%) ретроспективных методических и климатологических прогнозов ледовитости Охотского моря за период 2011/2012–2017/2018 гг.

Table 4. Accuracy (P %) of retrospective methodical and climatological forecasts of the Sea of Okhotsk ice cover for the period 2011/2012-2017/2018

Прогноз	Месяц						Сезон
	XII	I	II	III	IV	V	
Кл_Б81	85,7	71,4	71,4	71,4	57,1	57,1	69
Мет_Б81	100	100	100	85,7	71,4	100	92,9
Кл_Б71	85,7	71,4	71,4	71,4	42,9	57,1	66,7
Мет_Б71	85,7	100	85,7	71,4	71,4	85,7	83,3

Примечание. Мет_Б81, Мет_Б71 – методические прогнозы ледовитости;
Кл_Б81, Кл_Б71 – климатологические прогнозы ледовитости по Б81 и Б71.

Минимальная оправдываемость методических прогнозов по Б81, равная оправдываемости по Б71, отмечалась в апреле, при этом климатологический прогноз оказался хуже. Оправдываемость и методических, и климатологических прогнозов в среднем за ледовый сезон на этом периоде оказалась выше для Б81. Средняя эффективность для Б81 составила 23,9 %, а для Б71 – 16,6 %.

Оценки оперативных и «квазиоперативных» прогнозов, осредненные за два ледовых сезона, помещенные в табл. 5, также свидетельствуют об успешности прогнозов с использованием Б81. Хотя эффективность обоих прогнозов в среднем за сезон оказалась одинаковой (25 %), но абсолютная

ошибка «квазиоперативных» прогнозов во все месяцы ледового сезона была меньше.

При сравнении оправдываемости методических прогнозов при использовании Б71 и Б81 преимущество на стороне Б81. Таким образом, замена базисного периода при осуществлении методического прогноза ледовых параметров несколько улучшила его качество.

Таблица 5. Оценки (оправдываемость и абсолютная ошибка) качества методических и климатологических прогнозов ледовитости Охотского моря за сезоны 2018/2019 – 2019/2020 гг.

Table 5. Estimates (accuracy and absolute error) of the quality of methodical and climatological forecasts of the Sea of Okhotsk ice cover for the 2018/2019 – 2019/2020 seasons.

Прогноз	Месяц						Сезон
	XII	I	II	III	IV	V	
Абсолютная ошибка							
Мет_Б81	1,6	1,7	5,4	5,7	4,3	3,3	3,7
Опер_Б71	2,1	3,7	7,1	7,9	5,4	4,5	5,1
Оправдываемость							
Кл_Б81	100	100	100	100	50	0	75
Мет_Б81	100	100	100	100	100	100	100
Кл_Б71	100	100	100	100	0	0	66,7
Опер_Б71	100	100	100	50	100	100	91,7

Примечание: Мет_Б81 – «квазиоперативный», Опер_Б71 – оперативный, Кл_Б81 и Кл_Б71 – климатологические прогнозы ледовитости по Б81 и Б71.

Заключение

При изучении режима ледовитости Охотского моря в четырех 30-летних периодах с 1961 по 2020 год от января к маю (в период формирования и разрушения тяжелых льдов в Охотском море) выявлены похожие изменения климатологических стандартных норм, экстремальной ледовитости, изменчивости ледовитости. Для декабря, периода формирования устойчивого ледяного покрова, поведение аналогичных характеристик неоднозначно.

Абсолютный максимум или минимум ледовитости, зафиксированный хотя бы в одном месяце с января по май, определяет характер ледовитости всего ледового сезона для всех четырех базисных периодов.

Обновленные по текущему базисному периоду стандартные статистические параметры позволяют более реалистично представить характер аномалий ледовых условий Охотского моря.

Исследование позволило получить удовлетворительный ответ на поставленный методический вопрос: переход в расчетах к новому базисному периоду не уменьшил прогностические возможности физико-статистической модели. Осредненная за сезон оправдываемость методического и климатологического прогнозов ледовитости, осуществленных с использованием Б81, превысила оправдываемость аналогичных прогнозов по Б71 как за 7-летний период проверочной выборки, так и при сравнении «квазиоперативных» и оперативных прогнозов за два сезона (2018/2019 – 2019/2020 гг.). В целом, успешность прогноза среднемесячной ледовитости Охотского моря выросла. Результаты проведенного исследования согласуются с выводами [6] о необходимости обновления климатических данных в исследовании режима изучаемой характеристики.

Список литературы

1. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Фоновый прогноз с большой заблаговременностью среднего месячного положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей // ДВНИГМИ – 65 лет. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 124-143.
2. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Прогноз с большой заблаговременностью среднемесячной ледовитости дальневосточных морей с детализацией по декадам // Труды ДВНИГМИ. 2017. №. 155. С. 141-156.
3. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Методика прогноза ледовых параметров на акваториях дальневосточных морей большой заблаговременности // Известия ТИНРО. 2018. Т. 194. С. 239-250.
4. Анжина Г.И., Вражкин А.Н., Щербинина Т.П., Примачев Е.В. Автоматизированный метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью до одного года // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. Информационный сборник № 40. С. 80-96.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: Температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Динамические климатические нормы температуры воздуха // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. С. 5-18.
7. Жежко Р.Я., Толмачева М.А. О способе выявления информативных предикторов // Труды ДВНИГМИ. 1990. Вып.136. С. 110-118.
8. Пицальник В.М., Романюк В.А, Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 228-230.
9. Плотников В.В., Вакульская Н.М. Изменчивость ледовых условий Берингова моря во второй половине XX – начале XXI века // Известия ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 220-228.
10. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 152 с.

11. РД 52.27.759-2011. Наставления по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III Служба морских гидрологических прогнозов.

12. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм // ВМО-№ 1203. Женева, 2017. 21 с.

13. Спичкин В.А. Определение критерия крупной аномалии // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 15-20.

14. Тюряков А.Б., Мочнова Л.П. Метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в осенне-зимний период в юго-восточной части Баренцева моря с заблаговременностью 30–45 суток и технология его составления // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 73-92.

15. Шатилина Т.А., Цициашвили Г.Ш., Муктепавел Л.С., Никитин А.А., Радченкова Т.В. Статистические оценки трендов климатических изменений над Дальним Востоком в зимний и летний периоды 1980–2012 гг. // Вопросы прикладной океанологии. 2014. Вып. 10. № 1. С. 76-97.

16. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecasting method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model // Pacific Oceanography. 2008. Vol. 4, no. 1-2. P. 45-49.

References

1. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Fonovyy prognoz s bolshoy zablagovremennostyu srednego mesyachnogo polozheniya kromki l'da na akvatoriayah dalnevostochnykh morey. [Background forecast with a long lead time of the average monthly position of the ice edge in the water areas of the Far Eastern seas]. Anniversary edition DVNIGMI-65. Vladivostok, Dalnauka publ., 2015, pp. 124-143 [in Russ.].

2. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecast of the average monthly ice cover in the far Easten seas from detailing for every the ten-days. *FERHRI Issuer*, 2017, no. 155, pp. 124-143 [in Russ.].

3. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Method for predicting the ice cover parameters in the waters of the Far-Eastern Seas with a long lead time. *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 194(3), pp. 239-250 [in Russ.]. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-239-250.

4. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N., Scherbinina T.P., Primachev E.V. Avtomatizirovannyiy metod prognoza sredney mesyachnoy ledovitosti Ohotskogo, Yaponskogo i Beringova morey s zablagovremennostyu do odnogo goda [An automated method for forecasting the average monthly ice coverage of the Okhotsk, Japanese and Bering seas with a lead time of up to one year]. *Informatsionnyiy sbornik Gidromettsentra Rossii* [Information collection Gidromettsentra Rossii], 2013, no. 40, pp. 80-96 [in Russ.].

5. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossijskoj Federacii: Temperatura vozduha. Obninsk: RIHMI-WDC publ., 2012. 194 p. [in Russ.].

6. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Dynamic normals of surface air temperature. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, is. 11-12, pp. 717–727.

7. Zhezhko R.Ya., Tolmacheva M.A. O sposobe vyiavleniya informativnykh prediktorov. [On the method of identifying informative predictors]. *Trudy DVNIGMI*, 1990, vol. 136, pp. 110-118 [in Russ.].

8. Pishchalnik V.M., Romanyuk V.A., Minervin I.G., Batutina A.S. Analysis of dynamics for anomalies of the ice cover in the Okhotsk Sea in the period from 1882 to 2015. *Izvestiya TINRO*, 2016, vol. 185, no. 2, pp. 228-239 [in Russ.]. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-185-228-239.

9. Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M. Variability of ice conditions in the Bering sea in the second half of 20 century and the beginning of 21 century. *Izvestiya TINRO*, 2012, vol. 170, pp. 220-228 [in Russ.].

10. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. [Methodical instructions. Conducting production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts.]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1991, 152 p. [in Russ.].

11. RD 52.27.759-2011. Nastavleniya po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' III Sluzhba morskikh prognozov. [Manual for the service of forecasts. Section 3. Part III Marine Hydrological Forecast Service.]. Moscow, Triada Ltd. publ., 2011. 195 p. [in Russ.].

12. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. *WMO-No. 1203*. In Purpose. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 2017, 18 p.

13. Spichkin V.A. Opredelenie kriteriya krupnoy anomalii. [Determination of the criterion for a major anomaly]. *Trudy ANII*, 1987, vol. 402, pp. 15-20 [in Russ.].

14. Tyuryakov A.B., Mochnova L.P. A method for long-range forecasting of young and first-year ice distribution in the southeastern Barents Sea in autumn-winter with a lead time of 30-45 days. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2019, vol. 373, no. 3, pp.73-92 [in Russ.].

15. Shatilina T.A., Tsitsiashvili G.Sh., Muktepavel L.S., Nikitin A.A., Radchenkova T.V. Statisticheskie otsenki trendov klimaticheskikh izmeneniy nad Dalnim Vostokom v zimniy i letniy periody 1980-2012 gg. [Statistical assessments of trends in climate change over the Far East in the winter and summer periods 1980-2012]. *Voprosy prikladnoy okeanologii*, 2014, vol.10, no. 1, pp. 76-97 [in Russ.].

16. Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecasting method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model. *Pacific Oceanography*, 2008, vol. 4, no. 1-2, pp. 45-49.

Поступила 12.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 12.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-115-130>

УДК 556.06

Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов

***С.В. Борщ, В.М. Колий, Н.К. Семенова,
Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров***

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

Возможность прогнозирования речного стока определяется максимальной заблаговременностью удовлетворительных прогнозов расходов воды методом экстраполяции гидрографа. Этот показатель характеризует плавность изменения расходов воды во времени и определяет возможности использования автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов речного стока в течение всего года, разработанной в Гидрометцентре России.

Исследована зависимость прогнозируемости речного стока от основных факторов его формирования и режима. На территории России выделены 18 регионов, для каждого из которых получена зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади и среднего уклона поверхности водосбора. Эти регионы занимают 79 % площади всей страны.

Региональные расчетные зависимости позволяют оценить пороговые значения площади и среднего уклона водосбора, за пределами которых возможны удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью 8–10 суток или, наоборот, только с малой заблаговременностью 1–2 суток, или невозможны вообще.

Ключевые слова: прогнозируемость речного стока, экстраполяция гидрографа, максимальная заблаговременность прогнозов, морфометрические характеристики водосбора, региональные расчетные зависимости

Assessment of runoff predictability for the Russian rivers depending on their catchment characteristics by the hydrograph extrapolation method

***S.V. Borsch, V.M. Koliy, N.K. Semenova,
Yu.A. Simonov, A.V. Khristoforov***

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

The predictability of river runoff is determined by the maximum lead time of satisfactory forecasts of water discharge obtained by the hydrograph extrapolation method. This indicator characterizes the smoothness of changes in water discharge over time and determines a possibility of using the Hydrometcentre of Russia's automated system for preparation and daily streamflow forecasting all year long.

The dependency between the predictability of river runoff and the main factors of its formation and regime is investigated. In total 18 regions within the territory of Russia are identified; for each of them a dependence between the streamflow predictability indicator and the area and average slope of the catchment is obtained. These regions cover 79% of the entire country.

Calculated regional dependencies made it possible to estimate threshold values of the area and average slope of the catchment beyond which satisfactory forecasts are possible with a sufficiently long lead time (8–10 days), or only with a short lead time (1–2 days), or are impossible at all.

Keywords: streamflow predictability, hydrograph extrapolation method, maximum forecast lead time, morphometric characteristics of catchment, calculated regional dependencies

Введение

Разработанная в Гидрометцентре России автоматизированная система позволяет выпускать прогноз характеристик стока рек, водосборы которых покрывают практически всю территорию нашей страны. Краткосрочные и среднесрочные прогнозы расходов и уровней воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток выпускаются ежедневно в течение всего года. В данной системе используется метод экстраполяции гидрографа, при котором прогнозируемое значение характеристики стока определяется в зависимости от ее значений за дату составления прогноза и за пять предыдущих суток [3].

Если показатели качества прогноза речного стока снижаются с ростом его заблаговременности, то скорость такого снижения до неудовлетворительных значений определяет прогнозируемость стока конкретной реки проверяемым методом, которую целесообразно определить как максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов. Оценка прогнозируемости стока конкретной реки различными методами в зависимости от характеристик ее водосбора представляет несомненный научный и практический интерес, так как позволяет заранее ориентироваться на наиболее подходящие методы прогнозирования и отбрасывать заведомо неприемлемые.

Верификация по ежедневным данным гидрологических наблюдений за период с 2010 по 2019 год показала, что удовлетворительные прогнозы среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа с заблаговременностью одни сутки могут быть получены для 1000 створов, с заблаговременностью пять суток – для 382 речных створов, а с заблаговременностью десять суток – для 240 створов [3].

Установлено, что применяемый метод позволяет получать удовлетворительные прогнозы с максимальной заблаговременностью для рек с большой площадью и малым уклоном водосбора. Для таких рек медленное формирование речного стока обеспечивает плавные очертания гидрографа, который можно достаточно точно экстраполировать на значительный промежуток времени. Для рек с малой площадью и большим уклоном

водосбора формирование стока происходит быстро, поэтому ход среднесуточных расходов имеет пилообразный характер и его сложно предсказывать с достаточной точностью даже на ближайшие сутки [3].

В современной гидрологии факторы формирования речного стока и особенности его колебаний во времени достаточно хорошо изучены. Ведущими из них являются климат и ландшафтная структура водосбора [4, 5, 9, 11, 12]. Следовательно, учет морфометрических характеристик водосбора конкретной реки при оценке прогнозируемости ее стока методом экстраполяции гидрографа возможен только в пределах достаточно однородного в географическом отношении региона. Решению такой задачи и посвящена настоящая статья.

Показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа

В отечественной гидрологии качество краткосрочных и среднесрочных гидрологических прогнозов при их заданной заблаговременности Δt характеризуется двумя тесно связанными между собой показателями:

- отношением S/σ_{Δ} их среднеквадратической погрешности S к погрешности инерционных прогнозов σ_{Δ} по известным значениям прогнозируемой величины на дату составления прогноза;

- оправдываемостью P , равной частоте случаев, когда абсолютные значения их ошибок прогноза не превышают допустимую ошибку $0,674 \sigma_{\Delta}$.

При достаточно большом количестве проверочных прогнозов их результаты считаются удовлетворительными, если выполняются неравенства $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и $P \geq 60\%$ [2].

Как правило, с ростом заблаговременности прогнозов отношение S/σ_{Δ} растет, а их оправдываемость P снижается. Однако возможны исключения, когда для больших рек с плавными очертаниями гидрографов при небольшой заблаговременности прогнозов их малая среднеквадратическая погрешность S может сочетаться с настолько малой величиной σ_{Δ} , что показатель S/σ_{Δ} может превысить критическое значение 0,80, а показатель P может оказаться ниже 60 %. В то же время при дальнейшем росте заблаговременности прогнозы становятся удовлетворительными [3]. Данное обстоятельство затрудняет получение общего показателя прогнозируемости стока конкретной реки на основе величин S/σ_{Δ} и P при различных значениях Δt заблаговременности прогноза.

В связи с этим в предлагаемой работе используется другой показатель качества прогнозирования характеристик речного стока с заблаговременностью Δt – коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ между их фактическими и прогнозируемыми значениями. При прогнозировании среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа показатель $R(\Delta t)$ равен множественному коэффициенту корреляции между

прогнозируемым расходом воды $Q(t + \Delta t)$ и известными к дате составления прогноза t расходами $Q(t)$, $Q(t-1)$, ..., $Q(t-5)$. Квадрат этой величины $R^2(\Delta t)$ равен широко используемому в зарубежной практике моделирования и прогнозирования речного стока показателю Нэша – Сатклиффа [2]. Величина $R(\Delta t)$ всегда снижается с ростом заблаговременности прогноза Δt , а неравенство $R(\Delta t) > 0,9$, как правило, обеспечивает удовлетворительность прогнозов по показателям S/σ_Δ и P .

С учетом отмеченных обстоятельств показатель $\Delta_{\max}$ прогнозируемости стока в конкретном речном створе определяется таким образом, что прогнозы, для которых выполняется условие $R(\Delta t) > 0,9$, могут быть получены при всех значениях заблаговременности Δt , не превышающих величину $\Delta_{\max}$.

Из данного определения следует, что при условии $\Delta_{\max} = 10$ коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ между фактическими значениями расходов воды и их прогнозами превышает величину 0,9 при всех значениях заблаговременности Δt от 1 до 10 суток, что означает удовлетворительность прогнозов среднесуточных расходов воды методом экстраполяции гидрографа при любой рассматриваемой заблаговременности. При условии $\Delta_{\max} = 0$ коэффициент корреляции $R(\Delta t)$ оказывается меньше 0,9 даже при заблаговременности одни сутки, что означает неудовлетворительность прогнозов данным методом при любой заблаговременности.

Показатель $\Delta_{\max}$ можно рассматривать как максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, так как в большинстве случаев его значения незначительно отличаются от аналогичной по сути, но несколько иначе определяемой величины, рассмотренной в [3].

При использовании метода экстраполяции гидрографа показатель $\Delta_{\max}$ в максимально полной степени характеризует плавность изменения расходов воды во времени и возможность его предсказания. Таким образом, он является оригинальной, но весьма важной с практической точки зрения характеристикой водного режима реки.

Используемые морфометрические характеристики водосборов

При исследовании зависимости показателя $\Delta_{\max}$ от характеристик соответствующих водосборов использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России.

Особенности гидрографов каждого речного створа определяются режимом выпадения осадков и температуры воздуха, особенностями подстилающей поверхности, формой и размерами водосбора, а также факторами хозяйственной деятельности, влияющими на водный режим

реки [7, 10, 13]. Для водосборов, находящихся в одинаковых природных условиях, решающее значение имеют их морфометрические характеристики, которые определяют скорость реакции водосбора на таяние снежного покрова и выпадение жидких осадков. При прочих равных условиях эта скорость определяется временем склонового и руслового добега [5, 12].

С учетом данного обстоятельства среди различных морфометрических характеристик водосбора в качестве основных выбраны его площадь A и средний уклон его поверхности I .

Площадь водосбора характеризует расстояние до замыкающего створа, которое преодолевают талые, дождевые и подземные воды. Кроме того, с увеличением площади водосбора растет число притоков с несинхронными колебаниями водности, и суперпозиция поступающих в основное русло расходов воды этих притоков сглаживает гидрограф в замыкающем створе. Средний уклон водосбора характеризует скорость поверхностного, внутриводосборного и подземного стекания воды по склонам и скорость движения воды в русловой сети. Таким образом, при прочих равных условиях плавность изменения расходов воды во времени должна возрастать с увеличением площади водосбора и уменьшением его среднего уклона [5, 12]. Следовательно, с увеличением A и уменьшением I показатель прогнозируемости речного стока методом экстраполяции гидрографа $\Delta_{\max}$ также должен расти.

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены гидрографы 2018 года для расположенного выше Цимлянского водохранилища створа реки Дон у станции Новогригорьевская и створа его притока второго порядка – реки Ворона у села Чутановка. Первый водосбор имеет в 37,4 раза большую площадь, в 1,6 раза меньший уклон и значительно более плавные очертания гидрографа. В результате показатель прогнозируемости расходов воды для реки Дон составляет $\Delta_{\max} = 10$ суток, а для его притока всего $\Delta_{\max} = 1$ сутки.

Значения площади водосборов взяты из Перечня действующих постов сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2665) [6].

Средний уклон поверхности водосбора рассчитан с помощью цифровой модели рельефа всей территории России с пространственным разрешением 1 км, созданной на основе топографических карт масштаба 1:100 000. В качестве замыкающего створа использованы координаты гидрологического поста.

В качестве исходных данных использованы данные по 1879 речным створам, расположенным практически по всей территории России. Среди них отсутствуют створы на реках, естественный водный режим которых существенно нарушен водохранилищами, расположенными выше по течению. Для каждого речного створа по данным ежедневных наблюдений была рассчитана максимальная заблаговременность прогноза расходов

воды методом экстраполяции гидрографа $\Delta_{\max}$ и получены значения площади A и среднего уклона поверхности водосбора I .

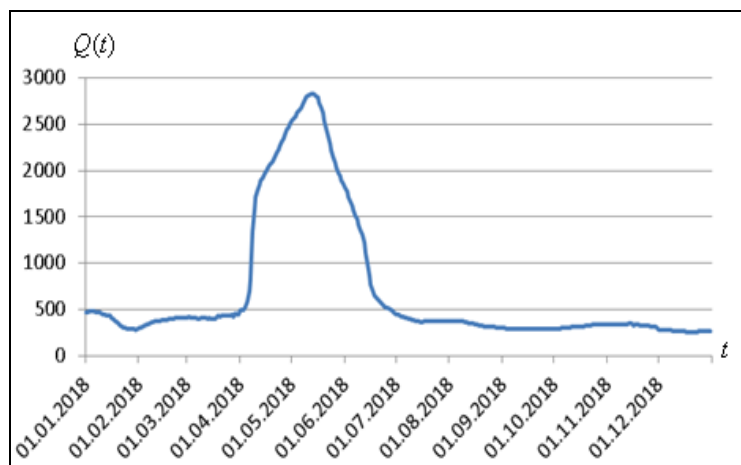


Рис. 1. Гидрограф 2018 г. в створе р. Дон – ст. Новогригорьевская с характеристиками: $A = 208000 \text{ км}^2$, $I = 0,56 \text{ ‰}$, $\Delta_{\max} = 10 \text{ сут.}$

Fig. 1. Hydrograph at the river Don – Novogrigorevskaya in 2018 with features: $A = 208000 \text{ sq km}$, $I = 0,56 \text{ ‰}$, $\Delta_{\max} = 10 \text{ days.}$

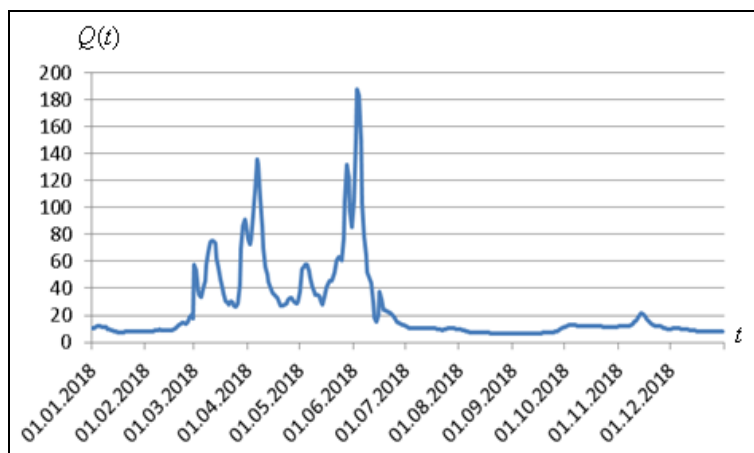


Рис. 2. Гидрограф 2018 г. в створе р. Ворона – с. Чутановка с характеристиками: $A = 5560 \text{ км}^2$, $I = 0,89 \text{ ‰}$, $\Delta_{\max} = 1 \text{ сут.}$

Fig. 2. Hydrograph at the river Vorona – Chutanovka in 2018 with features: $A = 5560 \text{ sq km}$, $I = 0,89 \text{ ‰}$, $\Delta_{\max} = 1 \text{ day.}$

Среднее для всех этих речных створов значение площади водосбора равно $\bar{A} = 25634 \text{ км}^2$, Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации $Cv(A) = 6,09$. Среднее значение уклона водосбора равно $\bar{I} = 1,96 \text{ ‰}$. Относительная изменчивость этой величины характеризуется коэффициентом вариации $Cv(I) = 1,23$. Таким образом, относительная изменчивость площадей водосборов почти в 5 раз превышает относительную изменчивость их средних уклонов. Уже только это обстоятельство делает площадь водосбора более значимым аргументом при построении эмпирических зависимостей показателя $\Delta_{\max}$ от характеристик A и I .

В качестве первого приближения анализировалась зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади водосбора A и от среднего уклона его поверхности I для всей территории России по данным всех 1879 речных створов. С этой целью рассматривались различные варианты функции $f(A, I)$, для каждого из которых оценивался коэффициент корреляции r между $f(A, I)$ и показателем $\Delta_{\max}$. В качестве оптимального был выбран вариант $f(A, I)$, для которого коэффициент r принял максимальное значение. Таким оптимальным вариантом оказался логарифм площади водосбора $\ln(A)$. Максимальное значение r оказалось равным 0,50. Теснота зависимости $\Delta_{\max}$ от $\ln(A)$ оказалась недостаточной для оценки прогнозируемости стока в конкретных речных створах по известным для них значениям A и I . В связи с этим поиск более тесных зависимостей показателя $\Delta_{\max}$ от оптимального варианта функции $f(A, I)$ производился для относительно однородных в географическом отношении регионов.

Зависимость прогнозируемости речного стока от морфометрических характеристик водосбора для отдельных регионов России

В идеале регион, в котором может использоваться единая для всех входящих в него водосборов и достаточно тесная зависимость показателя прогнозируемости речного $\Delta_{\max}$ от их площади A и среднего уклона I , должен быть однородным по всем остальным условиям формирования водного режима рек, включая климат, рельеф, ландшафтную структуру, гидрогеологические условия и факторы хозяйственной деятельности. Однако стремление к максимальной географической однородности выделяемого региона вступает в противоречие с необходимостью выделения крупного региона с достаточно большим числом гидрологических постов, данные которых необходимы для построения регионально расчетной зависимости характеристики речного стока (в данном случае показателя

$\Delta_{\max}$) от морфометрических и других азональных характеристик водосбора [8].

С учетом отмеченных выше обстоятельств, при выделении регионов с единой расчетной зависимостью показателя $\Delta_{\max}$ от площади A и среднего уклона I входящих в этот регион водосборов преследовалась цель добиться по крайней мере его относительной географической однородности. Для достижения этой цели учитывалась информация, содержащаяся в Большом географическом атласе России [1]. Использовались полученные различными авторами карты типов водного режима рек СССР и России [5].

Процедура выделения каждого региона включала следующие этапы:

- выделение «ядра», образованного водосборами с достаточно близкими условиями формирования речного стока и его режима;
- предварительное определение оптимального варианта функции $f(A, I)$, имеющей максимальный коэффициент корреляции r с показателем $\Delta_{\max}$;
- добавление соседних водосборов, если представляющие их данные заметно не снижают коэффициент r ;
- уточнение оптимального варианта функции $f(A, I)$ и зависимости от него показателя $\Delta_{\max}$;
- отбрасывание соседних водосборов, если представляющие их данные заметно ухудшают эту зависимость.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что, как правило, при разработке автоматизированных систем подготовки и выпуска гидрологических прогнозов используется бассейновый принцип [7, 10, 13]. Исходя из этого, большинство регионов с единой расчетной зависимостью $\Delta_{\max}$ от A и I являются бассейнами крупных рек.

Регионы, совпадающие с огромными бассейнами Енисея, Лены и Амура, не могут считаться относительно однородными в географическом отношении. Однако в условиях характерной для них редкой сети гидрологических постов их дробление приводило к тому, что для некоторых вновь образованных регионов зависимость $\Delta_{\max}$ от A и I заметно улучшалась, а для других недопустимо ухудшалась.

Таким образом, выделено 18 регионов с единой расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока $\Delta_{\max}$ от соответствующей каждому региону функции морфометрических характеристик водосбора $f(A, I)$. Эти регионы покрывают 79 % площади всей страны и представлены на рис. 3.

В табл. 1 для каждого региона приведены его номер, название, число речных створов N , оптимальный для данного региона морфометрический аргумент $f(A, I)$ и коэффициент его корреляции r с показателем $\Delta_{\max}$.

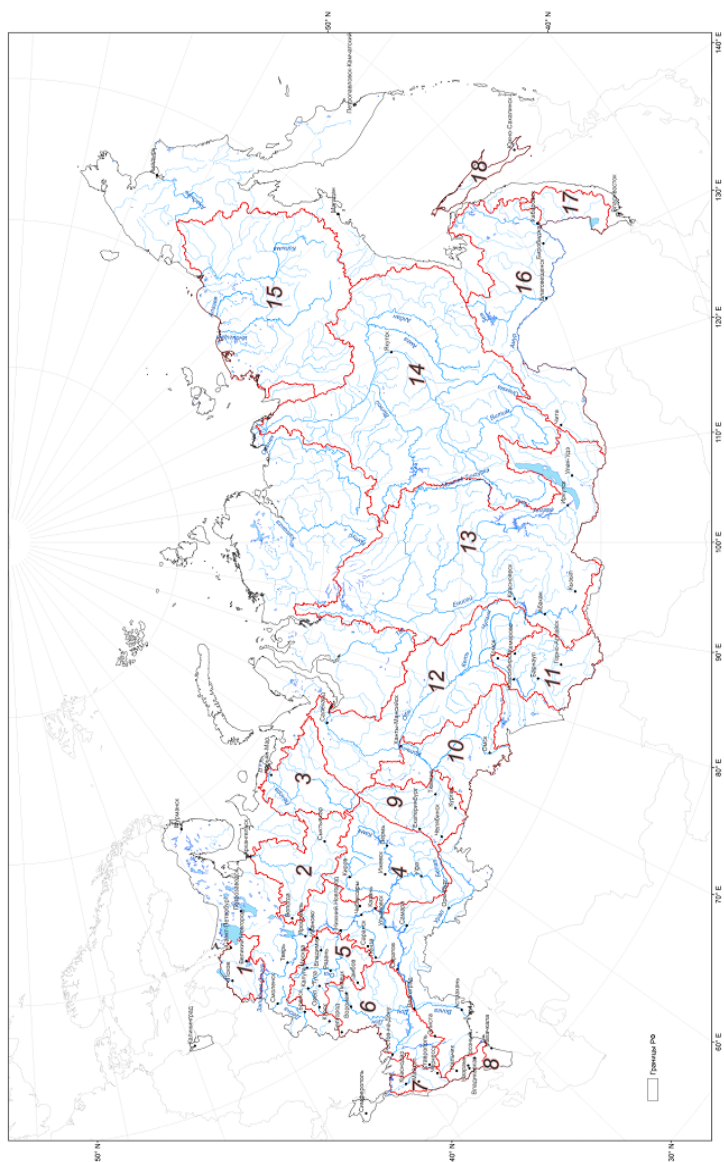


Рис. 3. Регионы с расчетной зависимостью показателя прогнозируемости речного стока $\Delta_{\max}$ от функции морфометрических характеристик водосбора $f(A, I)$.

Fig. 3. Regions with calculated dependence predictability indicator of river flow $\Delta_{\max}$ as the function of morphometric characteristics of catchment area $f(A, I)$.

Таблица. Характеристики выделенных регионов
Table Characteristics of the selected catchments

№	Регион	N	$f(A, I)$	r
1	Северо-Запад России	71	$\ln(A)$	0,76
2	Бассейн Северной Двины	75	$\ln(A)$	0,77
3	Бассейн Печоры	46	A	0,84
4	Бассейн Камы	129	$\sqrt{A/I}$	0,82
5	Бассейн Оки	66	$\sqrt{A/I}$	0,84
6	Бассейн Дона	75	$\ln(A)$	0,80
7	Бассейн Кубани	25	$\sqrt{A/I}$	0,77
8	Бассейн Терека	33	$\ln(A) + 1,3 \ln(I)$	0,76
9	Бассейн Тобола	36	$\ln(A)$	0,81
10	Бассейн Иртыша	78	$\ln(A/I)$	0,80
11	Бассейн Верхней Оби	162	$\sqrt{A/I}$	0,82
12	Бассейн Нижней Оби	32	$\ln(A)$	0,91
13	Бассейн Енисея	80	$\sqrt{A/I}$	0,76
14	Бассейн Лены	88	$\ln(A/I)$	0,75
15	Северо-Восток России	63	$\ln(A) + 1,3 \ln(I)$	0,79
16	Бассейн Амура	54	$\ln(A)$	0,88
17	Приморье	43	A	0,75
18	Сахалин	25	$\sqrt{A/I}$	0,75

В приведенной таблице обращает на себя внимание, что использование для бассейна Терека в качестве оптимального аргумента $f(A, I) = \ln(A) + 1,3 \ln(I)$ свидетельствует о том, что в данном регионе максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов $\Delta_{\max}$ увеличивается с ростом среднего уклона поверхности речного бассейна. Столь неожиданный результат имеет достаточно простое объяснение.

Наибольшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном высоко в горах. Для них преобладает снеговое и ледниковое питание. Оно обеспечивает плавные очертания волны половодья и гидрографа в целом. Наименьшие уклоны имеют реки, водосборы которых расположены в основном на равнине. Для них преобладает дождевое питание. Оно обеспечивает резкие очертания отдельных паводков и пилообразный характер гидрографа в целом [4, 5]. Таким образом, для бассейна Терека средний уклон поверхности речного бассейна косвенно характеризует расположение водосбора реки и режим ее питания, а он, в свою

очередь, определяет особенности очертаний гидрографа и возможности его экстраполяции.

Метод экстраполяции гидрографа применялся для получения прогноза расходов воды с заблаговременностью Δt от 1 до 10 суток. В связи с этим значения показателя $\Delta_{\max}$, определяющего максимальную заблаговременность удовлетворительных прогнозов, также ограничены 10 сутками. В результате для многих регионов зависимость этого показателя от морфометрического аргумента $f(A, I)$ становится нелинейной по мере его увеличения и приближения величины $\Delta_{\max}$ к 10. Это приводит к тому, что коэффициент корреляции r , который характеризует тесноту статистической связи и степень ее линейности, занижает фактическую тесноту зависимости $\Delta_{\max}$ от аргумента $f(A, I)$. Если бы расходы воды прогнозировались с заблаговременностью более 10 суток, характер этой зависимости имел бы линейный характер во всем диапазоне анализируемых значений и коэффициенты корреляции r были бы больше.

Для всех выделенных регионов зависимость показателя $\Delta_{\max}$ от оптимального варианта функции морфометрических характеристик $f(A, I)$ оказалась недостаточно тесной для надежного определения максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов расхода воды в речном створе при известных значениях площади A и среднего уклона поверхности I его водосбора. Однако эти зависимости позволяют оценить предельно низкое значение $f(A, I)$, которое обеспечивает удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью, и предельно высокое, при котором удовлетворительные прогнозы возможны только с малой заблаговременностью или невозможны вообще ($\Delta_{\max} = 0$).

Ниже приводятся примеры подобных расчетов для некоторых регионов России.

На рис. 4 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов $\Delta_{\max}$ от величины $\ln(A)$, полученный для Северо-Запада России (Ленинградская область, часть Псковской и Новгородской областей).

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

– для речных створов с показателями $\ln(A) > 9$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;

– для речных створов с показателями $\ln(A) < 5$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рис. 5 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов $\Delta_{\max}$ от величины $\sqrt{A/I}$, полученный для бассейна Оки.

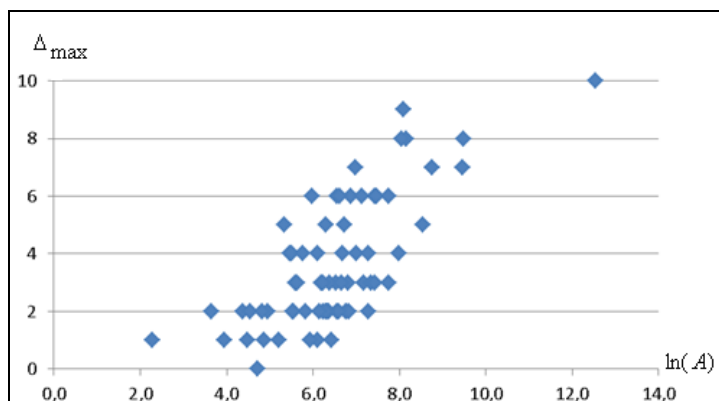


Рис. 4. График зависимости показателя $\Delta_{\max}$ от величины $\ln(A)$, полученный для Северо-Запада России.

Fig. 4. Dependence between indicator $\Delta_{\max}$ and value $\ln(A)$ obtained for Russia North-West.

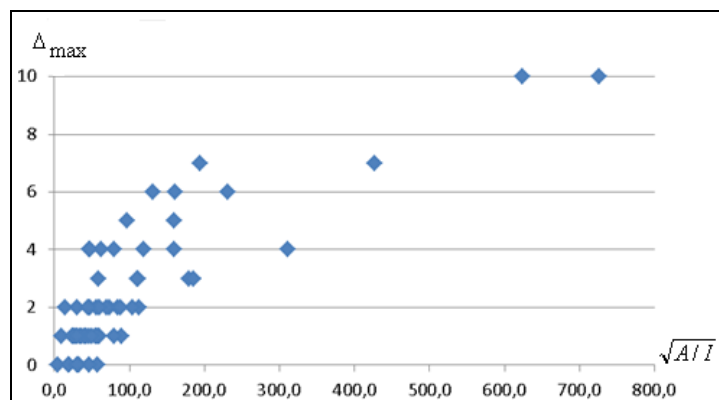


Рис. 5. График зависимости показателя $\Delta_{\max}$ от величины $\sqrt{A/I}$, полученный для бассейна Оки.

Fig. 5. Dependence between indicator $\Delta_{\max}$ and value $\sqrt{A/I}$ obtained for river Oka basin.

График на рис. 5 позволяет сделать следующие выводы:

- для речных створов с показателями $\sqrt{A/I} > 400$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;
- для речных створов с показателями $\sqrt{A/I} < 50$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

На рис. 6 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов $\Delta_{\max}$ от величины $\ln(A) - 4\ln(I)$, полученный для Северо-Востока России (бассейны Яны, Индигирки, Колымы).

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

- для речных створов с показателями $\ln(A) - 4\ln(I) > 12$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;
- для речных створов с показателями $\ln(A) - 4\ln(I) < 5$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

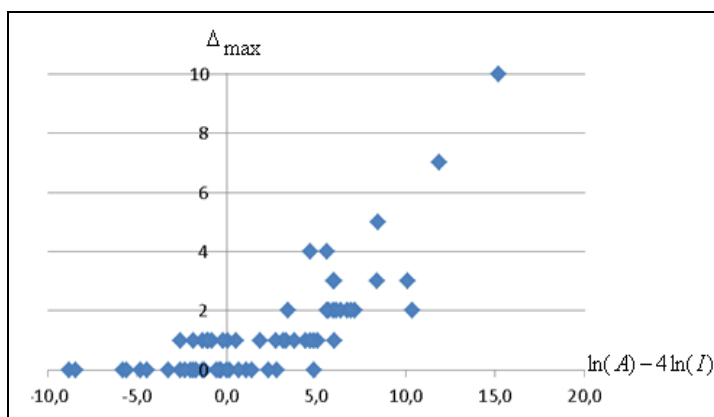


Рис. 6. График зависимости показателя $\Delta_{\max}$ от величины $\ln(A) - 4\ln(I)$, полученный для Северо-Востока России.

Fig. 6. Dependence between indicator $\Delta_{\max}$ and value $\ln(A) - 4\ln(I)$ obtained for Russia North-East.

На рис. 7 представлен график зависимости максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов $\Delta_{\max}$ от величины $\ln(A)$, полученный для бассейна Амура.

Данный график позволяет сделать следующие выводы:

- для речных створов с показателями $\ln(A) > 11$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не менее 7 суток;
- для речных створов с показателями $\ln(A) < 7$ метод экстраполяции гидрографа позволяет получать удовлетворительные прогнозы расходов воды с заблаговременностью не более 2 суток.

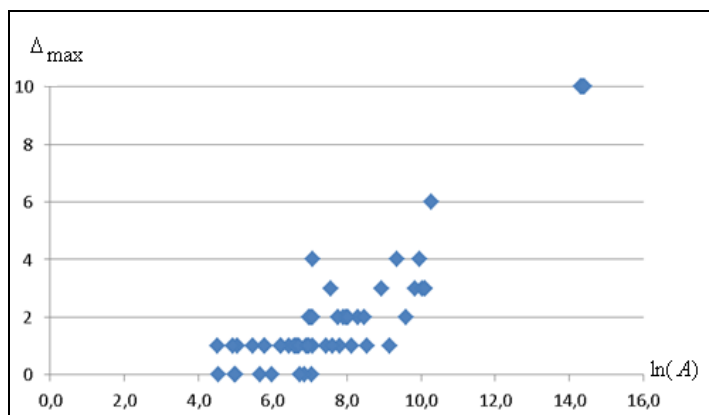


Рис. 7. График зависимости показателя $\Delta_{\max}$ от величины $\ln(A)$, полученный для бассейна Амура.

Fig. 7. Dependence between indicator $\Delta_{\max}$ and value $\ln(A)$ obtained for river Amur basin.

Заключение

Выполненная оценка прогнозируемости стока рек России методом экстраполяции гидрографа позволяет уточнить возможности использования автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов речного стока в течение всего года, разработанной в Гидрометцентре России. В качестве показателя прогнозируемости речного стока предложена максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов среднесуточных расходов воды, для которых коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами превышает 0,9. Данный показатель характеризует плавность изменения расходов воды во времени и может рассматриваться в качестве важной с практической точки зрения характеристики водного режима.

На основе данных по 1989 речным створам, расположенным практически по всей территории России, исследована зависимость прогнозируемости речного стока от основных факторов его формирования и режима. Для относительно однородных в географическом отношении территорий выполнен анализ зависимости показателя прогнозируемости речного стока от площади водосборов и среднего уклона их поверхности, которые характеризуют скорость реакции водосбора на таяние снежного покрова и выпадение жидких осадков, от которых в конкретных природных условиях зависит плавность гидрографов реки.

Выделены 18 регионов, для каждого из которых получена достаточно тесная региональная зависимость показателя прогнозируемости речного стока от площади и среднего уклона поверхности водосбора. Эти регионы

покрывают 79 % площади России и в основном являются бассейнами крупных рек.

Полученные региональные расчетные зависимости позволяют оценить пороговые значения площади и среднего уклона водосбора, за пределами которых возможны удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью или, наоборот, только с малой заблаговременностью, или невозможны вообще.

Список литературы

1. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. М.: Изд-во АСТ, 2019. 224 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
3. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 77-94.
4. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
5. Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 733 с.
6. Перечень действующие гидрологические посты сети Росгидромета (RU_RIHMI-WDC_2665).
7. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
8. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Изд-во МГУ, 1993. 166 с.
9. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. London: Taylor and Francis Group, 2004. 1024 p.
10. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. Geneva: WMO, 2009. 738 p.
11. Handbook of Hydrology. New York: Mc Graw Hill, 1993. 978 p.
12. Dingman S.L. Physical Hydrology. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 575 p.
13. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. Geneva: WMO, 2011. 138 p.

References

1. Bol'shoy geograficheskiy atlas Rossii. Ed. by G.V. Borisova. Moscow, AST publ., 2019, 224 p. [in Russ.].
2. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].
3. Borsch S.V., Koliy V.M., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Forecasting the flow of Russian rivers by hydrograph extrapolation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 380, no. 2, pp. 77-94 [in Russ.].

4. *Evstigneev V.M.* Rechnoy stok i gidrologicheskie raschety. Moscow, MGU publ., 1990, 304 p. [in Russ.].
5. *Zakonomernosti gidrologicheskikh processov.* Ed. by N.I. Alekseevskogo. Moscow, GEOS publ., 2012, 733 p. [in Russ.].
6. *Perechen' deystvuyushchie gidrologicheskie posty seti Rosgidrometa (RU_RIHMI-WDC_2665)* [in Russ.].
7. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
8. *Khristoforov A. V.* Nadejnost' raschetov rechnogo stoka. Moscow, MGU publ., 1993, 166 p. [in Russ.].
9. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. London: Taylor and Francis Group publ., 2004, 1024 p.
10. *Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168.* Geneva, WMO, 2009, 738 p.
11. *Handbook of Hydrology.* New York: Mc Graw Hill publ., 1993, 978 p.
12. *Dingman S.L.* Physical Hydrology. New York: Macmillan Publishing Company publ., 1993, 575 p.
13. *Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072.* Geneva, WMO, 2011, 138 p.

*Поступила 15.06.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 15.06.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-131-149>

УДК 504.3.054+504.06+505.75

Прогнозирование метеорологического показателя рассеивания загрязняющих веществ в приземном воздухе

***И.Н. Кузнецова, Ю.В. Ткачева,
И.Ю. Шалыгина, М.И. Нахаев***

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

Представлен усовершенствованный алгоритм расчета метеорологического показателя рассеивания загрязнений в приземном воздухе (МППЗ) с использованием прогностических данных модели COSMO-Ru7 с дискретностью 1 час. С помощью МППЗ как функции скорости переноса и термической стратификации в атмосферном пограничном слое, осадков и адвективных изменений температуры весь диапазон влияющих на рассеивание загрязнений атмосферных условий разделяется на три типа – слабое (первый тип), умеренное (второй тип), сильное (третий тип) рассеивание. Худшие условия рассеивания примеси представляет МППЗ первого типа; определяющий его набор метеорологических параметров соответствует неблагоприятным метеорологическим условиям (НМУ), способствующим накоплению загрязняющих веществ в приземном воздухе. Предложенная детализация внутри каждого типа МППЗ в виде подтипов может быть использована при прогнозировании НМУ для одиночных источников. Приводятся иллюстрации связи МППЗ с колебаниями уровня загрязнения воздуха в эпизодах НМУ, используя для этого данные автоматизированных измерений концентрации загрязняющих веществ и срочных сетевых измерений. Предложен и реализован алгоритм вероятностного прогноза МППЗ, позволяющий учитывать неопределенность прогноза при составлении предупреждений о НМУ.

Ключевые слова: метеорологические условия загрязнения воздуха, неблагоприятные метеорологические условия, численный прогноз

Forecasting a meteorological indicator of pollutant dispersion in surface air

I.N. Kuznetsova, Yu.V. Tkacheva, I.Yu. Shalygina, M.I. Nakhaev

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

An improved algorithm for calculating a meteorological indicator of pollution dispersion in surface air (MIPD) using the COSMO-Ru7 configuration forecast data with a discreteness of 1 hour is presented. Using the MIPD as a function of the transport rate and thermal stratification in the atmospheric boundary layer, precipitation and advective temperature changes, the entire range of atmospheric conditions affecting the dispersion of pollutants is divided into three types: weak (the first type), moderate (the second type),

and strong (the third type) dispersion. The worst conditions for the pollutant dispersion are provided by the MIPD of the first type; the set of meteorological parameters that determines it corresponds to adverse weather conditions (AWC) that contribute to the accumulation of pollutants in surface air. The proposed detailing within each type of MIPD in the form of subtypes can be useful for predicting AWC for single sources. Illustrations of the MIPD connection with fluctuations in the level of air pollution during the AWC episodes are given using automated measurements of pollutant concentration and fixed network measurements. An algorithm for the probabilistic forecasting of the MIPD, that allows taking into account the uncertainty of the forecast when issuing AWC warnings, is proposed and implemented.

Keywords: meteorological conditions of air pollution, adverse weather conditions, numerical prediction

Введение

В Европейском Союзе (ЕС) задачи, связанные с загрязнением воздуха, выполняет служба CAMS (The Copernicus Atmosphere Monitoring Service), одним из сервисов которой является бесплатное предоставление данных и информации для решения экологических проблем в ЕС. Европейская система экологического мониторинга построена на строгом контроле выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в соответствии с установленными требованиями. CAMS ежедневно распространяет трехдневные прогнозы концентраций основных загрязнителей с шагом сетки около 10 км на основе ансамблевого расчета химических транспортных моделей, сосредотачиваясь на распространении пыли, продуктов природных пожаров, содержании PM_{10} и приземного озона (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). Европейская система предупреждений о неблагоприятных метеорологических условиях настроена на оповещение о наступлении эпизодов опасного загрязнения воздуха и регулировании транспорта при высоком загрязнении воздуха.

В нашей стране создана система регулирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду при неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ), способствующих накоплению вредных веществ в приземном воздухе. Регулирование выбросов как компромисс из-за практической невозможности требовать от предприятий безопасного объема выбросов в атмосферу предусматривается при НМУ. Министерство природных ресурсов и экологии РФ юридически закрепило обязанность таких мероприятий (Приказ от 28 ноября 2019 г. № 811 *"Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий"*), тем самым повысив значимость прогнозирования НМУ.

На городской территории множество источников, включая практически равномерно распределенный транспорт, формируют совокупный городской фон воздушного загрязнения. Выделить «зону влияния» отдельного городского источника в городе практически невозможно.

Вместе с тем физические свойства большинства попадающих в атмосферу первичных загрязняющих веществ и зависимость их распространения от атмосферных условий являются базовой основой для предсказания процесса накопления или рассеивания примеси, используя для этого прогностические характеристики термической и ветровой стратификации в атмосферном пограничном слое.

Следует отметить, что часть загрязняющих веществ (фенол, формальдегид и т. п.), помимо прямых выбросов от различных производств, образуются в атмосфере из выхлопных газов неполного сгорания, другие (например, озон) – в ходе фотохимических реакций. Такие, так называемые «специфические», загрязнители имеют несовпадающий с основными загрязнителями сезонный и суточный ход и неустойчивые связи с метеорологическими условиями. Но большая часть изменчивости городского загрязнения происходит под влиянием атмосферных условий макро- и мезомасштаба, механизм рассеивания примеси в пограничном слое известен и детально изучен.

В системе Росгидромета выполняется прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха для городских территорий (в целом по городу) и для отдельных источников, главной целью которого является заблаговременное предупреждение о метеорологических условиях, способствующих увеличению загрязнения приземного воздуха. При прогнозировании НМУ для одиночных источников используются установленные на этапе утверждения предельно допустимых выбросов (ПДВ) источника характеристики ветра и стратификации температуры в атмосферном пограничном слое (АПС). Для прогноза НМУ в целом по городу (поселению) применяется метеорологический показатель усредненных по территории условий рассеивания или накопления загрязнений [1]. Таким показателем в соответствии с действующим руководящим документом РД 52.04.306-92 [7] является синоптический предиктор (S_n). Проведенный авторами анализ применяемого S_n в подразделениях Росгидромета, выполняющих прогнозирование загрязнения воздуха, позволяет сделать выводы о недостаточном научном обосновании используемых на практике метеорологических предикторов и необходимости их усовершенствования с учетом современных возможностей численного моделирования.

В Гидрометцентре России выполнен цикл работ по усовершенствованию синоптического параметра, рекомендованного в РД 52.04.306-92, разд. 7.4 [7] для использования в качестве синоптического предиктора в схемах прогнозирования уровня загрязнения воздуха в целом по городу. Метод прошел апробацию в ряде подразделений Росгидромета; решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 1 декабря 2017 г. методика прогнозирования НМУ с использованием расчетов мезомасштабных численных моделей атмосферы рекомендована к применению в оперативной практике (<http://method.meteorf.ru/cmkip/dec17.html>).

В представленной публикации описывается усовершенствованный метод прогноза МПРЗ, внесенные в последние годы изменения в технологию оперативного прогнозирования МПРЗ и метеорологических характеристик, используемых для прогнозирования НМУ в целом по городу и от одиночных источников.

Краткое описание метода расчета МПРЗ

Метод расчета МПРЗ основан на учете физических атмосферных процессов, влияющих на распространение примеси в нижних слоях атмосферного пограничного слоя. При изучении связей метеорологических параметров с осредненными по городу концентрациями CO , NO_2 и PM_{10} в московском регионе установлены наиболее значимые метеорологические характеристики: средняя скорость переноса в нижних слоях атмосферы (V_h), вертикальное перемешивание в виде параметра стратификации (S_h), осадки (Pr), адвективное изменение температуры (Adv) [6]. Каждый параметр выражается количественной величиной, МПРЗ представляет собой функцию:

$$\text{МПРЗ} = f(V_h, S_h, Pr, Adv), \quad (1)$$

где h – высота подслоя в АПС, превышающая высоту приземного слоя и максимальные высоты труб промышленных предприятий; при расчетах параметров МПРЗ используется модельный уровень, близкий к 350 м; S_h – параметр стратификации в слое h : $S_h = 1$ соответствует инверсионному профилю температуры, $S_h = 2$ – стратификация от слабо устойчивой до слабо неустойчивой, $S_h = 3$ – термическая неустойчивость.

МПРЗ по совокупности метеорологических параметров (V_h, S_h, Pr, Adv) характеризует интенсивность рассеивания загрязняющих веществ, предусматривая разделение полного диапазона рассеивания на 1 – слабое, 2 – умеренное, 3 – сильное (табл. 1). В табл. 1 показаны также подтипы МПРЗ (см. описание ниже).

Комплексы метеорологических характеристик (V_h, S_h, Pr, Adv), чаще всего сопровождающиеся повышением средних городских концентраций загрязняющих веществ до величин, в 1,5 и более раза превышающих уровень городского загрязнения при сильном рассеивании, отнесены к МПРЗ первого типа. Этот тип МПРЗ характеризует метеорологические условия, способствующие накоплению загрязнений в приземном воздухе, и если он сохраняется от нескольких часов до суток, то может идентифицироваться как НМУ городского масштаба. На статистически достоверном материале установлено, что в Москве в вечерние и утренние часы (пиковые транспортные потоки) достаточно 4–6 часов для резкого повышения

уровня загрязнения и достижения более чем 1,5-кратного его повышения [6, 10].

Таблица 1. Количественные характеристики типов и подтипов МПРЗ
Table 1. Quantitative characteristics of MIPD types and subtypes

МПРЗ		V_h , м/с	S_h , °C/100м	Pr , мм/1ч	Adv , °C/1ч
Тип	Подтип				
1	1	≤ 3	1	нет	$ Adv < A_{крит}$
	2	≤ 3	2	нет	$ Adv < A_{крит}$
	3	$3 < V_h < 5$	1	нет	$ Adv < A_{крит}$
2	1	$5 \leq V_h < 7$	1	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	2	$3 < V_h < 7$	2	нет	$ Adv < A_{крит}$
	3	< 5	любая	$< 0,3$	$ Adv \geq A_{крит}$ (тепла)
	4	< 5	3	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	5	< 5	1, 2	$Pr_{min} \leq Pr < 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
3	1	$5 < V_h < 7$	2	$Pr_{min} \leq Pr < 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	2	$5 < V_h < 7$	3	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	3	$7 \leq V_h < 10$	любая	$< 0,3$	$ Adv < A_{крит}$
	4	< 5	любая	$< 0,3$	$Adv \leq -A_{крит}$ (холода)
	5	$5 \leq V_h < 10$	любая	$< 0,3$	$ Adv \geq A_{крит}$
	6	< 10	любая	$\geq 0,3$	любая
	7	≥ 10	любая	любые	любая

Примечание. $Pr_{min} = 0,01$ мм/1ч – минимальное количество учитываемых осадков; $A_{крит} = 1,5$ °C/3ч – критическая величина адвекции, начиная с которой учитывается ее влияние.

Второй тип интенсивности рассеивания (МПРЗ=2) характеризует преобладание ослабленных процессов вертикального и горизонтального перемешивания, что может способствовать повышению загрязнения первичными загрязняющими веществами, оставаясь на большей части города ниже уровня загрязнения при НМУ. При этом на подветренной территории отдельных источников концентрации загрязняющих веществ могут приближаться к уровням, соответствующим критериям НМУ.

Принимая во внимание узкие диапазоны величин, определяющих НМУ для отдельных источников [7], предложено по комбинациям количественных характеристик (V_h, S_h, Pr, Adv) внутри каждого типа МПРЗ выделять подтипы. В первом типе МПРЗ (слабое рассеивание) содержатся три подтипа, во втором выделено 5 подтипов, в третьем – 7 подтипов. Практикующие специалисты, используя классификацию подтипов, имеют возможность получить более детальную информацию об ожидаемых

атмосферных процессах. Например, при подтипах МПРЗ, равных 1.1 и 1.3, в инверсионных условиях при отсутствии осадков скорость переноса в АПС в первом случае очень слабая и ситуация соответствует НМУ практически для всех низких (с высотой выбросов до 50 м) источников, во втором случае (подтип МПРЗ = 1.3) НМУ может соответствовать критериям лишь части одиночных источников. В отдельный подтип выделена ситуация с адвекцией более теплого воздуха при скорости до 5 м/с и слабых (морозящих) осадках, которая характерна для теплых секторов циклонов, часто при наличии адвективных туманов. Напротив, адвекция холодного воздуха (подтип МПРЗ = 3.4) является достаточной для идентификации условий, способствующих очищению воздуха, поскольку сопровождается чаще всего термической неустойчивостью. При интенсивном рассеивании или сильных осадках (тип МПРЗ = 3) накопления загрязняющих веществ в приземном воздухе не происходит, что способствует низкому уровню антропогенного загрязнения приземного воздуха.

Необходимо отметить, что метод МПРЗ не предназначен для применения при прогнозировании загрязнения воздуха а) специфическими веществами тяжелее воздуха (например, метилмеркаптан, сероводород и т. п.), содержание и изменчивость которых мало зависят от погодных условий; б) вторичными загрязнителями, образующимися в результате фотохимических реакций с участием первичных загрязняющих веществ (например, озон, формальдегид и т. п.).

Расчет прогностических характеристик и МПРЗ

Прогноз МПРЗ рассчитывается по прогностическим данным оперативной системы численного прогноза погоды COSMO-Ru [8] с шагом сетки 7 км для ЕТР, 6,6 км – для Азиатской территории России на период до 2–3 суток с временной дискретностью 1 час.

Входными параметрами для прогноза МПРЗ (1) являются:

а) скорость ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) на высоте $h \approx 350$ м:

$$V_h = \sqrt{u_h^2 + v_h^2}, \quad (2)$$

где u_h , v_h – составляющие скорости ветра на верхней границе слоя ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$);

б) вертикальный градиент температуры в слое ($\text{К}/100$ м) для определения параметра стратификации (S_h):

$$\gamma = \frac{T_{2\text{м}} - T_h}{h - 2} \cdot 100, \quad (3)$$

где $T_{2\text{м}}$ – приземная температура (К); T_h – температура на верхней границе слоя (К).

Параметр стратификации

$$S_h = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma \leq -0,1 \\ 2 & \text{при } -0,1 < \gamma < 0,3, \\ 3 & \text{при } \gamma \geq 0,3 \end{cases} \quad (4)$$

в) количество осадков (Pr , мм/1ч); $Pr_{min} = 0,01$ мм – количество осадков за 1 ч, которое становится значимым при расчете МПРЗ;

г) адвекция температуры в свободной атмосфере (Adv , К/1ч) рассчитывается по данным температуры на изобарической поверхности 850 гПа:

$$Adv = T_{850}^{t+1} - T_{850}^t, \quad (5)$$

где T_{850}^t и T_{850}^{t+1} – температура 850 гПа (К) на временных шагах t и $t+1$.

$Adv_{min} = 0,5$ °С/1ч – величина, начиная с которой учитывается влияние адвекции

Технология прогнозирования

Учитывая суточные циклы атмосферных параметров, а также трудности с практическим использованием часовых прогнозов численной модели, предложено определять МПРЗ для четырех внутрисуточных периодов: утро (7–10 ч), день (11–17 ч), вечер (18–23 ч), ночь (0–6 ч) по осредненным за период значениям параметров (V_h, S_h, Pr, Adv).

Поскольку входные метеорологические параметры для прогноза МПРЗ могут содержать неточности, при прогнозировании МПРЗ на ограниченной городской территории необходимо учитывать пространственный разброс метеопараметров путем осреднения по окружающим узлам сетки. Проводится осреднение по 9-точечному шаблону модельной сетки; такая процедура осреднения позволяет получить прогностические значения параметров, соответствующих среднему значению для пункта прогноза. По комплексу осредненных характеристик (V_h, S_h, Pr, Adv) определяется тип и подтип МПРЗ.

Процедура осреднения по времени и территории позволяет уменьшить неопределенность метеорологического прогноза и минимизировать влияние ошибок COSMO-Ru7 на расчет МПРЗ.

Поле прогностического типа МПРЗ в узлах сетки COSMO-Ru рассчитывается для всей территории России. Принимая во внимание число часовых поясов, технология настроена на расчеты МПРЗ по местному времени начиная со дня текущих суток, заканчивая вечером следующих суток.

Для каждого федерального округа подготавливается визуализированный на географической основе анимированный почасовой прогноз МПРЗ на весь прогностический период. Пример прогноза МПРЗ представлен на рис. 1.

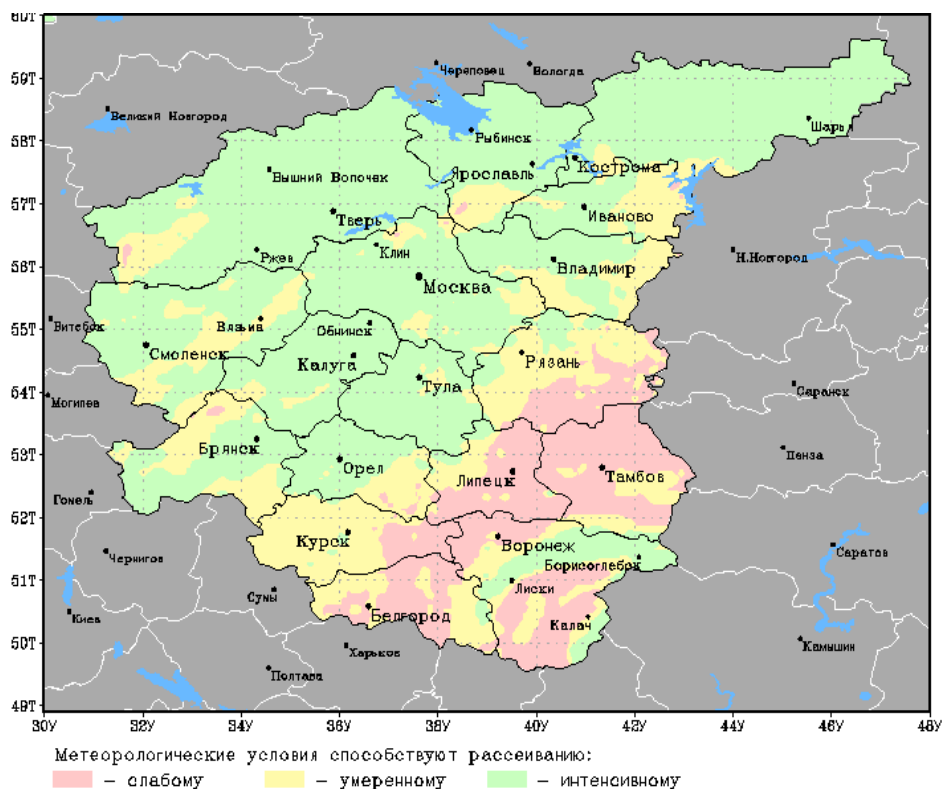


Рис. 1. Прогноз МПРЗ для ЦФО на 20 ч 19 июля 2021 г.

Fig. 1. MIPD forecast for the Central Federal District for 20 hours on July 19, 2021.

Прогнозы МПРЗ рассчитываются не только по всей сеточной области модели, но и для согласованных с потребителями пунктов. В табл. 2 приводится пример ежедневного прогноза подтипов МПРЗ для городов Центрального федерального округа с внутрисуточной детализацией (левая часть таблицы); правая часть таблицы отображает тот же прогноз типов МПРЗ в виде цветов светофора, позволяющих провести экспресс-анализ общей ситуации и возможности наступления НМУ на территории.

Из-за отсутствия данных непрерывных измерений метеорологических характеристик в АПС, диагностика МПРЗ может быть выполнена только по данным радиозондирования и наземных наблюдений в 00 и 12 ч ВСВ. В настоящее время разрабатывается методика оценки прогноза МПРЗ, основанная на применении численных прогнозов COSMO-Ru7. Другим способом верификации метода расчета МПРЗ является анализ связей МПРЗ с загрязнением приземного воздуха; некоторые иллюстрации изменчивости загрязнения воздуха при разных типах МПРЗ приводятся в следующем разделе.

Связь МПРЗ с загрязнением городского воздуха

При разработке метода алгоритм расчета МПРЗ верифицировался по данным автоматизированных измерений приземных концентраций загрязняющих веществ в московском регионе ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/>). Принимались во внимание связанные с метеорологическими условиями типовые внутрисуточные и сезонные циклы загрязняющих веществ в городской атмосфере, в частности описанные в работах авторов [5, 10] и других исследователей [2–4], в том числе и зарубежных [11–16].

Регулярно наблюдающиеся отклонения концентраций загрязнений от типовых циклов связаны с влиянием внешних нефизических факторов, к числу которых относятся переменная загруженность автодорог, ремонтные строительные и дорожные работы, поступление задымленного воздуха от природных пожаров и т. п. То есть при одних и тех же атмосферных условиях поле концентраций загрязняющих веществ на территории города может существенно различаться как по конфигурации, так и локально по значениям концентраций.

Некоторые авторы отмечают наличие максимума в недельном цикле среднего по городу уровня загрязнения воздуха. Так, в [2, 3] показано, что в Москве наиболее загрязненным первичными примесями воздух в среднем бывает в четверг, а максимальные уровни приземного озона в летний период чаще всего фиксируются в выходные дни. Еще одним нефизическим фактором влияния на загрязнение городского воздуха является возрастание загруженности автодорог в пятницу и выходные, связанное с выездом горожан в места отдыха и возвращением к началу рабочей недели.

Примером проявления внешних факторов могут служить данные изменчивости загрязнения воздуха в Москве в эпизоде НМУ 23–25 сентября 2020 г. На рис. 2 показаны измеренные на автоматизированных станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) концентрации NO_2 , PM_{10} и CO (<https://mosecom.mos.ru/>). Здесь же представлены диагностические почасовые величины подтипов МПРЗ, рассчитанные с использованием данных измерений температуры и скорости ветра на телебашне Останкино.

В первую очередь отметим, что приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о тесной связи МПРЗ с колебаниями уровня загрязнения NO_2 , PM_{10} и CO в эпизоде. Так, при $\text{МПРЗ} > 3$ 22 сентября из-за сильного ветра и днем 23 сентября в условиях термической неустойчивости (рис. 3) содержание загрязняющих веществ в приземном воздухе было небольшим, близким к фону.

Вечером 23 сентября с уменьшением вертикального градиента до $0,5\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ м}$ при слабом ветре в АПС виден быстрый рост загрязнения, в 19 ч уже при инверсии температуры был достигнут пик загрязнения по всем веществам, который продержался до полуночи (рис. 2).

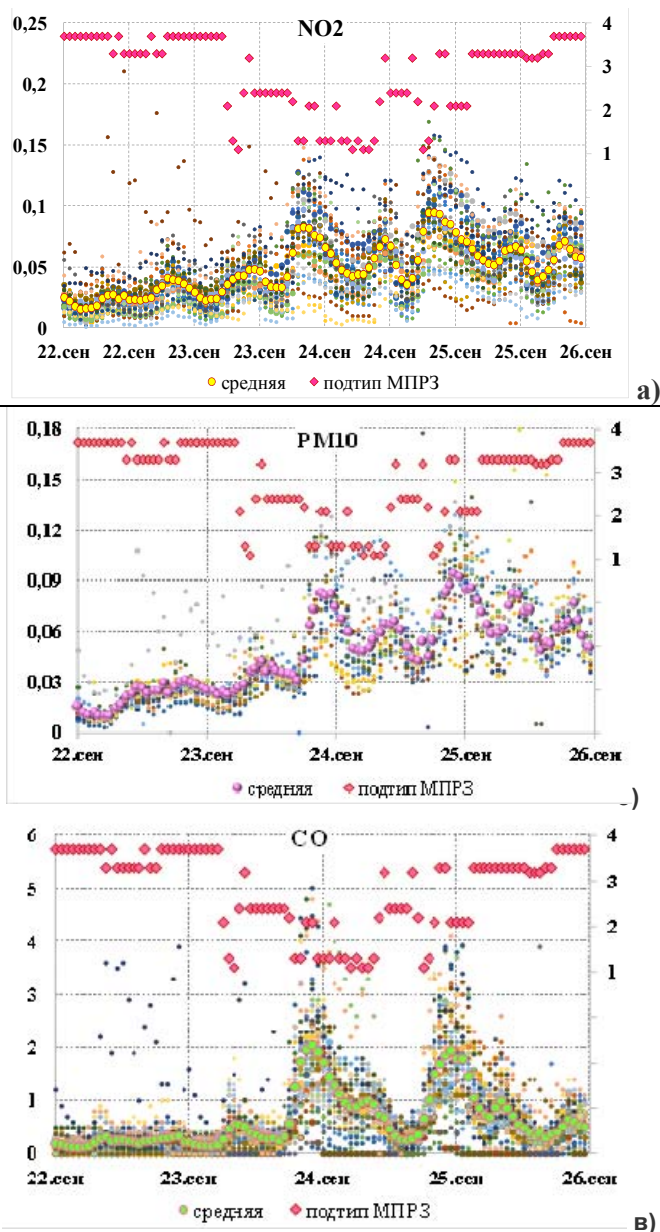


Рис. 2. Концентрация загрязняющих веществ ($\mu\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$) по измерениям на АСКЗА (основная вертикальная шкала – мелкие маркеры) и средняя по городу концентрация / Подтипы МПРЗ (вспомогательная вертикальная шкала). Эпизод НМУ 23–25 сентября 2020 г., г. Москва.

Fig. 2. The concentration of pollutants ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) according by measurements at automatic pollution measuring stations (the main vertical scale – small markers) and the average concentration in the city. Subtypes of the MIPD (secondary vertical scale). Episode of UMC on September 23–25, 2020, Moscow.

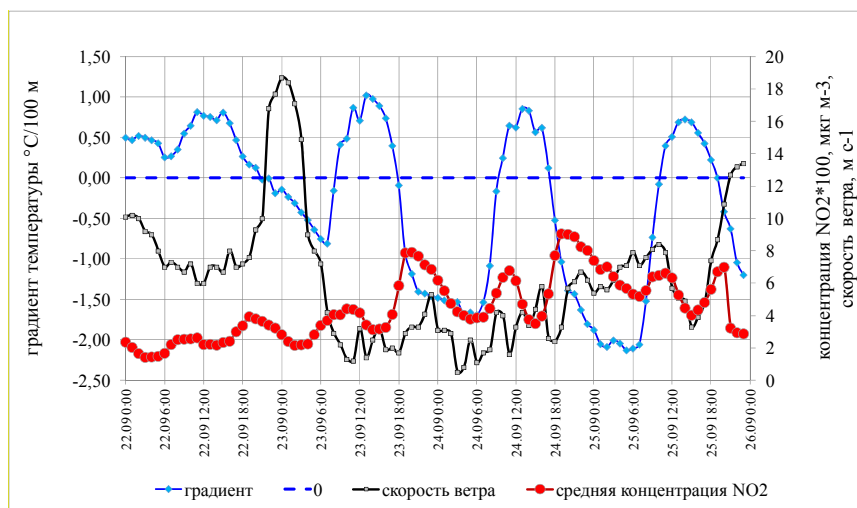


Рис. 3. Скорость ветра на высоте 305 м, градиент температуры в слое 2–305 м по данным измерений на телебашне Останкино, средняя по городу концентрация NO_2 (в эпизоде НМУ 23–25 сентября 2020 г., Москва).

Fig. 3. Wind speed at an altitude of 305 m, temperature gradient in the layer 2–305 m according to measurements at the Ostankino TV tower, the average NO_2 concentration in the city in the episode of UMC on September 23–25, 2020, Moscow.

Ночью 24 сентября на повышенном фоне загрязнения при $\text{МПРЗ} = 1$ уровень городского загрязнения при штиле и температурной инверсии до 6 ч понижался, что определялось незначительным трафиком на дорогах города. Обычный ритм городского транспорта (главного источника загрязнения в Москве) с резким увеличением загруженности дорог с 7 ч обеспечил формирование утреннего пика загрязнения (10 ч) в условиях слабого ветра и устойчивой стратификации. Резкое понижение уровня загрязнения произошло после полудня 24 сентября при $\text{МПРЗ} = 2.3$, величину которого определило увеличение вертикального градиента более $0.6^\circ\text{C}/100\text{м}$. Характерная для НМУ суточная М-образная сигнатура средней городской концентрации NO_2 , PM_{10} и CO повторилась на более высоком фоне загрязнения в следующем цикле НМУ ($\text{МПРЗ} = 1$) – с вечера 24 сентября до 15 ч 25 сентября. Очевидно, высокая чувствительность алгоритма МПРЗ к величине скорости в АПС привела к переоценке условий рассеивания ночью 25 сентября ($\text{МПРЗ} = 3.1$) при наличии мощной приземной инверсии температуры с вертикальным градиентом температуры до $2.2^\circ\text{C}/100\text{м}$, что может стать предметом уточнения критериев $\text{МПРЗ} = 1$. Вместе с тем повышение уровня загрязнения вечером 25 сентября при усилении ветра в АПС частично может быть связано с эффектом «пятницы». После 20 ч при усилении скорости переноса (более 10 м с^{-1}) начался резкий спад уровня загрязнения, достигшего к полуночи фоновых значений (рис. 2а, в).

Не исключено также, что в рассматриваемом эпизоде НМУ при преобладании слабого рассеивания к городскому загрязнению добавились шлейфы дыма от сжигания растительных остатков из пригородов московской агломерации, мелкие частицы которых участвовали в 2–3-кратном превышении фоновых уровней PM_{10} 24–25 сентября (рис. 2б).

Следует отдельно отметить, что в загрязненном воздухе 24–25 сентября вертикальный градиент температуры в нижнем слое атмосферы днем не достигал значения сухадиабатического, как это наблюдалось в чистом воздухе днем 23 сентября. Зафиксированное усиление термической устойчивости может служить иллюстрацией изменения радиационных процессов в атмосфере при изменении газовой-аэрозольного состава городского воздуха – его значительном загрязнении (рис. 3).

Непрерывные измерения концентраций загрязняющих веществ на АСКЗА позволяют получить динамичные по времени и пространству характеристики, проводить их обобщения, соответствующие масштабам прогнозируемого МПРЗ по данным численного прогноза. На сети Росгидромета принята система 3–4-разового измерения концентраций загрязняющих веществ с отсутствием измерений в один из выходных дней, что затрудняет верификацию метода расчета МПРЗ по данным сетевых измерений. Проблемой остается доступность данных мониторинга для выполнения исследовательских задач.

В рамках апробации прогноза МПРЗ в сетевых подразделениях Росгидромета авторам были предоставлены данные измерений концентраций в Курске, Нижнем Новгороде и Казани. Одна из иллюстраций связи МПРЗ с осредненными по городу концентрациями загрязняющих веществ в Курске 18–21 января 2021 г. представлена на рис. 4. Заметим, что в городе контроль загрязнения проводится на четырех постах в 7, 13 и 19 часов. Как видно на рисунке, имеется тесная связь МПРЗ с концентрациями NO_2 . При МПРЗ = 2 (подтипы 2.1, 2.3) уровень NO_2 в течение суток 18 января медленно повышался, хотя и оставался невысоким. При МПРЗ первого типа (МПРЗ = 1) 19 и 20 января концентрация NO_2 увеличилась по сравнению в предыдущим днем почти 2 раза. Интенсивное рассеивание 21 января при МПРЗ > 3 обеспечило возвращение загрязнения на фоновый уровень с характерным для города вечерним слабовыраженным максимумом.

Не очевидной, как для NO_2 , оказалась связь МПРЗ с концентрацией СО по данным измерений концентрации этого вещества в Курске. Но следует понимать, что МПРЗ предназначен для описания предпосылок колебания уровня загрязнения под влиянием мезомасштабных метеорологических условий, способствующих при ослаблении условий рассеивания (МПРЗ = 1) значительному увеличению среднего на городской территории загрязнения (в Москве – не менее чем в 1,5 раза). Для Курска характерным является более высокое по сравнению с другими крупными городами на ЕТР и относительно стабильное содержание СО в приземном

воздухе. В рассматриваемом периоде 18–21 января изменчивость средней городской концентрации СО не превысила 20 %, т. е. чувствительность СО к резким изменениям условий рассеивания в этом городе слабая и, следовательно, использовать данное вещество для верификации МПРЗ не имеет смысла.

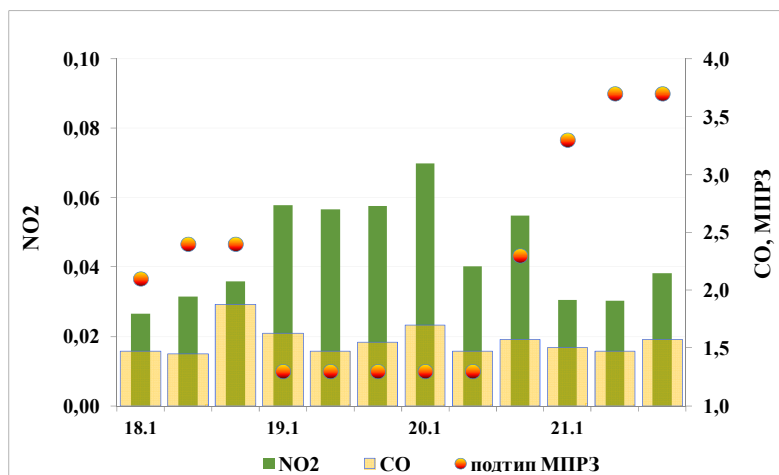


Рис. 4. Средняя по городу концентрация СО, NO₂, подтип МПРЗ. Курск. 18–21 января 2021 г. (в каждые сутки показаны данные в 7, 13 и 19 ч).

Fig. 4. Average in the city concentration of CO, NO₂, a subtype of MIPD. Kursk. January 18–21, 2021 (data showed for each day 7, 13 and 19 hours).

Из-за ограничений размера статьи примеры связей МПРЗ с загрязнением воздуха в других эпизодах и других городах планируется представить в будущих публикациях, подчеркивая при этом сложность установления связей по данным сетевых 3–4-разовых измерений концентраций загрязняющих веществ в сутки.

Вероятностный прогноз МПРЗ

Детерминированный прогноз МПРЗ зависит от ошибок прогнозов данных используемой для расчетов численной модели атмосферы (COSMO-Ru), как следствие несовершенных начальных условий, использования приближенных математических методов решения уравнений внутри модели и т. д. Неопределенность в прогнозе погоды и наиболее вероятный исход прогнозируемого события позволяют оценивать системы ансамблевого прогнозирования, которые сегодня применяются во многих прогностических центрах, в т. ч. в Гидрометцентре России [11]. Некоторые из них (мультимодельные) используют более одной модели внутри ансамбля, другие (мультифизические) – одну и ту же модель,

но с различными комбинациями схем физической параметризации или набором начальных данных [9].

Вероятностный прогноз позволяет специалисту видеть не только преобладающий вариант прогноза, но и предвидеть наиболее вероятные отклонения от этого прогноза. Для сопровождения прогноза МПРЗ информацией о вероятности наступления, в первую очередь, МПРЗ первого типа (НМУ), разработан алгоритм расчета вероятности каждого типа МПРЗ с применением множественного моделирования. В основу разработанного алгоритма положен анализ разброса величин МПРЗ при учете характерных величин ошибок каждого входящего в модель МПРЗ параметра (V_h, S_h, Pr, Adv) и определение вероятности наступления каждого типа МПРЗ ($P_{МПРЗ\ 1, 2, 3}$):

$$P_{МПРЗ\ 1, 2, 3} = m/n, \quad (2)$$

где m – число случаев, благоприятных осуществлению МПРЗ = 1, МПРЗ = 2, МПРЗ = 3; n – число всех равновозможных величин МПРЗ.

Разброс величин МПРЗ определялся исходя из допуска ошибок прогноза для скорости ветра ($V_h = \pm 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) и стратификации ($S_h = \pm 0,1 \text{ К}/100\text{м}$). Иллюстрацией реализованного алгоритма вероятностного прогноза МПРЗ могут служить приведенные в табл. 3 данные, где для каждого внутрисуточного интервала указана вероятность (%) каждого типа МПРЗ. Заливкой выделен наиболее вероятный прогноз типа МПРЗ, в т.ч. розовым цветом выделены периоды с преобладающими НМУ (МПРЗ = 1).

На основе прогноза вероятности типа МПРЗ можно получить экспресс-оценку общей ситуации по условиям рассеивания загрязняющих веществ и возможного формирования НМУ в регионе и отдельных городах. Покажем это на данных вероятностного прогноза на 5–6 августа 2021 г. (табл. 3). Правая, в основном окрашенная зеленым часть таблицы указывает на очевидное улучшение условий рассеивания утром 6 августа во всем указанном регионе – от Костромы до Курска. Слабое рассеивание с высокой вероятностью (70–100 %) будет преобладать уже вечером 5 августа на большей территории, за исключением северо-западных районов (Тверь – Ржев), а ночью НМУ сохранятся только в Смоленской, Тамбовской, Тульской и Липецкой областях. Следовательно, на большей части региона с высокой вероятностью кратковременные НМУ будут наблюдаться вечером и ночью. Наиболее неблагоприятная ситуация ожидается в Тульской области, где не исключена вероятность НМУ и в утренние часы.

С нашей точки зрения динамическая интерпретация вероятностного прогноза, т.е. анализ его временной динамики, может быть существенной помощью специалистам-практикам при принятии решения о составлении предупреждений о НМУ для предприятий и необходимости сокращения выбросов.

Таблица 3. Вероятностный прогноз МПРЗ в городах ЦФО на период с 11 ч 5.08 до 23 ч 6.08.21**Table 3.** Probabilistic forecast of MIPD for the cities of the Central Russia for the period from 11 h 5.08.2021 to 23 h 6.08.2021

Вероятностный прогноз типа МПРЗ на										5.08.2021								
Станции	Периоды прогноза																	
	день			вечер			ночь			утро			день			вечер		
	11-17 ч			18-23 ч			0-6 ч			7-10 ч			11-17 ч			18-23 ч		
	Тип МПРЗ																	
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Кострома	0	100	0	73	17	10	6	0	94	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Волгореченск	0	100	0	38	17	45	14	0	86	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Шарья	0	79	21	67	28	5	100	0	0	0	35	65	0	96	4	50	17	33
Курск	0	21	79	83	12	5	47	0	53	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Липецк	0	100	0	83	17	0	86	0	14	8	0	92	0	0	100	0	0	100
Орел	0	27	73	85	0	15	44	0	56	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Рязань	0	100	0	83	17	0	63	0	37	43	0	57	0	47	53	0	0	100
Новомичуринск	0	100	0	78	17	5	49	0	51	43	0	57	0	4	96	0	0	100
Касимов	14	86	0	100	0	0	96	0	4	75	0	25	0	14	86	33	0	67
Михайлов	0	100	0	12	22	66	53	0	47	0	0	100	0	29	71	0	0	100
Смоленск	0	0	100	67	33	0	86	0	14	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Вязьма	0	37	63	0	28	72	100	0	0	25	0	75	0	0	100	17	0	83
Тамбов	0	100	0	83	17	0	61	0	39	18	0	82	0	0	100	0	0	100
Тверь	0	71	29	0	22	78	43	0	57	3	97	0	0	33	67	0	0	100
Вышний Волочек	0	86	14	0	17	83	0	10	90	0	92	8	0	34	66	0	0	100
Ржев	0	20	80	0	0	100	43	4	53	25	18	57	0	0	100	0	0	100
Тула	14	82	4	83	17	0	76	0	24	50	0	50	14	49	37	5	3	92
Новомосковск	0	100	0	83	12	5	53	0	47	0	0	100	14	14	72	0	0	100
Узловая	0	100	0	83	17	0	67	0	33	50	0	50	0	10	90	0	0	100
Ясная Поляна	14	82	4	100	0	0	81	0	19	92	0	8	14	34	52	12	0	88
Ярославль	0	100	0	17	17	66	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Переславль-Зал.	0	100	0	66	17	17	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Рыбинск	0	96	4	0	23	77	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
Тутаев	0	100	0	50	28	22	14	0	86	0	0	100	0	0	100	0	0	100

	слабое рассеивание
	умеренное рассеивание
	интенсивное рассеивание

Заключение

Выполняемые в Гидрометцентре России исследования направлены на информационное обеспечение специалистов, выполняющих прогнозирование загрязнения воздуха и НМУ, метеорологическими данными и параметрами, рассчитанными по результатам конфигурации COSMO-Ru7 (или COSMO-Ru6,6) с временным разрешением 1 час с заблаговременностью до 72 часов. Реализована автоматизированная технология рассылки прогностической информации в сетевые подразделения Росгидромета.

Разработанный метод прогноза МПРЗ решением ЦМКП Росгидромета от 1 декабря 2017 г. рекомендован для использования в оперативной практике прогностических подразделений Росгидромета в качестве вспомогательного при прогнозировании загрязнения воздуха и НМУ. Проверка оперативных прогнозов в 17 городах (семь УГМС) на Европейской территории России стимулировала усовершенствование алгоритма расчета МПРЗ в части минимизации ошибок прогноза входящих метеорологических параметров.

Метод расчета МПРЗ верифицирован (2020–2021 гг.) с использованием данных автоматизированных измерений концентраций и сетевых 3–4-разовых измерений в Москве и некоторых крупных городах ЕТР. В эпизодах НМУ подтверждена связь идентифицируемого по МПРЗ слабого рассеивания с синхронизированным повышением уровня первичных загрязнений на городской территории.

Разработан и реализован алгоритм вероятностного прогноза МПРЗ в пунктах прогнозирования НМУ, позволяющий учитывать неопределенность прогноза при составлении предупреждений о НМУ и продолжительность неблагоприятных для очищения воздуха условий.

В Гидрометцентре России в ближайшем будущем будет проведен переход на расчеты с использованием прогностических данных COSMO-Ru6,6 на всей территории страны, для европейской территории возможны расчеты с использованием данных COSMO-Ru2,2.

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.6.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Лапченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе // Биосфера. 2014. Т. 6, № 4. С. 339–351. DOI:<http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v6i4.18>
2. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В. и др. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 784–792.
3. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В. и др. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 39–51.
4. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 424–434.
5. Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю. и др. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. С. 473–482.
6. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 203–218.
7. РД 52.04.306-92. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха.
8. 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., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 27–53.

9. Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию // ВМО-№ 1091. Женева: ВМО, 2012. 37 p.

10. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Березин Е.В. суточный ход загрязняющих воздух веществ по измерениям и расчетам химической транспортной модели // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2016. № 2 (360). С. 149-167.

11. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1740. P. 012070. DOI:10.1088/1742-6596/1740/1/012070

12. Bodor Z., Bodor K., Keresztesi Á., Szép R. Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM₁₀ in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania) // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 38181-38199. Doi.org/10.1007/s11356-020-09838-2

13. Cichowicz R., Stelęgowski A. Average Hourly Concentrations of Air Contaminants in Selected Urban, Town, and Rural Sites // Arch Environ Contam Toxicol. 2019. Vol. 77, no. 2. P. 197-213. DOI:10.1007/s00244-019-00627-8. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6606669/>

14. Cichowicz R., Wielgosiński G., Fetter W. Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season // Environ Monit Assess. 2017. Vol. 189. P. 605. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6319-2>

15. Habulan M., Đurin B., Ptiček A., Sakač N. Analysis of the Particulate Matter Pollution in the Urban Areas of Croatia // Environ. Sci. Proc. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 9. <https://doi.org/10.3390/ecas2020-08145>.

16. Toth I., Hercog P., Peternel R., Vojniković B. Seasonal, daily and intradiurnal variation of PM₁₀, NO₂, NO and O₃ in residential part of Zagreb, Croatia // Collegium antropologicum. 2011. Vol. 35. P. 25-30.

References

1. Vil'fand R.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Zvyagintsev A.M., Nakhaev M.I., Zakharova P.V., Lapchenko V.A. Air quality monitoring prognosis in Moscow region. *Biosfera*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 339-351 [in Russ.].

2. Gorchakov G.I., Semoutnikova E.G., Karpov A.V., Kolesnikova A.B., Baykova E.S., Zadorozhnaya O.S. Air pollution week-long cycle in Moscow: of refinement quantitative parameters and statistical forecasting of impurity concentration. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2010, vol. 23, no. 9, pp. 784-792 [in Russ.].

3. Elansky N.F., Belikov I.B., Skorokhod A.I., Lokoshchenko M.A., Trifanova A.V. On contents of trace in the atmospheric surface layer over Moscow. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 30-41. DOI: 10.1134/S000143381501003X.

4. Zvyagintev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Y., Tarasova O.A. Variations in the concentrations of main air pollutants in London. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, vol. 27, no. 5, pp. 417-427. DOI: 10.1134/S1024856014050170.

5. Kuznetsova I.N., Glazkova A.A., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Arkhangelskaya A.A., Zvyagintsev A.M., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Seasonal and diurnal variability of particulate matter PM 10 in surface air of Moscow habitable districts. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 473-482 [in Russ.].

6. Kusnetsova I.N., Shalygina I.U., Nahaev M.I., Tkacheva U.V., Rivin G.S., Kirsanov A.A., Borisov D.V., Lezina E.A. Air quality forecasting system based on chemical transport models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 203-218 [in Russ.].
7. RD 52.04.306-92. Okhrana prirody. Atmosfera. Rukovodstvo po prognozu zagryazneniya vozdukha [in Russ.].
8. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 27-53 [in Russ.].
9. Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. *WMO-No. 1091*. Geneva, WMO, 2012, 37 p.
10. Shalygina I.Y., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Konovalov I.B., Berezin E.V. The comparison of diurnal variations of air pollutants using measurements and calculations of a chemical transport model. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2016, vol. 360, no. 2, pp. 149-167 [in Russ.].
11. Astakhova E., Alferov D., Alferov Yu., Bundel A. Ensemble approach to weather forecasting. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1740, pp. 012070. DOI:10.1088/1742-6596/1740/1/012070.
12. Bodor Z., Bodor K., Keresztesi Á., Szép R. Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM₁₀ in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 38181-38199. DOI: 10.1007/s11356-020-09838-2.
13. Cichowicz R., Stełęgowski A. Average Hourly Concentrations of Air Contaminants in Selected Urban, Town, and Rural Sites. *Arch Environ Contam Toxicol.*, 2019, vol. 77, no. 2, pp. 197-213. DOI: 10.1007/s00244-019-00627-8.
14. Cichowicz R., Wielgosiński G., Fetter W. Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season. *Environ Monit Assess.*, 2017, vol. 189, p. 605. DOI: 10.1007/s10661-017-6319-2.
15. Habulan M., Đurin B., Ptiček A., Sakač N. Analysis of the Particulate Matter Pollution in the Urban Areas of Croatia. *Environ. Sci. Proc.*, 2021, vol. 4, no. 1, p. 9. DOI: 10.3390/ecas2020-08145.
16. Toth I., Hercog P., Peternel R., Vojniković B. Seasonal, daily and intradiurnal variation of PM₁₀, NO₂, NO and O₃ in residential part of Zagreb, Croatia. *Collegium antropologicum*, 2011, vol. 35, pp. 25-30.

Поступила 25.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 25.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-150-161>

УДК 504.3.054

**Уточнение данных о землепользовании
для расчетов эмиссий
в химической транспортной модели CHIMERE
на примере нижегородского региона**

Д.В. Борисов, И.Ю. Шалыгина

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

Успешность расчетов концентраций загрязняющих веществ химической транспортной модели (ХТМ) во многом зависит от достоверности используемых данных о выбросах в атмосферу. На примере нижегородского региона обсуждается возможность уточнения полей эмиссий ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation Programme) для расчетов химической транспортной модели CHIMERE с использованием геоинформационных данных OpenStreetMap. Процедура уточнения используемых данных о землепользовании GlobCover с помощью OpenStreetMap обеспечила увеличение доли городских территорий в регионе на 3,3 % и приближение конфигурации поля эмиссий к реальному распределению источников выбросов в атмосферу. Экспериментальные расчеты концентраций загрязняющих веществ на основе химической транспортной модели CHIMERE с начальными и уточненными полями эмиссий показали эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: эмиссии, ЕМЕР, землепользование, OpenStreetMap, химическая транспортная модель CHIMERE, качество воздуха

**Refinement of land use data
for emission calculations in the CHIMERE
chemistry-transport model:
A case study for the Nizhny Novgorod region**

D.V. Borisov, I.U. Shalygina

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

The quality of calculating the concentration of pollutants in the chemistry-transport model largely depends on the reliability of used emission data. The possibility of updating the EMEP (European Monitoring and Evaluation Program) emission data using OpenStreetMap geodata for the CHIMERE chemistry-transport model calculations is discussed on the example of the Nizhny Novgorod region. The GlobCover land-use data refinement procedure based on OpenStreetMap information provides a 3.3% increase in the urban area and a more accurate configuration of the emission field as compared to the real distribution of sources of atmospheric emissions. Experimental CHIMERE

chemistry-transport model calculations of pollutant concentrations based on the initial and updated emission fields demonstrated the efficiency of the proposed approach.

Keywords: emissions, EMEP, land use, OpenStreetMap, CHIMERE chemistry-transport model, air quality

Введение

Оценка и прогноз качества воздуха остаются актуальными задачами. Современным инструментом прогноза концентраций загрязняющих веществ являются химические транспортные модели [11]. В рамках европейского проекта Copernicus для прогнозирования качества воздуха используется ансамбль химических транспортных моделей (XTM) включающий XTM CHIMERE, EMEP, EURAD-IM, LOTOS-EUROS, MATCH, MOCAGE, SILAM, DEHM, GEM-AQ (http://macc-raq-op.meteo.fr/index.php?category=ensemble&subensemble=hourly_ense). Кроме концентраций основных загрязняющих веществ рассчитываются также индексы качества воздуха, перенос пылицы и продуктов горения пожаров.

XTM CHIMERE уже около 10 лет используется для прогноза качества воздуха в Москве на вычислительной платформе ФГБУ «Гидрометцентр России». Сегодня расчеты проводятся для отдельных областей Европейской части России на основе CHIMERE версии 2013b [13] с шагом сетки по горизонтали $0,038 \times 0,02^\circ$. Для расчетов XTM CHIMERE используются данные об эмиссиях ЕМЕП (European Monitoring and Evaluation Programme) [6] в узлах регулярной сетки $0,5 \times 0,5^\circ$ [5], а также прогностические данные модели COSMO-Ru2 с горизонтальным разрешением около $0,02^\circ$ [2].

Свободный доступ к данным эмиссий ЕМЕП (<https://www.ceip.at>) дает возможность редактировать содержимое этой базы. Проведенные эксперименты по пространственной коррекции данных ЕМЕП на территории московского региона обсуждаются в [4], где показано, что уточненное поле эмиссий в определенной мере отражает городскую структуру выбросов. Но такой подход может применяться для устранения грубых неточностей в пространственном распределении эмиссий.

Пространственному разрешению модели атмосферы и XTM должна соответствовать и степень детализации подстилающей поверхности, т. е. типов землепользования и растительного покрова.

Сегодня во многих XTM для территории Европы применяется база данных о землепользовании CORINE [12], в которой с разрешением 250 м различаются более 40 типов поверхностей. В CORINE описываются шесть типов городской и индустриальной подстилающей поверхности.

Для территории России доступны две базы данных о землепользовании: GlobCover (GlobCover Land Cover) [5] и GLCF (Global Land Cover Facility) [9]. База данных GLCF имеет разрешение 1×1 км, разработана Отделом Университета Географии Мэриленда (<http://www.landcover.org>).

На основе спутниковых снимков произведен учет 14 классов почвенно-растительного покрова.

База данных GlobCover имеет разрешение по горизонтали примерно 300×300 метров. GlobCover содержит уже 22 класса земного покрова, разработана по инициативе Европейского космического агентства (<http://due.esrin.esa.int/globcover/>).

Встроенной в модель XTM CHIMERE процедурой данные ЕМЕР, представленные на регулярной сетке (Мг/ячейка/год), пересчитываются на сетку XTM с учетом типов землепользования GlobCover. В этой базе данных землепользования городским территориям соответствует только один тип – «искусственные поверхности и связанные с ними территории (городские территории >50 %)».

В данной работе обсуждается возможность уточнения поля эмиссий с применением современной геоинформационной системы OpenStreetMap. Данные этого веб-ресурса использовались рядом исследователей для различных задач. Так, в [3] приведены оценки применимости данных OpenStreetMap для задания параметров городской поверхности, используемых для моделирования городского «острова тепла», и подробно описана технология моделирования городских каньонов с использованием данных OSM. В [14] описана технология ГИС-обработки данных OpenStreetMaps для расчетов метеорологических параметров по городским территориям в модели атмосферы COSMO.

Эксперимент по уточнению начальных данных о землепользовании методом классификационной коррекции архивных спутниковых изображений с применением классификатора максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Classifier, MLC) описан в [8]. В [7] показана обработка спутниковых изображений земли нейронной сетью с целью получения качественных данных о землепользовании. Объединение нескольких наборов данных о землепользовании с различным разрешением и проведение переклассификации для получения единого кадастра данных о землепользовании, охватывающего большую часть территории Европы, проиллюстрировано в [10].

Наши исследования с применением OpenStreetMap для уточнения пространственного и количественного распределения выбросов в атмосферу проведены для территории Нижнего Новгорода и прилегающих окрестностей – крупного промышленного региона с населением около 1,5 млн.

Анализ полей эмиссий ЕМЕР на территории Нижнего Новгорода с использованием данных о землепользовании GlobCover

Анализ поля эмиссий для территории Нижнего Новгорода, полученного путем интерполяции данных кадастра ЕМЕР на основании данных о землепользовании GlobCover на расчетную модельную сетку $2,4 \times 2,2$ км,

и непосредственно пространственного распределения «городских» ячеек кадастра GlobCover (300×300 м) представлен на рис. 1.

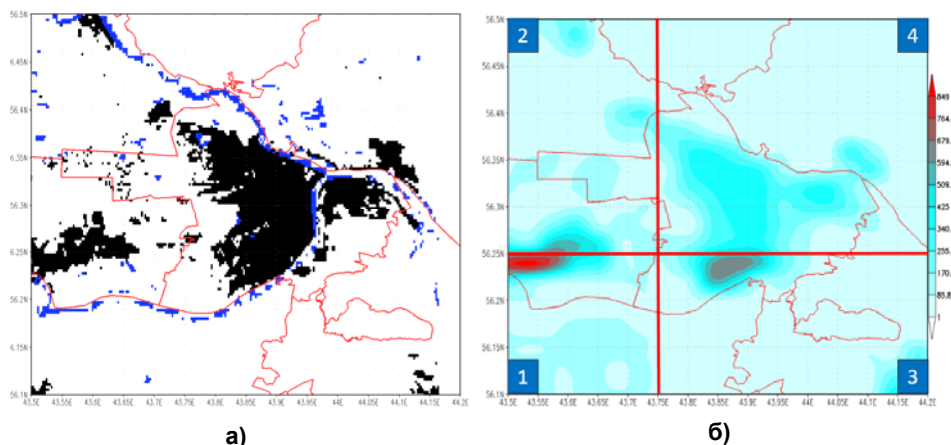


Рис. 1. «Городские» ячейки кадастра GlobCover 300×300 м – показано черным (а); эмиссий CO для территорий Нижнего Новгорода (г/ч, на сетке 2,4×2,2 км) (б).

Fig. 1. GlobCover inventory "urban" 300×300 m cells (a); CO emissions for the territories of Nizhny Novgorod (g / h, 2.4×2.2 km grid) (б).

Поле эмиссий (рис. 1б) по своей конфигурации совпадает с конфигурацией городских ячеек в кадастре землепользования (рис. 1а), на юге города выделяется в поле эмиссий локальный максимум.

Анализ данных из открытых источников [1] о распределении основных источников выбросов в Нижнем Новгороде позволил установить, что на юге города не сосредоточены более крупные автотранспортные развязки и промышленные предприятия, чем в других частях города, т. е. столь выраженный максимум выбросов в этой части города не обоснован. Часть территорий, входящих в границы города, в кадастре не описаны как городские, на окраинах города уровень эмиссий рассчитывается как фоновый, т. е. пространственное распределение выбросов напрямую зависит от данных о землепользовании. На рис. 1б приведено поле эмиссий CO, по другим веществам – NO_x, PM, SO₂ – конфигурация полей совпадает с приведенным.

Процедура уточнения данных о землепользовании

Сопоставление данных о землепользовании GlobCover проводилось с использованием геоинформационных данных OpenStreetMap – ниже OSM (<https://www.openstreetmap.org>) компании NextGIS (<https://nextgis.ru/>), которая занимается обработкой данных с целью их дальнейшего использования в различных проектах.

Анализ данных проведен по домену, охватывающему территории Нижнего Новгорода, Дзержинска и ближайших к ним населенных пунктов. Координаты границ домена: 43,5–44,2° в. д., 56,1–56,5° с. ш. (рис. 1а).

Геоинформационные данные OSM представлены в виде «полигонов» – произвольных многоугольников с координатами их вершин. В базе OSM тип землепользования обозначен для каждого полигона. Используемые данные GlobCover представлены в узлах регулярной сетки с типом землепользования. Различия структуры двух баз данных усложняет их сопоставление.

Технология анализа и сравнения данных о землепользовании и их дальнейшего уточнения включает в себя несколько этапов.

Сначала подготавливаются и обрабатываются входные данные. Координаты узлов сетки GlobCover для заданного домена и значения землепользования, принадлежащие им, считываются из кадастра с использованием «NetCDF функций», записанных в предустановленной библиотеке «NetCDF». Координаты узлов сетки записываются в отдельный файл.

С сайта NextGIS (<https://nextgis.ru>) скачивается набор данных OSM. Набор данных представлен в виде файла формата «csv» – таблицы с набором точек, принадлежащих вершинам полигонов (многоугольников). Для каждого из полигонов обозначен один из типов землепользования и другие атрибуты.

Координаты узлов сетки GlobCover и набор данных OSM переводятся в текстовый формат. Дальнейшая обработка входных данных производится по программе, написанной на языке «Python».

Формируются две базы данных: GlobCover с координатами полного набора узлов домена со значениями землепользования и вторая база с координатами полигонов OSM и их типами. База данных OSM включает описание 33 типов полигонов (таблица).

Визуализация полей данных OSM с двумя типами полигонов «жилые угодья» и «промышленные зоны» и сравнение их с данными кадастра GlobCover (рис. 2) позволили в первом приближении установить, что часть территории Нижнего Новгорода, описанная в базе OSM как территории, потенциально содержащие антропогенные выбросы, в базе GlobCover не отмечены как городская территория.

После анализа 33 типов землепользования OSM отобрано 14 типов (таблица, выделено полужирным шрифтом), наиболее соответствующих «городским», а именно территории, потенциально содержащие антропогенные выбросы: жилые угодья, наделы, промышленные зоны, коммерческие территории, гаражи, строительство, железная дорога, военные территории, карьер, добыча торфа, свалка, депо, логистика. После анализа вклада каждого из типов полигонов установлено, что для города наибольший вклад по охвату неописанных как городские территории в базовом кадастре имеют два типа полигонов – жилые угодья и промышленные зоны (рис. 2а, б). Именно эти типы полигонов и выбраны для уточнения базы GlobCover.

Таблица. Типы землепользования базы геоинформационных данных OpenStreetMap

Table. Land use types of the OpenStreetMap geoinformational database

№	Название полигона	№	Название полигона
1	Жилые угодья	18	Тепличное растениеводство
2	Наделы	19	Добыча торфа
3	Промышленные зоны	20	Свалка
4	Луга	21	Зона отдыха
5	Сельхоз угодья	22	Поля
6	Трава	23	Депо
7	Коммерческие территории	24	Животноводство
8	Гаражи	25	Заброшенные территории
9	Строительство	26	«Религиозные» территории
10	Кладбище	27	Клумба
11	Железная дорога	28	Церковные территории
12	Розничная торговля	29	Лесозаготовки
13	Бассейн	30	Ферма
14	Резервуар	31	Аквакультура
15	Военные территории	32	Логистика
16	Карьер	33	Каток
17	Питомники растений		

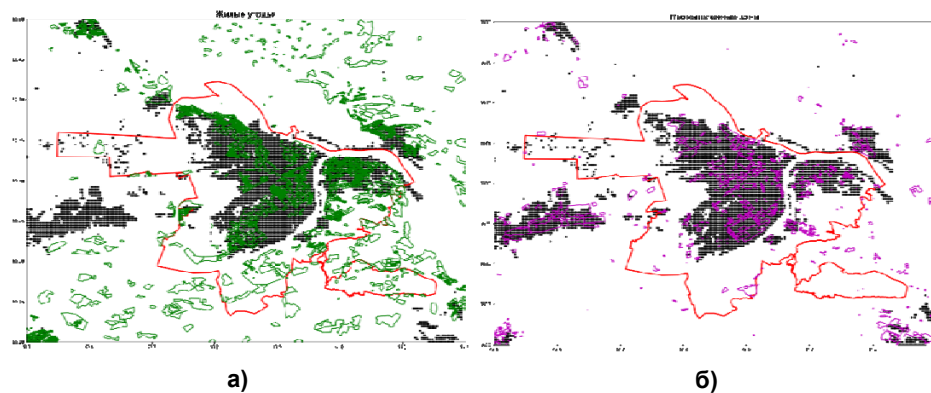


Рис. 2. Пространственное распределение полигонов отдельных типов землепользования базы OpenStreetMap и «городских» узлов базы GlobCover (черные точки): жилые угодья (а); промышленные зоны (б).

Fig. 2. Spatial distribution of individual land use types polygons in the OpenStreetMap base and "urban" cells of the GlobCover base (black dots): residential areas (а); industrial zones (б).

Затем проводится уточнение данных кадастра GlobCover, проверка каждого узла на попадание в отобранные «городские» полигоны OSM. Способ определения принадлежности каждого узла «городскому» полигону основан на методе трассировки луча, применяемом в вычислительной геометрии. После проверки результаты отработки алгоритма уточнения данных кадастра GlobCover верифицируются визуально с использованием библиотеки Python «Matplotlib». При удовлетворительной отработке алгоритма список узлов, попавших в «городские» полигоны, добавляется к исходному набору узлов GlobCover; обновленный список узлов сохраняется в виде текстового файла.

По сохраненному списку на последнем этапе технологии обновляется оригинальный кадастр GlobCover с использованием «NetCDF функций».

Обсуждение результатов эксперимента

Результаты проведенного эксперимента по уточнению данных о землепользовании кадастра GlobCover представлены на рис. 3. Количество городских узлов сетки для заданного домена увеличилось с 5038 до коррекции до 8142 после.

На основании скорректированного кадастра данных о землепользовании GlobCover был произведен перерасчет годовых эмиссий ЕМЕР на расчетную модельную сетку 2 км. На рис. 3 приводится обновленное поле «городских» ячеек кадастра GlobCover и поле эмиссий CO, рассчитанное на основании уточненного кадастра.

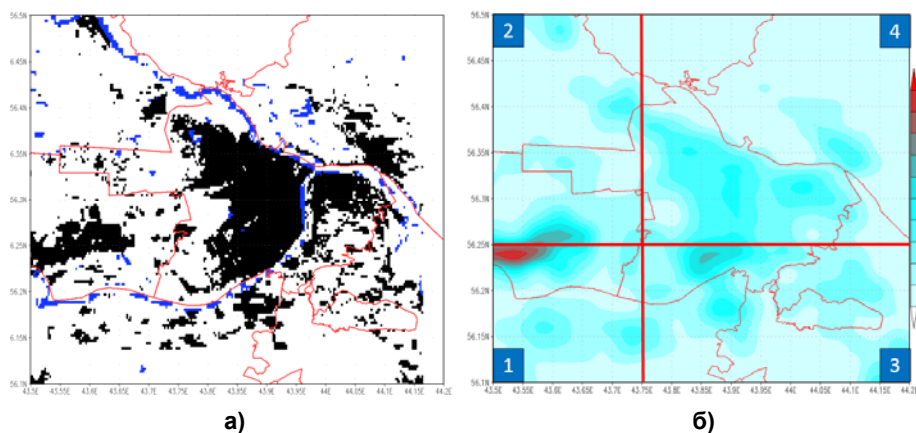


Рис. 3. Поле «городских» ячеек обновленного кадастра GlobCover 300×300 м (а); эмиссий CO для территорий г. Нижний Новгород на сетке 2,4×2,2 км (г/ч, цифрами обозначены ячейки кадастра ЕМЕР, охватывающие территорию Нижнего Новгорода) (б).

Fig. 3. Field of "urban" 300 × 300 m cells of the updated GlobCover inventory (a); CO emissions for the territories of Nizhny Novgorod on a 2.4×2.2 km grid (g/h, numbers indicate cells of the EMEP inventory covering the territory of Nizhny Novgorod) (b).

При сравнении полей эмиссий до и после их уточнения (рис. 1б, 3б) видно, что поле эмиссий, рассчитанное после уточнения данных о землепользовании, имеет более сглаженный вид, а территорий, определенных как урбанизированные, в черте города стало больше (рис. 1а, 3а). Заметно сглаживание выраженного максимума эмиссий в южной части города. Это связано с тем, что для территорий, которые охватывают ячейки ЕМЕР (на рис. 3б границы базовых ячеек ЕМЕР $0,5 \times 0,5^\circ$ показаны красной линией и пронумерованы), в которых заложены выбросы для территории Нижнего Новгорода, был повышен процент «городских» ячеек, на которые распределяется большая часть объемов выбросов основных загрязнителей. Процент «городских» узлов до коррекции в первой ячейке ЕМЕР – 2,26 %, после – 3,12 %; во второй ячейке до – 4,71 %, после – 5,3 %; в третьей ячейке до – 2,16 %, после – 5,53 %; в четвертой ячейке до – 9,89 %, после – 12,24 %. Также можно заметить, что в западной части экспериментального домена (г. Дзержинск) максимум объемов выбросов практически не изменился, что объясняется небольшим повышением доли «городских» узлов в первой ячейке кадастра ЕМЕР.

Экспериментальные расчеты XTM CHIMERE с начальным и уточненным полем эмиссий (рис. 4) позволяют сделать вывод о том, что несмотря на незначительное изменение поля землепользования (в условной ячейке 4 ЕМЕР, куда попадает основная часть Нижнего Новгорода, «городских» узлов стало больше на 2,35 %) расчетные поля концентраций на сетке 2 км оказались к этим изменениям чувствительны. Это показано на примере расчетных полей концентраций NO_2 (рис. 4а, б). В то же время экспериментальные расчеты на сетке 11 км (рис. 4в, г) показали малую чувствительность полей концентраций на изменение поля эмиссий. Схожие результаты получены и для других основных загрязняющих веществ (CO , PM_{10}).

Выводы

Открытый доступ к зарубежным базам эмиссий позволяет использовать их для расчетов XTM на территории России, сравнивать кадастровые данные с официальной статистикой, уточнять и адаптировать существующие данные.

На примере нижегородского региона отработана и описана технология уточнения землепользования GlobCover с использованием геоинформационных данных OpenStreetMap. За счет предложенной коррекции распределения «городских» узлов кадастра GlobCover увеличена доля городских территорий на 0,6–3,3 %. Благодаря уточнению поля типов землепользования, изменилось и приблизилось к реальному расположению источников выбросов в атмосферу начальное поле эмиссий на модельной сетке 2×2 км. Экспериментальные расчеты концентраций загрязняющих веществ в нижегородском регионе с помощью химической

транспортной модели CHIMERE с начальными и уточненными полями эмиссий показали эффективность примененного подхода.

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 4.7.2.

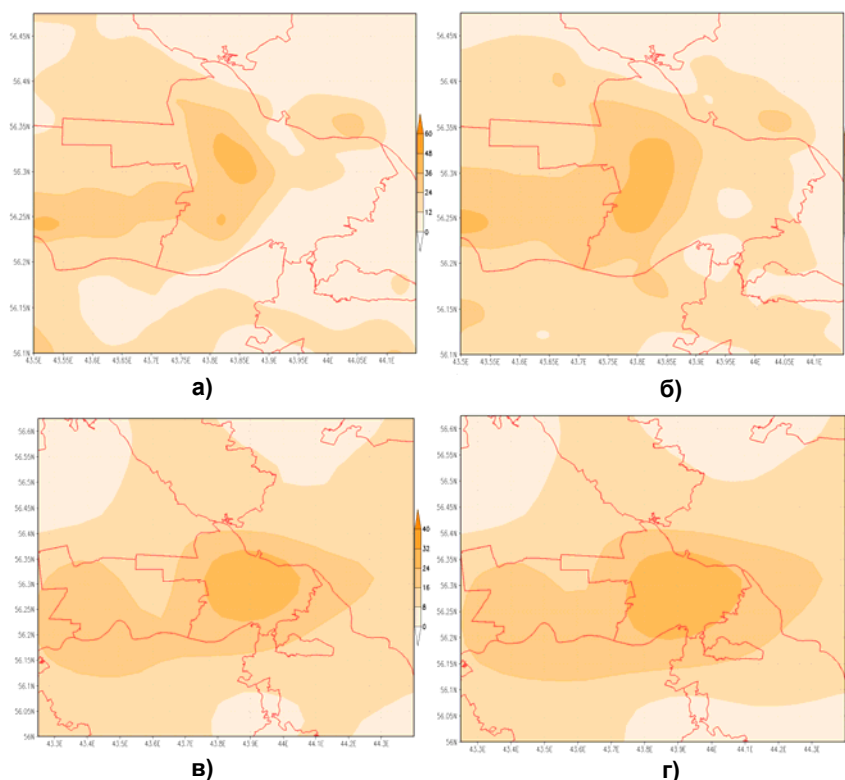


Рис. 4. Рассчитанное XTM CHIMERE поле концентраций NO_2 ($\mu\text{кг}/\text{м}^3$) до (а) и после (б) уточнения землепользования, расчетная сетка XTM 2 км; до (в) и после (г) уточнения, расчетная сетка XTM 11 км, г. Нижний Новгород 21 ч. 25.06.2021.

Fig. 4. The field of NO_2 concentrations calculated by the CTM CHIMERE ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) before (a) and after (б) land use data clarification; before (в) and after (г) land use data clarification, 11 km CTM grid, Nizhny Novgorod 9 p.m. 06.25.2021.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/.

2. 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., Полюхов А.А., Ревокатова А.П.,

Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 27-53.

3. Самсонов Т.Е., Варенцов М.И. Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 112-119.

4. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Эффективность коррекции эмиссий для расчетов химической транспортной модели CHIMERE в московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 441-447.

5. Bicheron P, Amberg V, Bourg Ludovic, Petit David, Huc M, Miras B, Brockmann Carsten, Steven Delwart, Ranéra F, Hagolle Olivier, Leroy Marc, Arino O. Geolocation assessment of 300m resolution MERIS GLOB-COVER ortho-rectified products // In Proceedings of MERIS/AATSR Colloque, Frascati. 2008.

6. Alexey Gusev, Victor Shatalov, Olga Rozovskaya, Nadejda Vulykh, Wenche Aas, Knut Breivik, Florian Couvidat, Marta Garcia Vivanco. Assessment of POP pollution in EMEP region: current progress and further activities. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2018/Air/EMEP/EMEP_MSC-E_POPs.pdf

7. Ali Jamali. Improving land use land cover mapping of a neural network with three optimizers of multi-verse optimizer, genetic algorithm, and derivative-free function // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. 2020.

8. Ameer K. Thakkar, Venkappayya R. Desai, Ajay Patel, Madhukar B. Potdar. Post-classification corrections in improving the classification of Land Use/Land Cover of arid region using RS and GIS: The case of Arjuni watershed, Gujarat, India // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. 2017. Vol. 20 (1). P. 79-89.

9. Hansen M.C., Reed B. A comparison of the igbp discover and university of maryland 1 km global land cover products // Int. J. Remote Sens. 2000. Vol. 21. P. 1365-1373.

10. Konstantin Rosina, Filipe Batista e Silva, Pilar Vizcaino, Mario Marin Herrera, Sérgio Freire & Marcello Schiavina. Increasing the detail of European land use/cover data by combining heterogeneous data sets // International Journal of Digital Earth. 2018.

11. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M. et al. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // Atmos. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. P. 1-87.

12. Manakos I., Braun M. Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2014, 441 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3>.

13. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M. et al. CHIMERE-2013: a model for regional atmospheric composition modelling // Geosci. Model Dev. 2013. Vol. 6. P. 981-1028. DOI:10.5194/gmd-6-981-2013.

14. Valeria Garbero, Massimo Milelli, Edoardo Bucchignani, Paola Mercogliano, Mikhail Varentsov, Inna Rozinkina, Gdaliy Rivin, Denis Blinov, Hendrik Wouters, Jan-Peter Schulz, Ulrich Schättler, Francesca Bassani, Matthias Demuzere, Francesco Repola. Evaluating the Urban Canopy Scheme TERRA_URB in the COSMO Model for Selected European Cities // Atmosphere. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 237.

References

1. Gosudarstvennyj doklad O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj federacii. [Electronic resource]. Available at: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/. [in Russ.].
2. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 27-53 [in Russ.].
3. Samsonov T.E., Varencov M.I. Determination of the parameters of the urban environment of the Moscow metropolis for a detailed numerical weather COSMO model forecast. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 7, pp. 112-119.
4. Shalygina I.Y., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I., Borisov D.V., Lezina E.A. Emission correction efficiency for calculations in the CHIMERE chemical transport model in the Moscow region. *Optika Atmosfery i Okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2020, vol. 33, no. 6, pp. 441-447 [in Russ.].
5. Bicheron P., Amberg V., Bourg Ludovic, Petit David, Huc M, Miras B, Brockmann Carsten, Steven Delwart, Ranéra F, Hagolle Olivier, Leroy Marc, Arino O. Geolocation assessment of 300m resolution MERIS GLOB-COVER ortho-rectified products // In Proceedings of MERIS/AATSR Colloque, Frascati. 2008.
6. Alexey Gusev, Victor Shatalov, Olga Rozovskaya, Nadejda Vulykh, Wenche Aas, Knut Breivik, Florian Couvidat, Marta Garcia Vivanco. Assessment of POP pollution in EMEP region: current progress and further activities. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2018/Air/EMEP/EMEP_MSC-E_POPs.pdf
7. Ali Jamali. Improving land use land cover mapping of a neural network with three optimizers of multi-verse optimizer, genetic algorithm, and derivative-free function // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2020.
8. Ameer K. Thakkar, Venkappayya R. Desai, Ajay Patel, Madhukar B. Potdar. Post-classification corrections in improving the classification of Land Use/Land Cover of arid region using RS and GIS: The case of Arjuni watershed, Gujarat, India // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. 2017. Vol. 20 (1). P. 79-89.
9. Hansen M.C., Reed B. A comparison of the igbp discover and university of maryland 1 km global land cover products. *Int. J. Remote Sens.*, 2000, vol. 21, pp. 1365-1373. doi: 10.1080/014311600210218
10. Konstantin Rosina, Filipe Batista e Silva, Pilar Vizcaino, Mario Marín Herrera, Sérgio Freire & Marcello Schiavina. Increasing the detail of European land use/cover data by combining heterogeneous data sets // International Journal of Digital Earth. 2018.
11. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M.. et al. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, vol. 12, pp. 1-87.
12. Manakos I., Braun M. Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2014, 441 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969>.

13. Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M. et al. CHIMERE-2013: a model for regional atmospheric composition modelling. *Geosci. Model Dev.*, 2013, vol. 6, pp. 981-1028. DOI:10.5194/gmd-6-981-2013.

14. Valeria Garbero, Massimo Milelli, Edoardo Bucchignani, Paola Mercogliano, Mikhail Varentsov, Inna Rozinkina, Gdaliy Rivin, Denis Blinov, Hendrik Wouters, Jan-Peter Schulz, Ulrich Schättler, Francesca Bassani, Matthias Demuzere, Francesco Repola. Evaluating the Urban Canopy Scheme TERRA_URB in the COSMO Model for Selected European Cities. *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 237, <https://doi.org/10.3390/atmos12020237>

Поступила 25.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.

Submitted 25.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-162-171>

УДК 551.5

Международные требования к компетенции метеорологов-прогнозистов

Е.В. Васильев

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

Представлены требования к компетенции метеорологов-прогнозистов, а также знания и навыки, необходимые для их выполнения, разработанные и рекомендованные к практическому использованию Всемирной метеорологической организацией. Изложены основные навыки работы с радиолокационной информацией и спутниковыми данными. Подчеркивается важность соответствия метеорологов представленным требованиям, а также необходимость надлежащей оценки компетенций и, при необходимости, дальнейшего обучения и повышения квалификации в целях улучшения качества прогнозов погоды и штормовых предупреждений.

Ключевые слова: компетенции, метеорологи-прогнозисты, прогноз погоды, знания и навыки, оценка компетенций, повышение квалификации

International Competency Requirements for Public Weather Forecasters

E.V. Vasil'ev

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

Competency requirements for public weather forecasters, as well as knowledge and skills necessary for their implementation, that were developed and recommended for practical use by the World Meteorological Organization, are presented. Basic skills of working with radar and satellite data are described. The importance of the weather forecaster competency compliance with the presented requirements is emphasized, as well as a need for proper competency assessment and, if necessary, further training in order to improve the quality of weather forecasts and storm warnings.

Keywords: competency, weather forecasters, weather forecasting, knowledge and skills, competency assessment, training

Введение

Несмотря на значительный прогресс в средствах наблюдений, а также инструментах и методах численного прогноза погоды в последние десятилетия, роль метеоролога-прогнозиста при анализе, интерпретации,

обобщении разнородных и зачастую противоречащих друг другу данных остается ключевой и определяет качество выпускаемых прогнозов погоды и предупреждений об опасных и неблагоприятных явлениях [1]. Чем более компетентен синоптик, тем лучше он способен использовать свои знания и навыки, доступные данные наблюдений и прогностическую информацию в целях обеспечения высокого качества прогнозирования. Это особенно важно в свете современных требований к высокой детальности и частоте обновления прогнозов.

В связи с вышесказанным Всемирная метеорологическая организация (ВМО) провела документирование компетенций метеорологического персонала [4]. Международная гармонизация и стандартизация являются важным аспектом метеорологической деятельности, способствующим повышению качества прогнозирования как в глобальном масштабе, так и на уровне отдельных национальных гидрометеорологических служб. Документ [4] опубликован ВМО в 2019 году на английском языке и до настоящего времени не переведен на русский. В связи с этим видится важным ознакомить читателей журнала и специалистов в области метеорологии с современными международными требованиями к квалификации метеорологов-прогнозистов. Помимо компетенций синоптиков, предоставляющих метеорологическое обслуживание населения (*public weather forecasters*), в [4] изложены компетенции специалистов, представляющих прогнозы на радио, телевидении и в других СМИ, специалистов, ответственных за разработку и доведение до потребителей метеорологической и гидрологической продукции и услуг, советников, участвующих в деятельности по предотвращению и смягчению последствий стихийных бедствий, авиационных метеорологов (синоптиков и наблюдателей), лиц, осуществляющих обучение в области метеорологии, специалистов, эксплуатирующих информационные системы ВМО, морских синоптиков, специалистов, представляющих климатическое обслуживание, а также персонала, осуществляющего метеорологические наблюдения, установку, поддержку и калибровку измерительного оборудования, специалистов, управляющих наблюдательными программами и сетями. В настоящей работе изложены только компетенции метеорологов-прогнозистов, предоставляющих метеорологическое обслуживание населения (прогнозы общего назначения и специализированные прогнозы для конкретных потребителей).

Компетенции метеоролога-прогнозиста

Технический регламент ВМО [3] определяет компетенцию как знания, профессиональные навыки и модели поведения, требуемые для выполнения конкретных задач при осуществлении должностных обязанностей. Приобретение компетенции требует постоянного обучения и подготовки в конкретной профессиональной области на протяжении всей карьеры специалиста.

Компетенции определяют то, что, а не каким образом должно быть сделано, описывая базовые требования для успешной работы. Компетенции сформулированы таким образом, чтобы со временем не требовалось их значительное изменение, формулировки не зависят от используемых технологий и институциональных особенностей, т. е. являются универсальными.

Основой компетенций метеоролога являются базовые фундаментальные знания, полученные с помощью основного и дополнительного образования, которые в свою очередь являются частью утвержденного ВМО пакета обязательных программ для метеорологов ВР-М [2].

На уровень выше базовых знаний находятся навыки широкого применения, такие как коммуникация, работа в команде, лидерство и др., а также модели поведения (жизненные установки), такие как ответственность, этичное отношение к окружающим, стремление к высокому качеству и др. Также сюда относятся такие общие навыки, как работа с компьютером, навыки письма, научно-исследовательские и управленческие навыки. Совокупность вышеуказанных навыков также называют базовыми компетенциями.

Верхним уровнем пирамиды компетенций являются специализированные технические компетенции. Они включают в себя конкретные задачи, которые необходимо решать для исполнения должностных обязанностей, а также необходимые для этого фундаментальные навыки и знания. Ниже речь пойдет именно о технических компетенциях.

Каждая из компетенций высшего уровня, которые представляют собой утверждения, формулирующие общую компетенцию, которую должны демонстрировать отдельные специалисты или их группы (включены в Технический регламент ВМО [3] в качестве международных норм), помимо названия, состоит из трех разделов:

- описание компетенции: содержит более подробную информацию, полнее раскрывает, дополняет и уточняет формулировку компетенции высшего уровня, отвечает на вопросы “что?”, “когда?” и “как?”;

- критерии или компоненты эффективности: конкретные шаги в выполнении задачи. Они начинаются с глаголов, уточняют формулировку высшего уровня, дополнительно разграничивают обязанности и описывают ряд ситуаций, относятся к конкретной технической области;

- знания и навыки: представляют собой фундаментальные знания и навыки, необходимые для данной компетенции, т. е. для выполнения должностных функциональных обязанностей; для каждого компонента эффективности имеются предполагаемые навыки и знания; сюда также можно отнести такие вспомогательные практические навыки, как навыки и знания в области численного прогноза погоды (ЧПП), использования спутниковой и радиолокационной информации и т. д., а также общие навыки работы, не являющиеся исключительными для метеорологии, такие как аналитические навыки, навыки решения задач, управления персоналом, способности к командной работе.

Далее представлены компетенции высшего уровня для метеорологов-прогнозистов, а также соответствующие раскрывающие их содержание описания, компоненты эффективности и необходимые базовые знания и навыки.

Компетенция 1. Анализ и постоянный мониторинг меняющихся метеорологических условий.

Описание компетенции: Наблюдения и прогнозы метеорологических параметров и значительных метеорологических явлений непрерывно анализируются и контролируются в целях определения необходимости выпуска, отмены или корректировки/обновления прогнозов и предупреждений в соответствии с установленными нормативными документами пороговыми значениями, протоколами и правилами.

Компоненты эффективности:

1. Анализировать, интерпретировать и диагностировать имеющуюся информацию для выявления особенностей метеорологических условий в зоне ответственности прогноза.

2. Осуществлять мониторинг метеорологических параметров и развивающихся значительных метеорологических явлений, а также оценивать выпущенные прогнозы и предупреждения на основе этих параметров.

3. Оценивать необходимость внесения коррективов в прогнозы и обновления предупреждений в соответствии с установленными критериями и пороговыми значениями.

4. Осуществлять мониторинг информации, связанной с последствиями последних метеорологических явлений.

Базовые знания и навыки:

1. Осознание важности работы гидрометеорологической службы и понимание возможных последствий прогнозов и предупреждений для пользователей и лиц, принимающих решения, в частности для общественной безопасности.

2. Понимание ключевых элементов синоптической, динамической и физической метеорологии, а также основных аналитических и диагностических навыков, по крайней мере до уровня VIP-M.

3. Применение теории, методов и практических навыков метеорологического анализа и диагноза.

4. Способность визуализировать и анализировать метеорологическую информацию в нескольких измерениях (пространственном и временном).

5. Оценка влияния рельефа, растительного покрова и, при наличии, водоемов и снежного покрова на местные метеорологические условия.

6. Интерпретация данных натурных и дистанционных (спутниковых, радиолокационных) наблюдений.

7. Понимание характеристик метеорологических датчиков и приборов.

8. Знакомство с процедурами получения, обработки и усвоения метеорологических данных, включая контроль качества.

9. Понимание процедур, стандартов и технических регламентов получения продукции, основанной на данных наблюдений, прогнозов и предупреждений.

Компетенция 2. Прогноз метеорологических явлений и параметров.

Описание компетенции: прогнозы метеорологических явлений и параметров подготавливаются и выдаются в соответствии с установленными требованиями, приоритетами и сроками.

Компоненты эффективности:

1. Прогнозировать метеорологические явления и параметры, используя соответствующие инструменты и учитывая неопределенность прогноза.

2. Обеспечивать подготовку и выпуск прогнозов в соответствии с национальной или региональной практикой, соответствующими наставлениями и техническими регламентами в отношении их содержания, точности и своевременности.

3. Обеспечивать, насколько это практически возможно, согласованность прогнозов метеорологических явлений и параметров (в пространстве и времени) в пределах зоны ответственности.

4. Отслеживать прогнозы, выпущенные для других регионов, и поддерживать связь с соседними регионами.

Базовые знания и навыки:

1. Владение основными диагностическими и прогностическими навыками уровня ВР-М.

2. Знание методов, используемых в ЧПП и других прогностических приложениях.

3. Знание преимуществ, ограничений и результатов верификации моделей ЧПП, используемых в прогностических подразделениях, а также корректировки прогнозов, необходимой для их приспособления к местным условиям.

4. Знание статистических подходов, применимых к метеорологической информации.

5. Знание вероятностных подходов, таких как ансамблевые системы прогнозирования.

6. Критическое сравнение различных прогностических моделей, интерпретация данных наблюдений и климатических данных и обобщение этой информации для обоснованной оценки наиболее вероятного развития погодных условий, альтернативных вариантов развития и неопределенностей, связанных с каждой из составляющих этого процесса.

7. Интерпретация выходных данных прогностических моделей в различных временных диапазонах.

8. Определение того, какие данные наблюдений и моделей, контекстуальная информация и информация о воздействиях наиболее полезны, особенно при сверхкраткосрочном прогнозе.

9. Знание потенциального воздействия метеорологических явлений на пользователей и процессы принятия ими решений.

Компетенция 3. Предупреждение об опасных метеорологических явлениях.

Описание компетенции: предупреждения выпускаются своевременно, когда ожидается возникновение опасных метеорологических условий или ожидается, что параметры достигнут установленных пороговых значений или вызовут значительное воздействие. Предупреждения обновляются или отменяются в соответствии с установленными критериями.

Компоненты эффективности:

1. Прогнозировать опасные метеорологические явления, включая их пространственную протяженность, время начала и окончания, продолжительность, интенсивность и временные изменения.

2. Обеспечивать подготовку и выпуск предупреждений в соответствии с национальными протоколами об опасных явлениях и их воздействии.

3. Обеспечивать, насколько это практически возможно, согласованность предупреждений об опасных метеорологических явлениях (в пространстве и времени) в пределах зоны ответственности.

4. Проводить мониторинг предупреждений, выпущенных для других регионов, и поддерживать связь с соседними регионами.

5. Поддерживать осведомленность о воздействии опасных метеорологических явлений, упомянутых в штормовых предупреждениях и оповещениях.

Базовые знания и навыки:

1. Знание конкретных систем подготовки и распространения продукции, используемых в прогностическом подразделении.

2. Знание и умение использовать инструменты для выпуска предупреждений.

3. Знание политики, процедур и критериев выпуска предупреждений.

4. Знание потенциального воздействия метеорологических явлений на пользователей и процессы принятия ими решений.

Компетенция 4. Передача метеорологической информации и информации о потенциальных воздействиях внутренним и внешним пользователям.

Описание компетенции: требования пользователей полностью ясны и удовлетворяются путем передачи сокращенных и полных прогнозов погоды и предупреждений таким образом, чтобы они, в свою очередь, были ясно поняты пользователями.

Компоненты эффективности:

1. Обеспечивать распространение всех прогнозов и предупреждений по утвержденным средствам и каналам связи определенным группам пользователей, как предусмотрено соответствующими стандартными рабочими процедурами.

2. Давать разъяснения в отношении метеорологической информации, включая неопределенность прогнозов, по мере необходимости.

3. Проводить брифинги и предоставлять консультации для удовлетворения конкретных потребностей пользователей по мере необходимости.

Базовые знания и навыки:

1. Знание стандартов, процедур и методов представления прогностической информации и предупреждений общественности во всех соответствующих средствах массовой информации, включая информацию о воздействиях.

2. Знание протоколов представления информации предупреждений МЧС России, включая информацию о вероятных воздействиях и мероприятиях по смягчению последствий.

3. Понимание потребностей пользователей в метеорологической информации и ее использовании.

4. Знания о практическом применении метеорологии к деятельности человека и конкретных пользователей.

Компетенция 5. Обеспечение качества метеорологической информации и услуг.

Описание компетенции: качество метеорологических прогнозов, предупреждений и сопутствующей продукции поддерживается за счет применения, где это уместно, системы управления качеством.

Компоненты эффективности:

1. Применять систему и процедуры управления качеством, используемые в организации.

2. Осуществлять валидацию метеорологических данных, продукции, прогнозов и предупреждений (на предмет своевременности, полноты, точности).

3. Оценивать влияние известных погрешностей (смещения (bias), достижимой точности наблюдений и методов зондирования).

4. Осуществлять мониторинг оперативных систем и принимать меры в нештатных ситуациях.

5. Вносить вклад в анализ конкретных случаев, включая усвоение обратной связи от пользователей и информации о воздействиях.

6. Наставлять младших коллег и предоставлять им поддержку и советы по мере необходимости.

Базовые знания и навыки:

1. Знание стандартных рабочих процедур, а также процедур на случай непредвиденных обстоятельств.

2. Знание методов и технологий, используемых в прогностическом подразделении.

3. Знание процедур валидации и верификации метеорологических прогнозов и предупреждений.

4. Понимание методов, используемых при анализе частных случаев и обратной связи в целях повышения качества прогнозов погоды и предупреждений.

Практические навыки

Всемирной метеорологической организацией сформулированы фундаментальные знания и навыки, связанные с конкретными современными технологиями и инструментами, необходимыми в работе метеорологов-прогнозистов: спутниковой и радиолокационной информацией. Это практические навыки, которые, как правило, преподаются в ходе начального оперативного обучения и требуют обновления по мере развития технологий и продукции. Навыки в этих областях лежат в основе компетенций метеорологического прогнозирования.

Перечислим лишь сами навыки, их подробное описание можно найти в [4].

Спутниковые навыки:

- определение особенностей подстилающей поверхности;
- определение типов облачности и ее характеристик;
- обнаружение и интерпретация крупномасштабных, синоптических и мезомасштабных систем;
- идентификация и интерпретация атмосферных явлений;
- интерпретация вторичных полей и продуктов;
- идентификация и интерпретация характеристик океанических и водных объектов и систем;
- сравнение спутниковых данных с результатами численного прогноза погоды.

Радиолокационные навыки:

- анализ продукции, основанной на радиолокационной отражаемости;
- анализ продукции, основанной на радиальной скорости;
- анализ поляриметрической радиолокационной продукции;
- анализ радиолокационной продукции для идентификации погодных систем и связанных с ними явлений погоды;
- обнаружение неметеорологических целей;
- осуществление наукастинга.

Выводы

В статье представлены разработанные и рекомендуемые к использованию на практике Всемирной метеорологической организацией требования к компетенциям метеорологов-прогнозистов. Соответствие квалификации метеорологов изложенным компетенциям является важнейшим условием достижения высокого качества выпускаемых прогнозов погоды и предупреждений об опасных и неблагоприятных условиях.

Компетенции также служат основой для оценки работы метеорологов [5]. В связи с важностью представленной в статье проблемы в настоящее время в рамках государственного задания ФГБУ «Гидрометцентр России» занимается разработкой методического документа «Положение об оценке компетенций метеорологов-прогнозистов сетевых организаций Росгидромета». Оценка компетенций проводится в целях определения того, способен ли специалист выполнить работу на необходимом уровне навыков и знаний, т. е. для выявления пробелов между требуемым уровнем компетенции метеорологов и текущей эффективностью для определения, разработки и внедрения соответствующих решений по их обучению и повышению квалификации. Требования к оценке компетенций могут варьироваться в зависимости от конкретных задач, выполняемых сетевой организацией, ее структуры, предоставляемого обслуживания, включая специализированное.

Таким образом, можно сделать вывод, что документирование требований к компетенциям метеорологов-прогнозистов, а также разработка системы оценки этих компетенций должны способствовать повышению качества предоставляемых метеорологических услуг (прогнозов погоды и штормовых предупреждений).

Работа выполнена в рамках исследований по плану ЦНТП Росгидромета НИТР 1.1.11.

Список литературы

1. Васильев Е.В., Дмитриева Т.Г. Опыт прогнозирования экстремальных явлений погоды в ходе подготовки и проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 31-44.
2. Наставление по применению стандартов образования и подготовки кадров в области метеорологии и гидрологии. Том I. Метеорология // ВМО-№ 1083. Женева: ВМО, 2015. 46 с.
3. Технический регламент. Сборник основных документов № 2. Том I. Общие метеорологические стандарты и рекомендуемая практика // ВМО-№ 49. Женева: ВМО, 2019. 55 с.
4. Compendium of WMO Competency Frameworks // WMO-No. 1209. Geneva, 2019. 111 p.
5. Guide to Competency // WMO-No. 1205. Geneva, 2018. 53 p.

References

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

2. Manual on the Implementation of Education and Training Standards in Meteorology and Hydrology. Vol. 1. Meteorology. *WMO-No. 1083*. Geneva, 2011, 46 p.

3. Technical Regulations. Basic Documents No. 2. Vol. 1. General Meteorological Standards and Recommended Practices. *WMO-No. 49*. Geneva, 2017, 55 p.

4. Compendium of WMO Competency Frameworks. *WMO-No. 1209*. Geneva, 2019, 111 p.

5. Guide to Competency. *WMO-No. 1205*. Geneva, 2018, 53 p.

*Поступила 23.08.2021; одобрена после рецензирования 14.09.2021;
принята в печать 28.09.2021.*

*Submitted 23.08.2021; approved after reviewing 14.09.2021;
accepted for publication 28.09.2021.*

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>

Этические принципы, которыми должен руководствоваться автор научной публикации

Автор (или коллектив авторов) при подаче материалов в научный журнал осознает, что несет первоначальную ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования, что предполагает соблюдение следующих принципов:

1. Авторы статьи должны предоставлять достоверные результаты проведенных исследований. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.

2. Авторы должны гарантировать, что результаты исследования, изложенные в предоставленной рукописи, полностью оригинальны. Заимствованные фрагменты или утверждения должны быть оформлены с обязательным указанием автора и первоисточника. Чрезмерные заимствования, а также плагиат в любых формах, включая неоформленные цитаты, перефразирование или присвоение прав на результаты чужих исследований, неэтичны и неприемлемы. Наличие заимствования без ссылки будет рассматриваться редакционной коллегией как плагиат.

3. Авторы должны приводить в рукописи только подлинные факты и сведения; приводить достаточное количество информации для проверки и повторения экспериментов другими исследователями; не использовать информации, полученной в частном порядке, без открытого письменного разрешения; не допускать фабрикацию и фальсификацию данных.

4. Не допускать дублирования публикаций (в сопроводительном письме автор должен указать, что работа публикуется впервые). Если отдельные элементы рукописи были ранее опубликованы, автор обязан сослаться на более раннюю работу и указать отличия новой работы от предыдущей.

5. Авторы не должны предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

6. Необходимо признавать вклад всех лиц, так или иначе повлиявших на ход исследования, в частности, в статье должны быть представлены ссылки на работы, которые имели значение при проведении исследования.

7. Авторы должны соблюдать этические нормы, выступая с критикой или замечаниями в отношении исследований третьих лиц.

8. Соавторами статьи должны быть указаны все лица, внесшие существенный вклад в проведение исследования. Среди соавторов недопустимо указывать лиц, не участвовавших в исследовании.

9. Авторы должны с уважением относиться к работе редколлегии и рецензентов и устранять указанные недостатки или аргументировано их пояснить.

10. Авторы должны представлять и оформлять рукопись согласно принятым в журнале правилам.

11. Если автор обнаружит существенные ошибки или неточности в статье на этапе ее рассмотрения или после ее опубликования, он должен незамедлительно уведомить об этом редакцию журнала;

12. Авторы должны предоставить редакционной коллегии или издателю доказательств правильности исходной статьи или исправить существенные ошибки, если о них редакционной коллегии или издателю стало известно от третьих лиц.

Примечание: В основу принципов по этике для авторов взяты положения из Руководства Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics – COPE) и Издательства Elsevier

Гидрометеорологические исследования и прогнозы

№ 3 (381)

Под редакцией
д-ра геогр. наук И.Н. Кузнецовой

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 28.09.2021. Формат 70×100/16
Печать офсетная. Печ. л. 11. Тираж 300 экз. Заказ № 1423
Отпечатано в типографии
ООО «Типография АМА-ПРЕСС»
107392, г. Москва, Зельев пер., дом 3